BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ





TUYỂN TẬP CÔNG TRÌNH

HỘI NGHỊ KHOA HỌC CÁC NHÀ NGHIÊN CỨU TRẺ
LẦN THỨ XX - NĂM 2025

(TẬP 2: KỸ THUẬT XÂY DỰNG, CÔNG NGHỆ THÔNG TIN, KỸ THUẬT CƠ KHÍ ĐỘNG LỰC, KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN)

NHÀ XUẤT BẢN QUÂN ĐỘI NHÂN DÂN
ISBN: 978-604-495-840-8



Hà Nội - 2025

BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

TUYỂN TẬP CÔNG TRÌNH
HỘI NGHỊ KHOA HỌC CÁC NHÀ NGHIÊN CỨU TRẺ LẦN THỨ XX - NĂM 2025
(TẬP 2: KỸ THUẬT XÂY DỰNG, CÔNG NGHỆ THÔNG TIN, KỸ THUẬT CƠ KHÍ ĐỘNG LỰC, KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN)

NHÀ XUẤT BẢN QUÂN ĐỘI NHÂN DÂN

ISBN: 978-604-495-840-8

Hà Nội - 2025

MỤC LỤC

TT	Tên bài báo	Tác giả	Trang
131.	Nghiên cứu giải pháp gia cường tấm dán FRP cho kết cấu bê tông cốt thép chịu tác dụng của áp lực nổ thông qua mô phỏng số	*Lê Anh Tuấn, Nguyễn Công Nghị*	1167
132.	Nghiên cứu phân tích tác dụng phá huỷ đất đá của hai lượng nổ đặt cạnh nhau	*Lê Hồng Hải*	1180
133.	Nghiên cứu thực nghiệm sự suy giảm cường độ sóng ứng suất khi nổ trong môi trường bê tông san hô	*Ngô Thế Đức, Vũ Tùng Lâm, Nguyễn Hữu Hà*	1190
134.	Nghiên cứu thăm dò hiệu quả giảm chấn cho kết cấu khung thép bằng hệ giằng siêu đàn hồi	*Nguyễn Bá Tiến, Nguyễn Xuân Đại , Đinh Quang Trung*	1198
135.	Numerical analysis of the effects of different behavior models of isolators on the seismic responses of multi-story buildings	*Hai Dang Tran, Xuan Dai Nguyen, Van Tu Nguyen, Hoang Nguyen, Quang Trung Dinh*	1210
136.	Nghiên cứu nhận dạng đặc trưng động của kết cấu chân đế dạng giàn công trình điện gió biển	*Nguyen Hong Quang, Dao Cong Binh, Nguyen Thanh Trung*	1220
137.	Nghiên cứu sử dụng kết cấu khối xếp dạng vòm làm giải pháp chống tạm trong xây dựng công trình ngầm	*Nguyễn Văn Hùng*	1234
138.	Đánh giá hiệu quả năng lượng của bơm nhiệt trong hệ thống điều hòa không khí trung tâm	*Nguyễn Vũ Hùng*	1241
139.	Xây dựng phân phối xác suất của khoảng cách vì thép trong kết cấu chống đỡ ban đầu đường hầm được thi công bằng phương pháp NATM	*Phạm Thanh Tùng, PGS.TS Bùi Đức Năng, TS Trần Anh Bảo*	1247
140.	Nghiên cứu tính toán kết cấu dầm gia cường bằng bản thép ốp chống sụp đổ cục bộ	*Phùng Quang Trung, Lê Hải Dương*	1256
141.	Nghiên cứu hiệu quả gia cường khả năng kháng cắt của tấm CFRP cho dầm bê tông cốt thép	*Trần Hoài Nam, Phạm Thanh Bình, Vũ Ngọc Quang*	1262
142.	Nghiên cứu mô phỏng về trạng thái ứng suất, biến dạng của tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường TRC chịu tải trọng sóng nổ	*Vũ Đình Thanh, Nguyễn Thị Thu Nga, Nguyễn Xuân Bàng*	1276
143.	Tính toán áp lực sóng nổ tác dụng lên công trình trên mặt đất theo giáo trình công sự và tiêu chuẩn UFC – 340 -2	*Duc Hieu Vu, Trung Kien Le, Huu Quoc Nguyen*	1286
144.	Dự đoán mức độ đập vỡ đất đá theo dạng hàm phân phối Rosin-Rammler, Gate-Gaudin-Schumann và Swebrec	*Vũ Tùng Lâm, Vũ Mạnh Tùng, Lê Sỹ Thượng*	1299
145.	Environmentally friendly concrete: An overview and application development in Viet Nam	*Dang Thi Thu Hien, Nguyen Thi Bach Duong, Pham Thanh Hai*	1309
146.	Nghiên cứu tương quan giữa hệ số nền tĩnh và hệ số nền động của mặt đường cứng khi	*Đỗ Văn Thùy, Nguyễn Văn Hiếu*	1320

ISBN: 978-604-495-840-8

	thay đổi độ lớn tải trọng bằng thí nghiệm trong phòng		
147.	Một giải pháp sử dụng cát sạn san hô xây dựng kết cấu công sự dã chiến lắp ghép bảo vệ tàu bay tại các đảo xa bờ	*KS. Dương Duy Khánh, TS. Nguyễn Văn Hiếu*	1330
148.	Một số vấn đề kiểm soát nứt nhiệt trong kết cấu bê tông khối lớn sử dụng chất ức chế tăng nhiệt thủy hóa	*TS. Nguyễn Trọng Chức, PGS.TS. Hoàng Quốc Long, NCS. Lê Văn Hưng*	1340
149.	Nghiên cứu tính toán trường nhiệt độ trong lớp bê tông nhựa mặt đường ô tô khu vực Hà Nội theo kịch bản biến đổi khí hậu 2020 của Việt Nam	*Trần Huy Chương, Vũ Văn Chiên, Nguyễn Văn Toàn, Tạ Xuân Tùng*	1349
150.	Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến cường độ nén của vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC	*Nguyễn Hoàng Long, Mai Viết Chinh, Phạm Đức Tiệp*	1356
151.	Analysis of Stress-Strain State of Airport Pavement Concrete Slab Under Simultaneous Load and Temperature Effects in Vietnamese Conditions	*Nguyễn Hữu Lâm, Nguyễn Văn Hiếu*	1368
152.	Xác định tham số mô hình Hoek- Brown cho mẫu đá từ thí nghiệm nén đơn trục và ép chẻ mẫu Brazil	*Nguyễn Huy Hiệp, Nguyễn Quý Đạt, Vũ Quang Anh, Vũ Tùng Lâm*	1376
153.	Nghiên cứu tải trọng sóng lên cọc thẳng đứng có xét tới ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm cọc bằng mô hình toán flow 3D	*ThS. Lê Văn Tú*	1383
154.	Nghiên cứu đánh giá giải pháp cơ động bán lắp ghép để nâng cao trình đỉnh đê, giảm lượng sóng tràn qua đê cho các đảo xa bờ	*Nguyễn Thanh Sang, Nguyễn Quý Thành*	1388
155.	Đánh giá sự suy giảm mức cường độ tiếng ồn bằng thực nghiệm khi sử dụng tấm cách âm nỉ Acoustic Sonic	*KS. Nguyễn Văn Hợi, Nguyễn Văn Ý, Hoàng Minh Hà, Nguyễn Đăng Hiển*	1398
156.	Mô hình hóa công trình ngầm chịu tải trọng động đất với môi trường nền có ứng xử HS small - trường hợp nghiên cứu tại đường hầm tuyến Metro số 3 (Nhổn - Ga Hà Nội)	*Nguyễn Xuân Hai, Vũ Ngọc Anh, Phạm Đức Tiệp*	1410
157.	Xác định vị trí hư hỏng của kết cấu dầm thép thông qua sự thay đổi tần số dao động riêng	*Trần Trung Đức, Tạ Đức Tuân*	1423
158.	Nghiên cứu ảnh hưởng của một số loại dữ liệu giả bất thường khi sử dụng mô hình autoencoder trong bài toán phát hiện bất thường trong video	*Lê Anh*	1434
159.	Đánh giá một số hướng tiếp cận mạng đồ thị cho bài toán phân loại nhãn của các nút trong mạng đồ thị	*Nguyễn Trọng Huyền Anh, Nguyễn Chí Công, Phan Việt Anh*	1446
160.	Đánh giá một số kỹ thuật học máy cho bài toán phát hiện tài khoản mạng xã hội giả mạo	*Phan Trung Đức, Phan Việt Anh*	1454

ISBN: 978-604-495-840-8

161. Evaluating the Resilience of Machine Learning Based Malware Detection Designs Against Black-box Adversarial Attacks	*Luu Chi Duc*	1464
162. Một chiến lược lựa chọn các điểm đặc trưng cho lược đồ thủy vân rỗng bền vững trên miền tần số kết hợp	*Phạm Thái Hưng, Tạ Minh Thanh*	1471
163. Visible and infrared image fusion for UAV-based object detection: A survey	*Nguyen Thi Lan, Cao Truong Tran*	1482
164. Enhancing Phishing URL Detection with Graph Neural Networks: A Combination of URL and HTML Features	*Le Thi Vuong*	1498
165. MetaLog: Impact of Parameters and Token Count in Pre-Trained Embeddings	*Cong Minh Vu, Minh Thien Long Vo, Van Loi Cao*	1506
166. Hiệu chỉnh mô hình ngôn ngữ cho bài toán hỏi đáp văn bản luật	*Vũ Thị Kim Như*	1519
167. A Novel Hybrid Model for Cyber-Attack Detection	*Van Quan Nguyen, Long Thanh Ngo, Viet Hung Nguyen, Le Minh Nguyen*	1529
168. Enhancing Video Anomaly Detection: Object-based Pseudo Anomalies and Memory Augmented Autoencoder	*Van Thieu Doan, Hong Quan Nguyen, Thi Huong Chu, Anh Le, Quang Uy Nguyen, Bao Ngoc Vi, Hai Hong Phan*	1542
169. Improving discriminative representation autoencoder for few-shot cyberattack detection	*Manh-Tuan Nguyen, Van Loi Cao*	1554
170. Nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ cắt và tính chất môi trường đến các yếu tố cản cắt trong quá trình làm việc của trống cắt lắp trên máy đào một gầu	*Đặng Đình Vũ, Trịnh Văn Hải*	1563
171. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số điều khiển đến đặc tính làm việc của hệ thống truyền động thủy lực dẫn động cơ cấu bơi trên xe thiết giáp chở quân	*Nguyễn Tiến Vĩ, Nguyễn Duy Đạt, Lê Quang Đạt*	1571
172. Nghiên cứu động lực học của máy đầm cóc	*Nguyễn Quý Tằng, Lê Trọng Tuấn*	1577
173. Nghiên cứu tính toán, lựa chọn các cụm hệ thống động truyền lực xe thiết giáp chở quân 8x8 chế tạo tại Việt Nam	*Nguyễn Thanh Quang, Nguyễn Minh Tân, Cù Xuân Phong*	1585
174. Effect of duct intake flow deflector on aerodynamic characteristic of electric propulsion fan	*Chu Hoang Quan, Nguyen Trung Kien, Nguyen Binh Nguyen, and Dinh Cong Truong*	1595
175. Nghiên cứu thiết kế cơ cấu phanh xe thiết giáp bánh lốp chở quân	*Lưu Mạnh Linh, Tô Viết Thành, Nguyễn Trường Sinh*	1610
176. Nghiên cứu ảnh hưởng tỉ số tăng áp khí nạp đến trạng thái nhiệt độ của nhóm piston-xylanh động cơ diesel tàu thủy	*Nguyễn Đắc Lợi, Nguyễn Văn Dương*	1622
177. Đánh giá độ bền các cụm chi tiết của phần vận hành xe tăng T-54B cải tiến	*Đồng Văn Mạnh, Cù Xuân Phong*	1633

ISBN: 978-604-495-840-8

178. Nghiên cứu thiết kế bố trí chung xe thiết giáp chở quân bánh lốp 8x8	*Khuất Mạnh Hùng, Tô Viết Thành*	1641
179. Nghiên cứu hoàn thiện hệ thống động lực xe XCB-01	*Vũ Tiến Duyệt, Võ Văn Trung*	1654
180. Xây dựng thuật toán xử lý ảnh xác định chiều dài phân rã tia phun trong ống hóa hơi của động cơ tuabin khí cỡ nhỏ	*Nguyễn Hữu Hà, Phạm Xuân Phương, Nguyễn Quốc Quân*	1659
181. Xác định tải trọng động tác dụng lên hộp số xe tăng T-54B cải tiến làm cơ sở cho bài toán tính bền mỏi	*Lê Xuân Hải, Nguyễn Minh Tân*	1669
182. Nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ cách nhiệt tới trạng thái nhiệt của piston động cơ diesel	*Nguyễn Văn Dương*	1680
183. Nghiên cứu ảnh hưởng của khe hở đỉnh cánh tới hiệu suất tầng cánh công tác máy nén động cơ tuabin khí TV3-117 bằng ANSYS CFX	*Lê Tiến Dương, Trần Duy Khánh*	1688
184. Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát đến trạng thái nhiệt của piston và xylanh động cơ diesel tàu thủy	*Phạm Văn Duy, Nguyễn Văn Dương*	1695
185. Nghiên cứu thiết kế hệ thống treo xe thiết giáp xích sản xuất tại việt nam	*Tô Viết Thành, Dương Thành Công, Từ Vĩnh Sang*	1703
186. Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số kết cấu đến đặc tính động lực học của van phân phối điện thủy lực hai cấp dùng trên xe quân sự	*Nguyễn Duy Đạt, Nguyễn Tiến Vĩ, Lê Văn Dưỡng*	1711
187. Nghiên cứu khả năng của một số thuật toán điều khiển bám quỹ đạo cho xe tự hành có hệ thống lái Ackerman và cảm biến Lidar	*Mai Viết Vượng, Vũ Ngọc Tuấn, Nguyễn Đình Dũng*	1719
188. Nghiên cứu đáp ứng địa hình của xe sửa chữa cơ động quân sự kéo mooc phát điện khi di chuyển trên mặt đường mấp mô ngẫu nhiên	*Trần Đức Thắng, Nguyễn Minh Kha, Phạm Chí Hiếu, Nguyễn Công Chính, Phạm Ngọc Minh Dũng*	1727
189. Nghiên cứu khảo sát động học và động lực học hệ thống phanh ô tô có dẫn động thủy lực và trợ lực chân không dựa trên mô hình bán tự nhiên	*Lê Văn Trung, Trần Thành Lam, Lại Việt Anh, Đỗ Văn Tứ, Nguyễn Mạnh Hùng*	1737
190. Mô phỏng động lực học quay vòng ô tô KAMAZ-43253 bằng phần mềm MATLAB-Simulink	*Bạch Kiên Trung, TS. Vũ Mạnh Dũng*	1743
191. Nghiên cứu động lực học hệ thống treo bán tích cực với mô hình ¼ xe sử dụng bộ điều khiển PID, LQR và fuzzy logic	*Đỗ Văn Tứ, Trần Thành Lam, Lại Việt Anh, Lê Văn Trung*	1754
192. Xây dựng mô hình dao động ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc	*Nguyễn Quang Thân, Nguyễn Văn Trà*	1768
193. Mô phỏng động lực học trợ lực thủy lực hệ thống lái ô tô KAMAZ bằng phần mềm MATLAB-Simulink	*Nguyễn Hữu Quyết, TS.Vũ Mạnh Dũng*	1775

ISBN: 978-604-495-840-8

194.	Phương pháp lựa chọn tập thông số chẩn đoán	*Trần Ngọc Quang, PGS.TS. Nguyễn Văn Dũng*	1786
195.	Động lực học dao động của ô tô có kể tới hiện tượng tách bánh trên mô hình ½ ngang xe	*Vũ Ngọc Minh, Nguyễn Đăng Quý, Nguyễn Trường Sinh*	1798
196.	Nghiên cứu xây dựng mô hình động lực học chuyển động thẳng của ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện	*Nguyễn Văn Hưng, TS Nguyễn Trường Sinh*	1807
197.	Nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm khảo sát độ êm dịu chuyển động của ô tô quân sự bằng công nghệ thực tại ảo	*Trần Thành Lam, Đỗ Văn Tứ, Lê Văn Trung, Nguyễn Mạnh Hùng, Lại Việt Anh*	1817
198.	Ứng dụng MATLAB - SIMULINK mô phỏng dao động sàn xe tổ hợp pháo phòng không ở trạng thái bắn đơn	*Trần Mạnh Hải, Nguyễn Văn Trà*	1823
199.	Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số của bộ điều khiển PID cho hệ thống cân bằng điện tử esc đến quỹ đạo chuyển động của ô tô	*Trần Danh Đồng, Vũ Ngọc Tuấn, Nguyễn Đình Dũng*	1833
200.	Khảo sát sự lão hóa của dầu bôi trơn dựa trên tiêu chuẩn ISO 4406	*Lại Việt Anh, Trần Văn Nam, Vũ Mạnh Dũng, Lê Văn Trung, Nguyễn Mạnh Hùng*	1841
201.	Đề xuất bộ điều khiển chuyển số trong hộp số tự động trên ô tô khi lực cản thay đổi đảm bảo tính năng tăng tốc của ô tô	*Nguyễn Viết Anh, Nguyễn Văn Trà*	1851
202.	Ứng dụng phần mềm ansys workbench nghiên cứu độ bền khung của tổ hợp pháo phòng không ở trạng thái bắn đơn	*Chu Nguyên Chương, Nguyễn Văn Trà*	1860
203.	Human action recognition for human-robot interaction using transformer model and inertial measurement unit (IMU) data	*Tien The Nguyen, Tran Cong Tan, Vu Xuan Duc, Xuan Tung Truong*	1869
204.	Enhancing MMR algorithm and applying to the weapon - target assignment problem	*Nguyen Xuan Truong, Van Ba Viet An, To Hien Huy Hieu*	1877
205.	Development of a new under-sampling method for accelerating magnetic resonance imaging scans	*Khanh Pham Duc, Thinh Dinh Vo Cong, Anh Quang Tran*	1887
206.	Development of a cost-effective polymerase chain reaction device	*Trần Đình Chiến, Vương Trí Tiếp, Trần Anh Quang*	1897
207.	Điều hướng robot có nhận thức xã hội: Tự động điều hướng có tính đến yếu tố cảm xúc của con người	*Phạm Trần Quyền Anh, Phạm Trung Dũng, Trần Công Tân, Trương Xuân Tùng*	1905
208.	Phân tích ảnh hưởng dữ liệu đo đến độ chính xác ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số	*Vũ Văn Chiến, Nguyễn Ngọc Tuấn, Ngô Việt Cường*	1915
209.	Nghiên cứu phương pháp đồng bộ tốc độ sản xuất trong dây chuyền bọc cáp điện nhà máy Z143	*Nguyễn Danh Điệp, Phạm Tuấn Thành*	1925

ISBN: 978-604-495-840-8

210. Tổng hợp bộ điều khiển hợp thể thích nghi cho hệ 2-DOF Helicopter dựa trên mạng nơron RBF	*Bùi Xuân Hải, Nguyễn Văn Xuân, Phan Nguyên Hải, Nguyễn Xuân Chiêm*	1939
211. Nghiên cứu thuật toán phát hiện Phân biệt hệ số không đổi (Constant Fraction Discrimination - CFD) trong xác định cự ly đối tượng sử dụng kỹ thuật laser	*Dương Văn Hiếu, Trương Đăng Khoa, Bùi Quang Lý*	1949
212. Ứng dụng mô hình AlexNet-SVM trong phân loại tình trạng sức khỏe thai nhi từ dữ liệu cardiotocogram	*Trần Thị Huế*	1959
213. Nghiên cứu phương pháp xác định quỹ đạo bay của mục tiêu tại thời gian thực sử dụng camera hai mắt	*Phạm Minh Kha, Cao Hữu Tình, Nguyễn Quang Thi*	1971
214. Nghiên cứu, xây dựng thuật toán điều khiển của thiết bị kiểm tra và tìm hỏng cho hệ thống khởi động điện trên xe khắc phục vật cản IMR-2M	*Trịnh Văn Kháng, Trần Văn Tuyên, Lê Trọng Nghĩa*	1983
215. Thiết kế bộ điều khiển thích nghi để ổn định hệ con lắc ngược dựa trên mạng nơ-ron RBF	*Huỳnh Văn Khương, Nguyễn Xuân Chiêm, Bùi Thanh Xuân, Hồ Thị Sương*	1991
216. Nghiên cứu và đánh giá hiệu quả của các thuật toán lập kế hoạch chuyển động trên môi trường pedsim cho robot làm việc trong môi trường đông đúc	*Nghiêm Hoàng Nam, Nguyễn Lan Anh, Trần Công Tân, Trương Xuân Tùng*	2000
217. Xây dựng thuật toán dẫn đường cho UAV tự hành trong môi trường động	*Lê Ngọc Quỳnh, Lê Trọng Nghĩa, Trần Công Tân, Trương Xuân Tùng*	2011
218. Ứng dụng hộp giới hạn định hướng từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 cho bài toán theo dõi nhiều đối tượng	*Vũ Minh Nhương, Nguyễn Văn Xuân, Nguyễn Lan Anh, Trương Xuân Tùng*	2020
219. Phát hiện dấu hiệu run trong bệnh parkinson bằng các mô hình học máy có giám sát	*Vũ Quân, Nguyễn Mạnh Cường*	2031
220. Nghiên cứu phương pháp nâng cao độ chính xác tham số chuyển động của ô tô trên cơ sở dữ liệu GPS	*Trịnh Anh Tài, Nguyễn Hữu Nam, Trần Xuân Trung*	2042
221. Phát hiện rung nhĩ trong tín hiệu điện tim bằng phương pháp học máy kết hợp cửa sổ trượt sử dụng entropy xấp xỉ	*Đỗ Ngọc Thương, Trần Ngọc Quang, Phạm Văn Thuận*	2052
222. Xây dựng bộ điều khiển dựa trên chế độ trượt để ổn định dòng điện cho động cơ bước lai	*Nguyễn Việt Anh, Lê Minh Kiên, Trần Văn Nhân*	2062
223. Nghiên cứu phương pháp cải thiện đặc tính mô men Động cơ từ trở chuyển mạch	*Nguyễn Văn Giáp, Phạm Tuấn Thành, Lương Thị Thanh Hà*	2072
224. Phát triển thuật toán tạo bộ dữ liệu ứng dụng trong hiệu chỉnh không đồng nhất ảnh hồng ngoại	*Nguyễn Ngọc Anh, Doãn Văn Minh*	2080
225. Tổng hợp bộ điều khiển thích nghi cho hệ truyền động điện thủy lực pháo AK230	*Nguyễn Văn Bắc, Nguyễn Ngọc Tuấn*	2089

ISBN: 978-604-495-840-8

226. Nghiên cứu tổng hợp phương pháp dẫn tiếp cận tỉ lệ trên cơ sở kỹ thuật học tăng cường	*Lê Ngọc Chính, Cao Hữu Tình*	2100
227. Nghiên cứu phương án xây dựng hệ thống điều khiển sàn công tác cho đài radar trên tàu hải quân	*Ngô Kiên Định, Hoàng Mạnh Tưởng, Nguyễn Đình Khánh*	2110
228. Phương án xây dựng giá thử con quay đầu tự dẫn tên lửa phòng không tầm thấp dựa trên công nghệ mới	*Phạm Văn Dương, Hoàng Mạnh Tưởng*	2118
229. Nghiên cứu nâng cao chất lượng bộ điều khiển độ sâu ngư lôi trên cơ sở ứng dụng phương pháp điều khiển PID kết hợp GA	*Cao Song Hào, Bùi Văn Tiến, Phạm Văn Tuấn*	2127
230. Tổng hợp bộ điều khiển trượt đầu cuối nhanh để điều khiển tư thế thiết bị bay không người lái dạng hexacopter	*Trịnh Văn Hiền, Nguyễn Ngọc Hưng*	2137
231. Nghiên cứu xây dựng mô hình động học và tổng hợp hệ thống điều khiển tư thế cho UAV dạng Quadrotor	*Đinh Lê Duy Hiếu, Nguyễn Vĩ Thuận*	2146
232. Tổng hợp bộ điều khiển ổn định đường ngắm cho pháo 23mm-2M trên tàu cảnh sát biển hoạt động đến sóng cấp 3 dựa trên RISE	*Vũ Xuân Huy, Hoàng Mạnh Tưởng, Vũ Quốc Huy*	2156
233. Nghiên cứu nâng cao chất lượng hệ thống ổn định đầu tự dẫn sử dụng bộ điều khiển kết hợp LQR – Modal	*Vũ Quốc Phi, Hoàng Mạnh Tưởng, Lê Văn Hùng*	2165
234. Xây dựng mô hình mô phỏng và xác định các đặc trưng khí động của mẫu máy bay không người lái dạng Heron	*Trần Văn Nam, Bùi Văn Tiến, Trần Thế Hùng, Phạm Chung*	2172
235. Nghiên cứu ứng dụng điều khiển bền vững trong bài toán điều khiển tư thế của quadrotor	*Kiều Bích Sơn, Trần Đình Hưng, Vũ Hỏa Tiễn, Cao Hữu Tình*	2185
236. Một thuật toán phát hiện UAV thời gian thực kích thước nhỏ cho các thiết bị nhúng	*Nguyễn Tiến Tài, Nguyễn Quang Anh*	2195
237. Nghiên cứu tối ưu các hệ số bộ điều khiển PID trong bài toán điều khiển độ cao quadrotor dựa trên kỹ thuật học tăng cường	*Nguyễn Xuân Tây, Phạm Ngọc Văn*	2204
238. Xây dựng thuật toán phát hiện đối tượng ứng dụng cho hệ quang điện tử trên tàu mặt nước sử dụng mô hình học sâu	*Nguyễn Minh Thuận, Vũ Đức Trường, Đỗ Nam Thắng, Trương Xuân Tùng*	2211
239. Tổng hợp bộ điều khiển Backstepping tối ưu với bộ quan sát mở rộng thích nghi trong hệ thống dẫn và điều khiển tích hợp cho tên lửa	*Đinh Hồng Toàn, Nguyễn Văn Xuân, Phạm Văn Nguyên, Trương Đăng Khoa*	2221
240. Xây dựng thuật toán định vị và xây dựng bản đồ đáy biển cho phương tiện ngầm tự hành	*Nguyễn Kim Trọng, Trương Xuân Tùng, Trần Văn Nhân*	2231
241. Huấn luyện mạng noron đột biến theo giai đoạn để cải thiện độ chính xác trong nhận dạng hệ số lực nâng của máy bay	*Nguyễn Văn Tuấn, Trương Đăng Khoa, Phạm Trung Dũng, Đinh Hữu Tài, Nguyễn Đức Thành, Nguyễn Trọng Hà*	2241

ISBN: 978-604-495-840-8

Nghiên cứu giải pháp gia cường tấm dán FRP cho kết cấu bê tông cốt thép chịu tác dụng của áp lực nổ thông qua mô phỏng số

Lê Anh Tuấn[1], Nguyễn Công Nghị[1]

[1]Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật quân sự

[*] Email: nghinguyen@lqdtu.edu.vn, Tel: 0986873001

Tóm tắt

Bài báo trình bày nghiên cứu về khả năng ứng dụng của vật liệu FRP trong việc gia cường cho kết cấu công trình nói chung và kết cấu bằng bê tông cốt thép nói riêng, cũng như việc ứng dụng giải pháp sử dụng tấm dán FRP dạng vải sợi để gia cường cho kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép chịu tác dụng của vụ nổ. Thông qua phương pháp thực nghiệm số bằng phần mềm LS-DYNA cho kết quả khả quan khi giải pháp gia cường làm giảm đáng kể nội lực trong kết cấu và sự phá hoại kết cấu dưới áp lực nổ. Kết quả nghiên cứu của bài báo là một đóng góp nhỏ giúp làm sáng tỏ hơn hiệu quả và tiềm năng ứng dụng của giải pháp gia cường FRP cho kết cấu công trình chịu tác dụng bởi áp lực của vụ nổ.

Từ khóa: *FRP, mô hình số, LS-DYNA, vụ nổ, BTCT*

1. Đặt vấn đề

Vụ nổ tạo ra áp lực lớn có thể gây phá hoại hoặc làm suy giảm nghiêm trọng khả năng chịu lực của kết cấu công trình, vì thế đã có nhiều các nghiên cứu về giải pháp gia cường làm tăng khả năng kháng lực của kết cấu khi chịu tác dụng nổ [1]. Việc sử dụng tấm dán FRP (Fiber Reinforced Polymer) dạng vải sợi (dệt) giúp tăng cường độ bền, độ dẻo và khả năng chịu lực của bê tông cốt thép (BTCT). FRP có nhiều ưu điểm như không làm tăng trọng lượng đáng kể của kết cấu, dễ thi công và đạt được khả năng chịu lực trong thời gian ngắn. Bên cạnh đó tấm dệt FRP có khả năng chống ăn mòn cao và khả năng chịu kéo vượt trội nên là giải pháp hiệu quả để gia cường cho kết cấu bê tông có tính giòn, nhất là khả năng giảm hiện tượng phá hoại khi kết cấu bê tông chịu tác dụng của tại trọng nói chung [2, 3] và tải trọng cực hạn của vụ nổ nói riêng.

Các thử nghiệm toàn diện về kết cấu rất tốn kém và phần lớn việc tiến hành các thí nghiệm về áp lực của vụ nổ lên công trình thực là rất khó thực hiện. Do đó, phân tích mô hình kết cấu dựa trên mô phỏng số là một cách tiếp cận quan trọng để xác định các ứng xử của kết cấu BTCT khi chịu áp lực nổ. Để đáp ứng được ứng xử của kết cấu khi chịu áp lực nổ, một công cụ phân tích số phải có các tiêu chí sau: (1) có thời gian tải và phản hồi đặc trưng trong một mili giây; (2) có đủ khả năng xử lý các vấn đề phi tuyến vật liệu, phi tuyến hình học và phi tuyến trạng thái; (3) cho phép mô phỏng phân tích động phi tuyến cao; (4) Có thể xử lý các vấn đề về yêu cầu vật liệu và tiếp xúc giữa vật liệu mềm và cứng; (5) Có khả năng phân tích sự thay đổi lớn hoặc biến dạng lớn của vật liệu chịu ứng suất [4]. Xét về đặc điểm, yêu cầu về bản chất của đối tượng nghiên cứu và theo phân tích, so sánh chức năng phần mềm thì LS-DYNA là một phần mềm phân tích động phù hợp nhất với mô phỏng tác động cực hạn từ vụ nổ cho nghiên cứu này về lý thuyết, mô hình vật liệu, chức năng, phương trình trạng thái và tiêu chuẩn phá hủy. LS-DYNA được ứng dụng rộng rãi trong việc phân tích phản ứng của kết cấu đối với tải trọng va đập và xung kích với nhiều mô hình khác nhau cho vật liệu BTCT và đa dạng các loại vật liệu khác.

Trọng tâm của nghiên cứu này là dựa trên mô phỏng số để khảo sát và đánh giá khả năng gia cường của tấm dán FRP dạng dệt trong điều kiện hạn chế về thử nghiệm thực tế. Ngoài ra nghiên cứu cũng đóng góp thêm vào việc phát triển phương pháp bảo vệ kết cấu công trình, giúp giảm thiểu thiệt hại do áp lực nổ và đảm bảo an toàn cho con người.

2. Vật liệu BTCT chịu áp lực nổ và khả năng gia cường của tấm dán FRP

2.1. Ứng xử của vật liệu BTCT chịu áp lực nổ

Đối với kết cấu công trình hiện nay phần lớn được chế tạo từ BTCT, BTCT là loại bê tông thông thường được tạo ra từ các vật liệu cấu thành hỗn hợp tiêu chuẩn (xi măng, cốt liệu, nước, ...) và được gia cố bằng thép cây. Khi chịu áp lực nổ, kết cấu BTCT thể hiện ứng xử độc đáo được gọi là hiện tượng "chấn sụp", xuất hiện ở mặt bên kia của kết cấu, đối diện với bề mặt chịu tác dụng của vụ nổ. Do đó, khi sóng nén ban đầu do vụ nổ tạo ra truyền qua cấu kiện và phản xạ tại bề mặt tự do, sóng xung kích được chuyển thành sóng kéo, gây nứt bê tông ở mức độ cao và gây nên sự vỡ mảnh của bê tông với tốc độ cao [5]. Kết cấu bê tông bị hư hỏng xảy ra ở tốc độ biến dạng cao (hiện tượng chấn sụp) có thể bị đẩy ra dưới dạng các mảnh vỡ. Đối với áp lực nổ dạng xung động cực hạn, phản ứng của kết cấu BTCT xảy ra trong một thời gian rất ngắn nên không tồn tại quá trình cản nhớt [6]. Đỉnh dịch chuyển đầu tiên của kết cấu có biên độ lớn nhất, tiếp theo là các đỉnh dịch chuyển có biên độ thấp hơn đáng kể. Kết cấu thường bị phá hoại ngay trong lần dịch chuyển đầu tiên do biến dạng quá mức. Nếu kết cấu vượt qua được thì sẽ không bị hư hỏng trong các lần chuyển dịch tiếp theo. Do đó, đỉnh dịch chuyển đầu tiên thường được lựa chọn xem xét trong phân tích phản ứng của kết cấu BTCT đối với áp lực nổ [7].

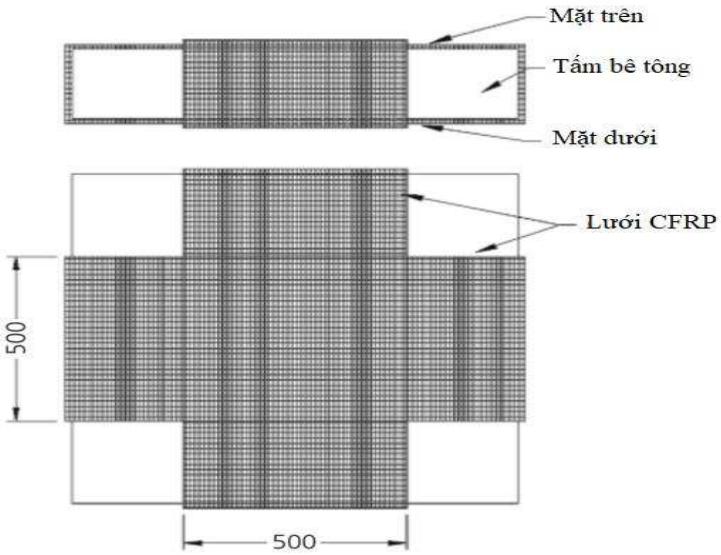
Sự hình thành hiện tượng chấn sụp của kết cấu BTCT có thể tạo ra các mảng văng với tốc độ cao sẽ gây ra nguy hại cho con người và trang thiết bị kỹ thuật bên trong công trình. Xuất phát từ những yêu cầu này cho thấy cần thiết có một giải pháp hữu ích nhằm giảm thiểu sự hình thành vết nứt từ đó giảm hiện tượng chấn sụp, đặc biệt đối với các kết cấu BTCT chưa được thiết kế lớp phòng sụp mềm.

2.2. Giải pháp gia cường kết cấu sử dụng tấm dán FRP

Đối với các kết cấu hoặc tòa nhà hiện chưa được tính toán chịu tải trọng nổ, cần có các giải pháp để bảo vệ và tăng cường thêm khả năng chống nổ cho kết cấu. Sợi polyme gia cố (FRP) là vật liệu tổng hợp được làm từ cấu trúc cao phân tử và được dệt bằng các sợi có các đặc tính cơ học và hình học khác nhau. Khi kết cấu bê tông thông thường được bổ sung thêm lớp gia cố sợi polyme làm cho đặc tính cơ học được cải thiện và khả năng hấp thụ năng lượng được nâng cao, nên các tấm FRP được sử dụng trong các hệ thống chống nổ. Các thử nghiệm nổ khác nhau đã được thực hiện trên các kết cấu BTCT thông thường được gia cố thêm FRP [8-10].

Trong nước, GS.TS Vũ Đình Lợi và các cộng sự đã có một số nghiên cứu thực nghiệm tại hiện trường để đánh giá khả năng chống nổ của kết cấu chịu tác dụng nổ khi được gia cường các tấm polyme sợi carbon (CFRP) và tấm polyme sợi thủy tinh (GFRP) [8]. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khả năng chống nổ của tấm BTCT tăng đáng kể so với không được gia cường, đặc biệt khi tăng lượng nổ hiện tượng chấn sụp trên các tấm BTCT có gia cường không xuất hiện trên cùng một khối lượng nổ và khoảng cách so với tấm BTCT không được gia cường.

Trên thế giới, có nhiều tác giả đã và đang nghiên cứu giải pháp gia cường cho kết cấu BTCT chịu tác động vụ nổ bằng tấm dán FRP [9, 10]. Thông qua các nghiên cứu cho thấy hiệu quả tăng cường của giải pháp làm giảm dao động từ 20 đến 40% so với các mẫu BTCT thông thường [9, 10].



Hình 1. Mô hình tấm bê tông trong thí nghiệm của Razaqpur và cộng sự [10]

Thông qua các nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy giải pháp gia cường kết cấu BTCT bằng tấm dán FRP không chỉ hiệu quả đối với kết cấu chịu tải trọng tĩnh mà còn có hiệu quả đáng kể với tải trọng động nói chung và áp lực từ vụ nổ nói riêng.

3. Vật liệu FRP

3.1. Đặc tính của vật liệu FRP

Vật liệu FRP là một loại composite, gồm hai thành phần chính: chất nền polymer và sợi gia cường. Chất nền thường là nhựa như epoxy hoặc polyester, trong khi sợi gia cường có thể là sợi thủy tinh (GFRP), sợi carbon (CFRP), sợi aramid (AFRP), hoặc sợi tự nhiên [11]. FRP nổi bật với ưu điểm như trọng lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn và cách điện tốt, làm cho nó phù hợp với các ứng dụng trong xây dựng, giao thông, hàng không, điện tử và thể thao.

GFRP là loại phổ biến, sử dụng sợi thủy tinh và được dùng nhiều trong xây dựng và giao thông. CFRP với sợi carbon, có độ bền vượt trội, được ứng dụng trong hàng không và ô tô. AFRP sử dụng sợi aramid, nổi bật với khả năng chống va đập cao, bên cạnh đó còn có NFRP (Natural Fiber Reinforced Polymer) sử dụng sợi tự nhiên thân thiện với môi trường nhưng ít bền hơn so với các loại trên [11].

FRP giúp giảm tải trọng trong các công trình và phương tiện giao thông, đồng thời chống ăn mòn tốt, đặc biệt trong môi trường khắc nghiệt. Tuy nhiên, chi phí sản xuất cao và việc tái chế vật liệu gặp khó khăn. Dù vậy, FRP vẫn đang được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng, giao thông và sản phẩm thể thao nhờ vào ưu điểm vượt trội về hiệu suất và khả năng tùy chỉnh hình dáng, trong đó vật liệu CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) chiếm đến hơn 80% các ứng dụng [12].



Hình 2. Các dạng vật liệu composite sử dụng trong gia cường kết cấu BTCT [11]



Hình 3. Giải pháp tấm dán FRP trong gia cường kết cấu BTCT [12]

3.2. Đánh giá khả năng gia cường vật liệu FRP

Gia cường kết cấu BTCT bằng vật liệu FRP trong điều kiện chịu áp lực vụ nổ là một giải pháp khả thi nhờ vào các ưu điểm nổi bật của FRP, như độ bền kéo cao, khối lượng nhẹ và khả năng chống ăn mòn. Việc sử dụng FRP giúp tăng cường khả năng chịu lực, kiểm soát vết nứt và hấp thụ năng lượng, từ đó giảm thiểu thiệt hại khi chịu tải động cực hạn từ vụ nổ [11, 12].

Các phương pháp như dán bề mặt (Externally bonded), bao bọc (Wrapping) và gắn rãnh (Near -Surface mounted) mang lại hiệu quả khác nhau tùy thuộc vào đặc điểm kết cấu [12]. Đặc biệt, phương pháp bao bọc thích hợp để tăng khả năng chịu nén và chống phá hủy cục bộ cho các cấu kiện chịu áp lực nổ mạnh. Tuy nhiên, hạn chế lớn là chi phí vật liệu và yêu cầu kỹ thuật thi công cao. Ngoài ra, FRP kém hiệu quả trong môi trường nhiệt độ cao, nên trong trường hợp này cần biện pháp bổ sung để đảm bảo an toàn.

Các phương pháp thực nghiệm hiện trường là biện hữu hiệu và chính xác để đánh giá khả năng gia cường của vật liệu FRP cho kết cấu, tuy nhiên các thử nghiệm toàn diện về kết cấu rất tốn kém và phần lớn việc tiến hành các thí nghiệm về áp lực của vụ nổ lên công trình thực là rất khó thực hiện. Do đó, mô phỏng số (thông qua các phần mềm như LS-DYNA, ABAQUS, ANSYS,…) là công cụ thiết yếu để kiểm tra và tối ưu hóa thiết kế gia cường FRP khi các điều kiện về thực nghiệm còn hạn chế. Trong nội dung tiếp theo của bài báo sẽ tiến hành sử dụng phần mềm mô phỏng số LS-DYNA để khảo sát và đánh giá hiệu quả gia cường cho kết cấu BTCT chịu tác động của áp lực nổ.

4. Nghiên cứu khả năng gia cường kết cấu của vật liệu FRP

4.1. Đánh giá khả năng gia cường vật liệu FRP

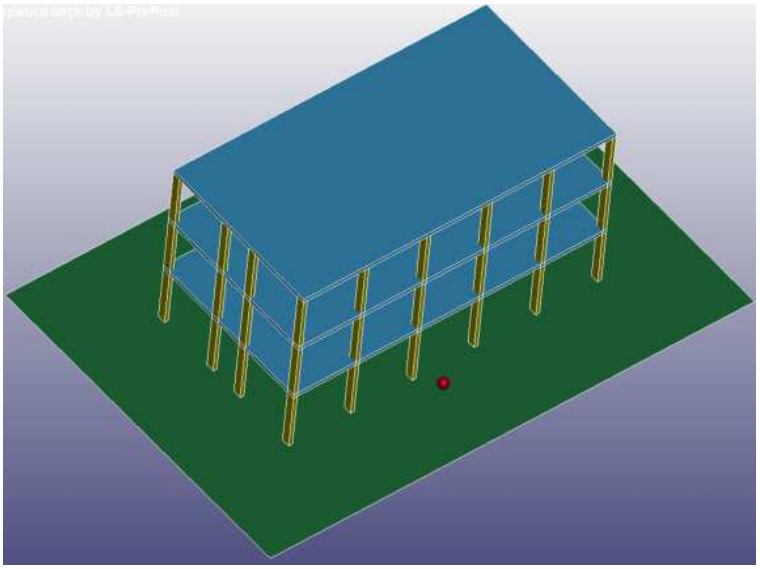
Thực tế hiện nay các vụ nổ có chủ đích là một mối đe dọa lớn đến an ninh, an toàn dân sinh và ảnh hưởng rất lớn đến các công trình xây dựng, cũng như gây ra những thiệt hại nặng nề.



Hình 4. Vụ tấn công khủng bố ngày 19.4.1995 nhằm vào Tòa nhà Liên bang Murrah tại thành phố Oklahoma, Mỹ

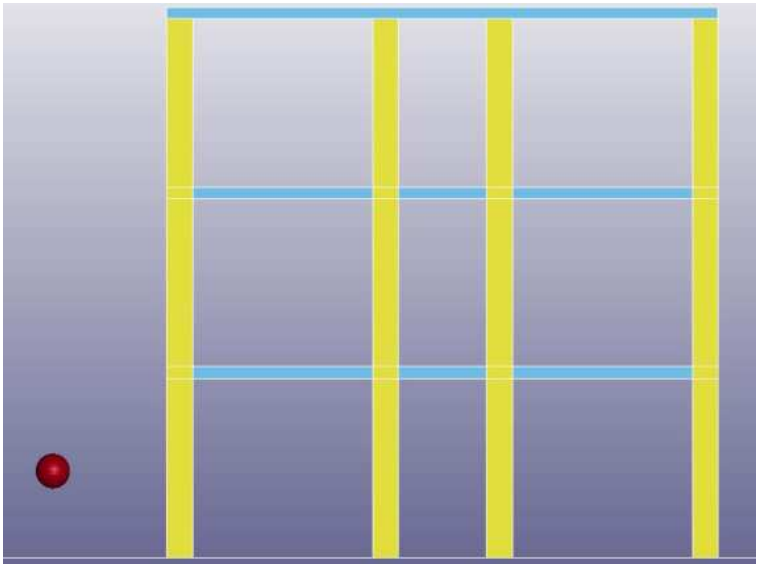
Sau những sự kiện này việc thiết kế và xây dựng các tòa nhà, đặc biệt là các tòa nhà công quyền đang nhận được sự quan tâm lớn từ các kỹ sư kết cấu. Tuy nhiên, có rất nhiều công trình đã được xây dựng mà chưa được tính toán thiết kế với tác động của vụ nổ cần phải được áp dụng các phương thức khác để bảo vệ chúng trước tác động của áp lực từ vụ nổ.

Trong nội dung nghiên cứu sử dụng mẫu nhà điển hình 3 tầng thường dùng cho thiết kế cơ sở hành chính, với các tải trọng thiết kế thông thường lấy theo tiêu chuẩn (TCVN 2737:2023).



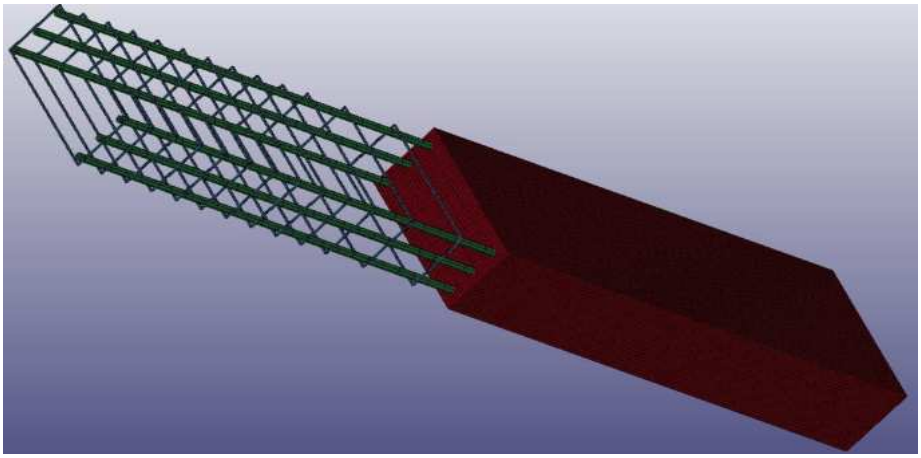
Hình 5. Công trình 3 tầng dạng điển hình

Với kết cấu công trình dạng khung chịu lực thì cấu kiện cột khi bị tổn thương sẽ nguy hại rất lớn đến khả năng chịu lực và ổn định của công trình. Do đó, để nghiên cứu giải pháp gia cường cho kết cấu công trình, thực hiện nghiên cứu tác động của áp lực nổ lên cấu kiện cột tầng 1. Giả thiết vụ nổ cách vị trí cột tầng 1 với khoảng cách 0,5m và cách mặt đất 1,55m (vị trí giữa cột), trọng lượng thuốc nổ là 10kg (TNT).



Hình 6. Vị trí và đối tượng nghiên cứu

Để đơn giản hóa bài toán đã đặt ra cũng như để có thể đáp ứng được yêu cầu mô phỏng do những hạn chế về phần cứng máy tính tiến hành tách kết cấu cột tầng 1 với giả thiết chân và đỉnh cột liên kết ngàm và tiến hành nghiên cứu mô phỏng số. Cấu tạo cột nghiên cứu với chiều cao 3,1m, kích thước tiết diện cột 22x45cm, sử dụng 6 thanh thép ϕ20 bố trí làm việc 1 phương theo phương chịu lực chính của công trình, sử dụng thép đai ϕ6 khoảng cách 100mm cho 1/3 về phía chân và đỉnh cột còn lại giữa cột khoảng cách là 200mm giữa các đai.



Hình 7. Cấu tạo cột nghiên cứu trên mô phỏng số

4.2. Xây dựng mô hình số trên LS-DYNA

4.2.1. Lựa chọn phương pháp mô hình hóa

Thiết lập mô phỏng nổ trong các phần mềm nói chung và LS-DYNA nói riêng đều có nhiều cách thức khác nhau như phương pháp thuần túy Lagrangian cho kết cấu, còn với áp lực nổ sử dụng chức năng CONWEP với thẻ *LOAD_BLAST_ENHANCED, đây là phương pháp

sử dụng các công thức thực nghiệm với tác động nổ chỉ phụ thuộc vào khối lượng thuốc nổ và khoảng cách đến bề mặt tiếp nhận của kết cấu. Do không phải mô hình hóa lượng nổ và không khí xung quanh nên việc tính toán sẽ nhanh hơn và ít tiêu tốn phần cứng hơn. Ngoài ra còn có các phương pháp mô phỏng khác như phương pháp tùy biến Lagrangian - Eulerianian (Arbitrary Lagrangian - Eulerianian, ALE), phương pháp hạt không lưới SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

Trong nghiên cứu này lựa chọn phương pháp thuần túy Lagrangian cho kết cấu, còn với áp lực nổ sử dụng chức năng CONWEP với thẻ *LOAD_BLAST_ENHANCED trong mô hình hóa thử nghiệm số.

4.2.2. Mô hình vật liệu

Để thực hiện quá trình mô phỏng bài toán trong nghiên cứu này sẽ kế thừa các kết quả và thông số đầu vào trong nghiên cứu gần đây cho mô hình vật liệu của vật liệu bê tông và cốt thép [13-15].

Sử dụng mô hình MAT_084 với thẻ vật liệu 084/085-WINFRITH_CONCRETE để mô tả ứng xử của bê tông, với năng lượng phá hoại 65 Nm/m^2 [13], kích thước trung bình cốt liệu lớn 10 mm [14].

Bảng 1. Tham số mô hình vật liệu bê tông [14]

ρ(kg/m^3)	E_{tt}(Pa)	ν	σ_n(Pa)	σ_k(Pa)
2400	26,41e9	0,2	30,01e6	3,0e6

Sử dụng thẻ vật liệu 003-PLASTIC_KINEMATIC để mô tả ứng xử của cốt thép trong bê tông [11].

Bảng 2. Tham số mô hình vật liệu cốt thép [14]

ρ(kg/m^3)	E(Pa)	ν	σ_{ch}(Pa)
7850	2,05e11	0,3	2,4e8

Sử dụng thẻ vật liệu 054/055-ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE để mô tả ứng xử của vật liệu tấm dán CFRP [15].

Bảng 3. Tham số mô hình vật liệu CFRP [15]

ρ(kg/m^3)	EA(Pa)	EB(Pa)	PRBA	PRCA	PRCB	GAB(Pa)	GCA(Pa)	GBC(Pa)
1580	1,65e11	9,0e9	0,0185	0,0185	0,5	5,6e9	5,6e9	2,8e9
XC(Pa)	XT(Pa)	YC(Pa)	YT(Pa)	SL(Pa)	EPS	SOFT	BETA	YCFAC
1,59e9	2,56e9	1,85e8	7,3e7	9,0e7	0,55	0,57	0,0	2,0

4.2.3. Xây dựng mô hình

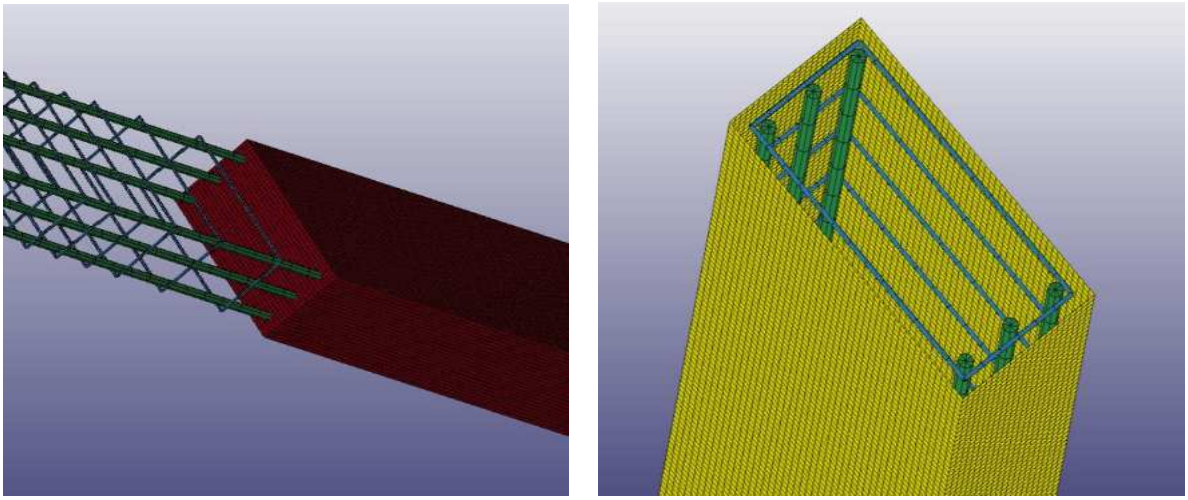
Có nhiều phương pháp khác nhau để mô tả cốt thép trong bê tông như phương pháp vệt cốt thép với việc coi cốt thép như một phần thể tích trong bê tông, phần thể tích này được mô hình hóa như một lớp các phần tử trong cấu trúc tấm bê tông. Phương pháp này tốt cho các biến dạng nhỏ mà cốt thép vẫn đàn hồi. Phương pháp thứ hai là phương pháp chia nút, khi đó các thanh thép được mô hình hóa bằng các các phần tử dầm và được kết nối với bê tông bằng cách ghép các nút lưới chung. Phương pháp này yêu cầu các nút của lưới thép và lưới bê tông phải trùng nhau. Điều này có thể dễ dàng khi xử lý các lớp thép chịu lực, nhưng khi mô tả cốt đai rất khó

khăn. Trong nghiên cứu sẽ sử dụng phương pháp nhúng lưới cốt thép trong bê tông và hệ lưới cốt thép được mô tả độc lập với tấm bê tông và sử dụng thẻ *CONSTRAINED-LAGRANGE_IN_SOLID để mô tả ghép nối giữa lưới cốt thép và tấm bê tông với CTYPE lấy bằng 2.

Để mô tả tấm bê tông sử dụng phần tử khối 8 nút bằng thẻ *SECTION_SOLID với tham số ELFORM = 1. Thanh cốt thép sử dụng phần tử thanh bằng thẻ *SECTION_BEAM với các tham số ELFORM = 1 (dầm Hughes-Liu) và QR = 2, CST =1 cho tiết diện tròn. Tấm dán CFRP sử dụng phần tử vỏ 4 nút bằng thẻ *SECTION_SHELL với tham số ELFORM = 2, lấy tham số ICOMP = 0 cho mô tả một lớp và ICOMP = 1 cho mô tả nhiều lớp.

Mô tả tiếp xúc giữa cột BTCT với tấm dán CFRP có thể sử dụng mô tả tiếp xúc hai chiều bằng thẻ *CONTACT_AUTOMATIC_... với các tham số cho lớp keo bám dính thông qua các tham số FS và FD. Trong nghiên cứu này giả định lớp keo dán có cường độ tốt, lớp keo và tấm dán CFRP là rất mỏng so với kết cấu cột BTCT, do đó sử dụng phương pháp nút chung giữa các nút trên phần tử cột BTCT với các phần tử tấm dán CFRP.

Sử dụng tấm vải sợi CFRP mỗi lớp dày 0,25mm [12], dán kiểu bọc xung quanh thân cột theo suốt chiều cao cột với số lượng lớp khác nhau.



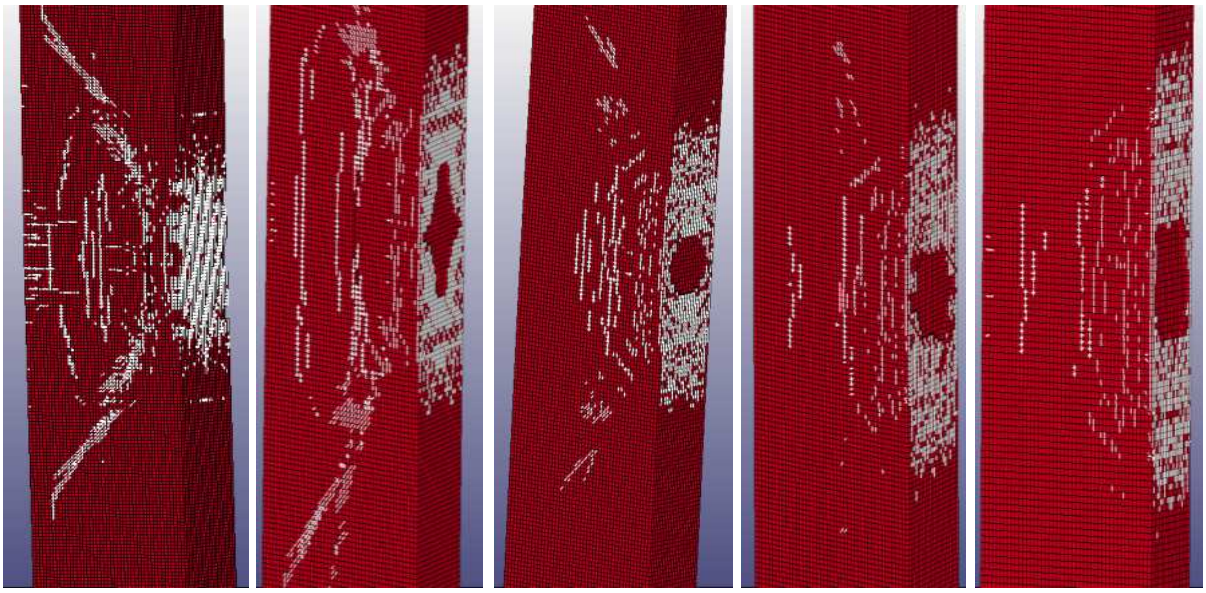
Hình 8. Xây dựng mô hình hình học cho mô phỏng số trên LS-DYNA

4.2.4. Kết quả mô phỏng số

Để đánh giá hiệu quả của giải pháp gia cường tiến hành mô phỏng số so sánh giữa cột BTCT thường và cột BTCT có bọc gia cường lớp dán CFRP với các chiều dày lần lượt là 0,25mm, 0,5mm, 0,75mm và 1,0mm, tương ứng với dán 1 lớp, 2 lớp, 3 lớp và 4 lớp CFRP.

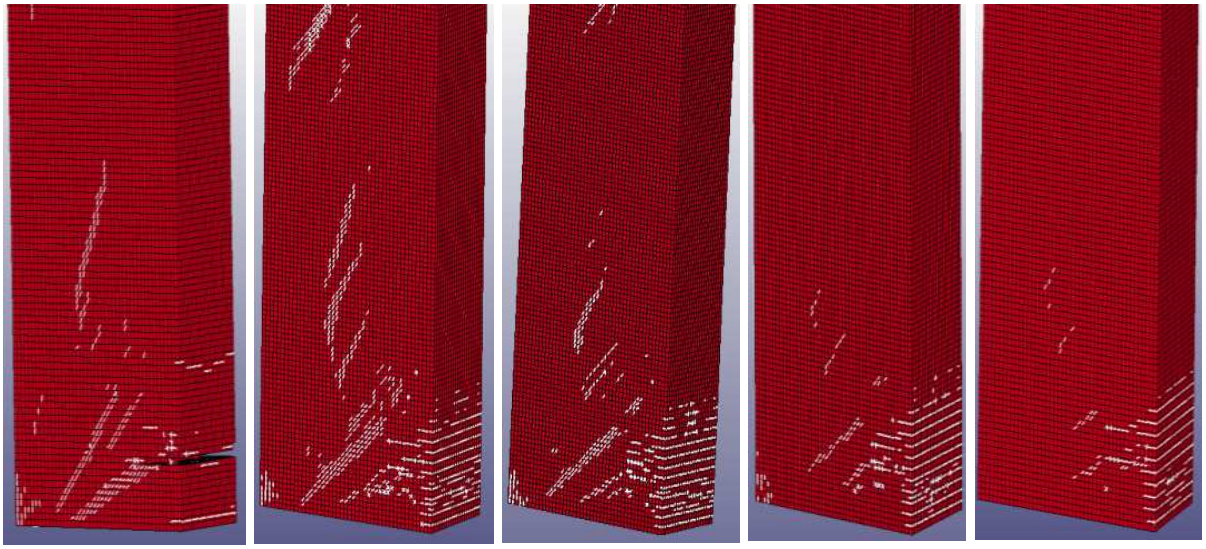
Quá trình mô phỏng trên LS-DYNA cho kết quả trực quan cả về sự thay đổi các tham số động học trên kết cấu cũng như mô tả được quá trình cột BTCT bị nứt, hình thái vết nứt giữa các trường hợp để so sánh.

4.2.4.1. So sánh phá hoại của tác động nổ lên kết cấu



Thường CFRP 0,25mm CFRP 0,5mm CFRP 0,75mm CFRP 1,0mm

Hình 9. Hình thành vết nứt và phá hoại tại giữa cột BTCT (chấn tâm vụ nổ)



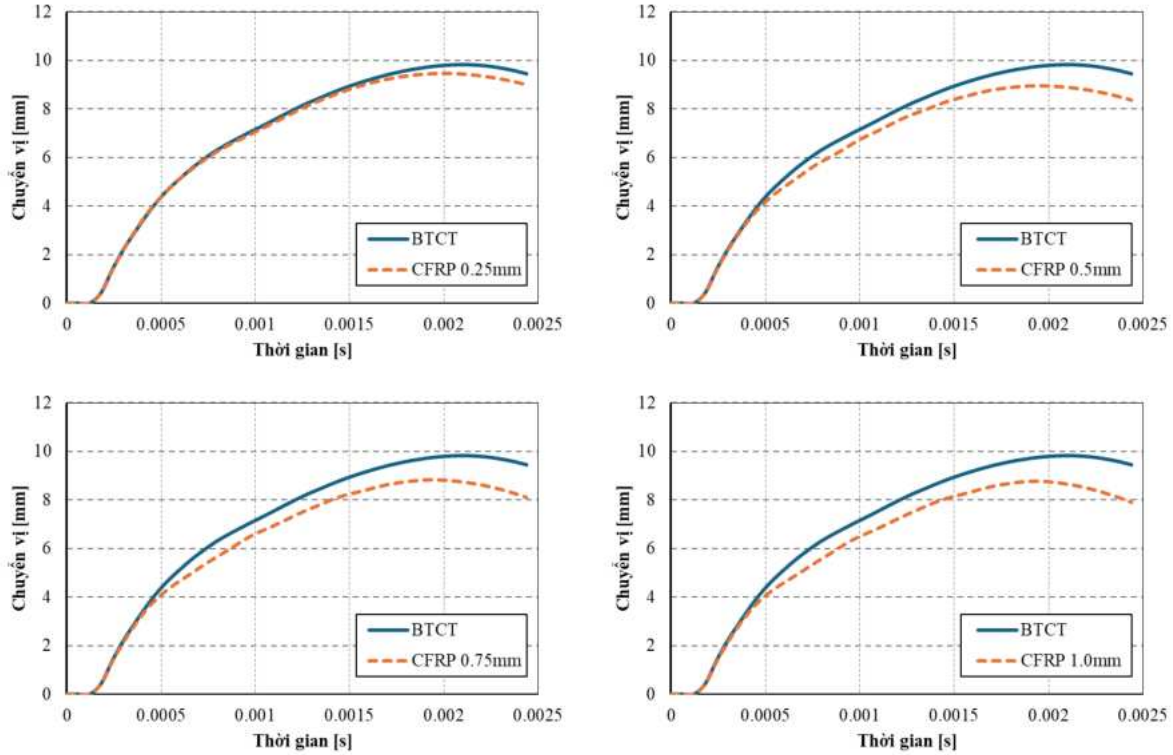
Thường CFRP 0,25mm CFRP 0,5mm CFRP 0,75mm CFRP 1,0mm

Hình 10. Hình thành vết nứt và phá hoại tại chân cột BTCT

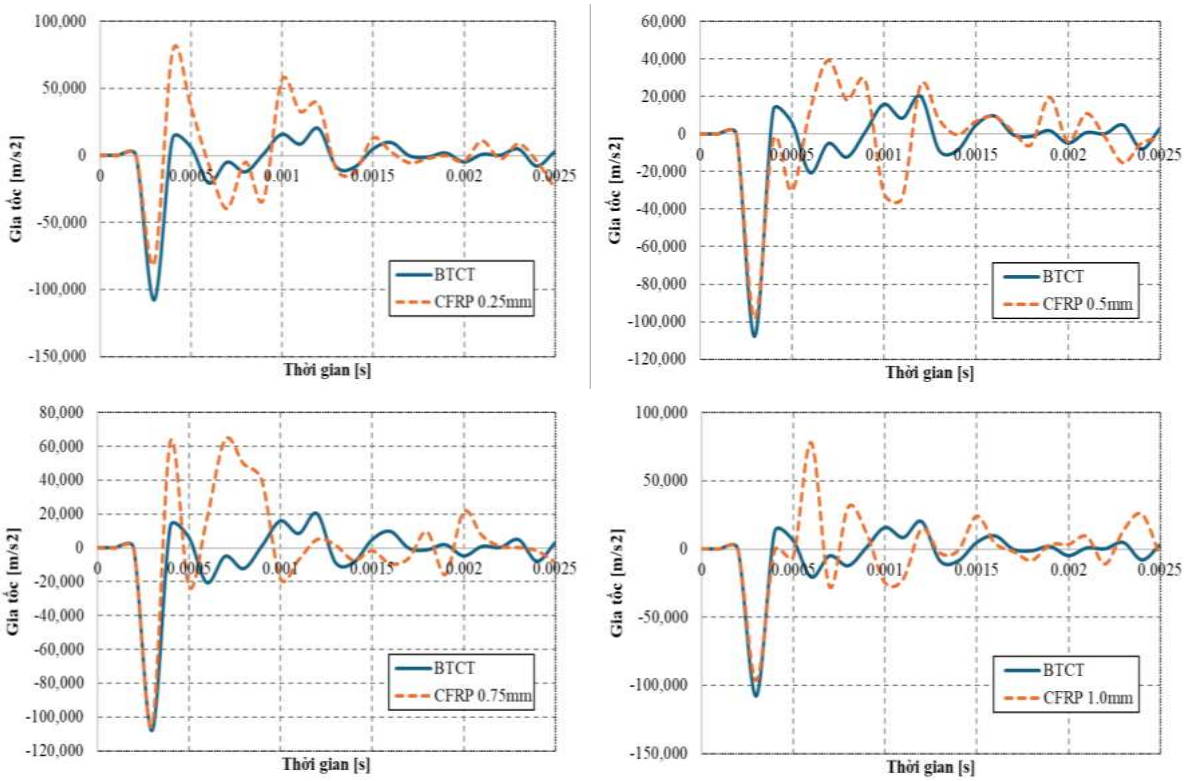
Từ kết quả khảo sát tại sự phá hoại của tác động nổ lên kết cấu cho thấy khi kết cấu được bọc gia cường bằng tấm vải sợi CFRP cho hiệu quả rõ rệt trong việc hạn chế sự hình thành vết nứt cũng như kết cấu bị phá hoại. Tại vị trí giữa cột (chấn tâm vụ nổ) khi kết cấu được gia cường 2 lớp CFRP trở lên thì kết cấu thân cột không còn bị phá hoại, sự hình thành vết nứt giảm dần khi lớp dán được tăng lên. Đối với vị trí chân cột thì khi có lớp dán gia cường chân cột đã không bị phá hoại và sự hình thành vết nứt cũng giảm dần khi lớp dán được tăng lên.

4.2.4.2. So sánh các tham số động học trên kết cấu

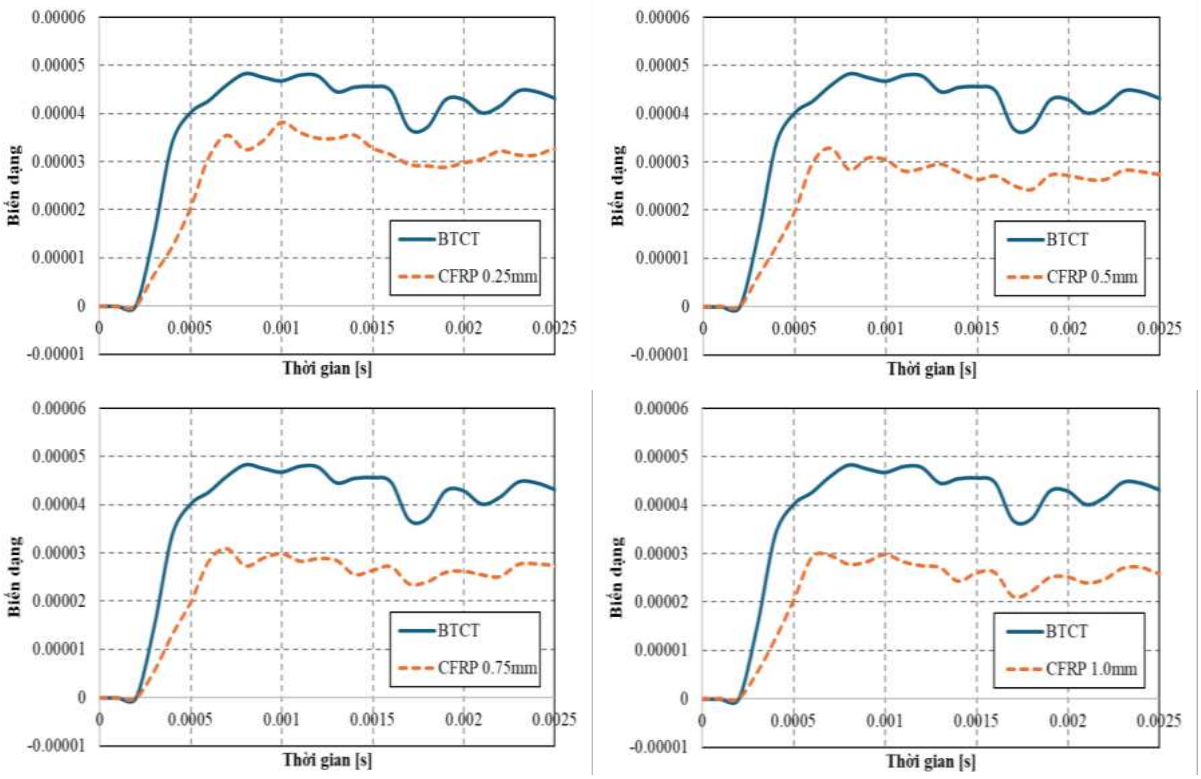
Để đánh giá hiệu quả của lớp gia cường về mặt định tính, tiến hành so sánh các tham số động học như chuyển vị, gia tốc và biến dạng tại vị trí giữa thân cột.



Hình 11. Chuyển vị tại giữa cột BTCT



Hình 12. Gia tốc tại giữa cột BTCT



Hình 13. Biến dạng tại giữa cột BTCT

Bảng 4. Bảng so sánh kết quả mô phỏng

STT	Tham số	Đơn vị	Kết cấu	Giá trị	Chênh lệch (%)
1	Chuyển vị	mm	Thường	9,81	-
			CFRP 0,25mm	9,46	3,60
			CFRP 0,5mm	8,96	8,70
			CFRP 0,75mm	8,83	9,94
			CFRP 1,0mm	8,77	10,63
2	Gia tốc	m/s2	Thường	10,8e4	-
			CFRP 0,25mm	8,04e4	25,56
			CFRP 0,5mm	9,84e4	8,89
			CFRP 0,75mm	10,5e4	2,78
			CFRP 1,0mm	9,62e4	10,93
3	Biến dạng		Thường	4,83e-5	-
			CFRP 0,25mm	3,82e-5	20,90
			CFRP 0,5mm	3,29e-5	31,88
			CFRP 0,75mm	3,08e-5	36,21
			CFRP 1,0mm	2,97e-5	38,43

Từ số liệu các tham số động học khảo sát (chuyển vị, gia tốc và biến dạng) tại vị trí giữa cột BTCT cho thấy khi áp dụng giải pháp gia cường tấm dán dạng vải sợi FRP cho hiệu quả chống tác động của vụ nổ là khả quan, có thể làm giảm nội lực của kết cấu lên đến gần 40%.

Kết quả chuyển vị khảo sát cho thấy khi cột được gia cường vải sợi CFRP làm giảm chuyển vị khi lớp dán tăng lên do độ cứng của cột gia tăng, tuy nhiên độ giảm chuyển vị chưa thực sự rõ rệt do tải trọng của vụ nổ tương đối lớn và lớp dán chỉ có tổng chiều dày 1,0mm.

Bên cạnh đó kết của gia tốc tại điểm giữa cột là một vấn đề cần quan tâm, mặc dù ở giai đoạn đầu gia tốc các cột được gia cường có xu thế giảm so với cột không gia cường nhưng ở giai đoạn sau lại có xu thế tăng cao hơn. Điều này có thể được lý giải do bởi nguyên nhân là khi gia cường tấm vải sợi CFRP sẽ làm tăng khối lượng cột, tăng độ cứng cột, hiện tượng phản xạ sóng ứng suất tại bề mặt tiếp xúc,… làm gia tăng gia tốc ở giai đoạn sau.

5. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu về khả năng của vật liệu FRP gia cường cho kết cấu bê tông cốt thép và mô phỏng trên mô hình số, rút ra một số kết luận về tính khả thi của giải pháp gia cường, cụ thể như sau:

Từ kết quả mô phỏng về khả năng bị phá hoại khi so sánh giữa kết cấu cột BTCT thường và kết cấu cột có gia cố khi chịu tác dụng của vụ nổ cho thấy giải pháp gia cường làm giảm khả năng kết cấu bị phá hoại cục bộ, giảm sự hình thành vết nứt khi tăng số lớp gia cường FRP.

Khảo sát kết quả mô phỏng số thông qua các tham số động học của kết cấu cũng cho thấy giải pháp gia cường tấm dán FRP cho kết cấu cột BTCT khi chịu tác động từ vụ nổ là khả quan, làm giảm chuyển vị lên đến 10,63%, giảm biến dạng đến 38,43%.

Kết quả khảo sát tham số về gia tốc tại giữa cột BTCT cho thấy trong giai đoạn đầu tiên (pha nén của áp lực nổ) có xu thế giảm nhẹ, tuy nhiên trong giai đoạn sau gia tốc trên các cột BTCT có gia cường có xu thế tăng cao điều này cũng phù hợp với với quy luật ứng xử của kết cấu, bởi khi kết cấu được gia cường sẽ được tăng cứng, tăng trọng lượng và các nguyên nhân khác như hiện tượng phản xạ sóng ứng suất tại bề mặt tiếp xúc.

Với các kết quả nghiên cứu và khảo sát thông qua thử nghiệm trên mô hình số, cho thấy giải pháp gia cường kết cấu BTCT bằng vật liệu FRP dạng vải sợi theo phương pháp bọc dán không chỉ phù hợp cho kết cấu chịu tĩnh tải hay tải trọng động thông thường mà còn phù hợp với cả kết cấu chịu tác động cực hạn từ vụ nổ.

Kết quả nghiên cứu của bài báo có đóng góp một phần nhỏ cho tham khảo của các nghiên cứu tiếp sau.

References

[1]. Nguyễn Trí Tá, Vũ Đình Lợi, Đặng Văn Đích (2008). *Giáo trình công sự - tập I*. Học viện Kỹ thuật quân sự.

[2]. Nguyễn Thị Thanh, Nguyễn Quang Tùng (2020). *Nghiên cứu hiệu quả gia cường cột trong công trình cao tầng bê tông cốt thép bằng tấm CFRP*. Tạp chí Xây dựng, 11.2019, 52-57.

[3]. Trần Thanh Hải, Nguyễn Văn Hùng (2022). *Ứng xử sàn bê tông cốt thép gia cường bằng vật liệu dán bề mặt FRP*. Tạp chí Xây dựng, 65(3), 45-52.

[4]. Wang, I.T (2014). *Numerical and experimental verification of finite element mesh convergence under explosion loading*. J. Vibroeng, 16, 1786–1798.

[5]. Vũ Đình Lợi, Nguyễn Trí Tá (2004). *Giáo trình công sự tập 3*. Học viện kỹ thuật quân sự.

[6]. A. Bentur, S. Mindess (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. Crc Press.

[7]. A.M. Brandt (2008). *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*. Composite structures. 86, 3-9.

[8]. Vũ Đình Lợi (2019). *Nghiên cứu ứng dụng vật liệu mới trong xây dựng công trình quốc phòng và nâng cấp kháng lực công trình quốc phòng đã có trên quần đảo Trường Sa*. Đề tài độc lập cấp quốc gia.

[9]. L.C. Muszynski, M.R. Purcell (2003). *Composite reinforcement to strengthen existing concrete structures against air blast*. Journal of Composites for Construction. 7, 93-97.

[10]. A.G. Razaqpur, A. Tolba, E. Contestabile (2007). *Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates*. Composites Part B: Engineering. 38, 535-546.

[11]. Nguyễn Trung Hiếu, Lý Trần Cường (2020). *Giáo trình gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi COMPOSITE*. Nhà xuất bản xây dựng.

[12]. https://jvtek.com.vn/san-pham-dich-vu/cong-nghe-gia-cuong-ket-cau-be-tong-frp.

[13]. D.-K. Thai, S.-E. Kim (2018). *Numerical investigation of the damage of RC members subjected to blast loading*. Engineering Failure Analysis. 92, 350-367

[14]. Nguyễn Công Nghị, Lê Anh Tuấn, Đinh Quang Trung (2021). *Nghiên cứu mô hình vật liệu trong LS-DYNA của xốp cứng không phục hồi chịu tải trọng nổ thông qua dữ liệu thực nghiệm*. Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học Cán bộ trẻ lần thứ XVI - Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST), ISBN: 978-604-82-6534-2, 11/2021.

[15]. Aleksandr Cherniaev, John Montesano, Clifford Butcher (2018). *Modeling the Axial Crush Response of CFRP Tubes using MAT054, MAT058 and MAT262 in LS-DYNA®*. 15th International LS-DYNA® Users Conference.

Research on fiber fabric FRP sheet reinforcement solutions for reinforced concrete structures subjected to blast pressure through numerical simulation

Abstract: *The article presents a study on the applicability of FRP materials in reinforcing structural systems in general, and reinforced concrete structures in particular. It also explores the application of FRP sheet reinforcements in the form of fiber fabrics to strengthen reinforced concrete structures subjected to explosive loads. Through numerical experiments conducted using LS-DYNA software, the results are promising, showing that the reinforcement solution significantly reduces internal forces in the structure and mitigates structural damage under explosive pressures. The study's findings provide a modest contribution to clarifying the effectiveness and potential application of FRP reinforcement solutions for structures subjected to explosive pressure loads.*

Keywords: FRP, numerical modeling, LS-DYNA, explosion, reinforced concrete.

❑

Nghiên cứu phân tích tác dụng phá huỷ đất đá của hai lượng nổ đặt cạnh nhau

Lê Hồng Hải

Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: lehaict43@gmail.com; Tel: 0975702389

Tóm tắt

Trên cơ sở nghiên cứu kế thừa phương pháp thiết lập trường tốc độ các hạt đất đá xung quanh lượng nổ đơn của lý thuyết thủy động lực học nổ, bài báo đã tiến hành thiết lập, phân tích trường tốc độ và các điều kiện phá hủy của các hạt đất đá khi nổ hai lượng nổ tập trung gần nhau trong môi trường đất đá bán vô hạn. Kết hợp nổ thực nghiệm phù hợp với các lập luận về sự tương tác phá hủy đất đá giữa hai lượng nổ phụ thuộc vào khoảng cách giữa hai lượng nổ, độ bền môi trường đất đá. Cuối cùng bài báo đề xuất một số biện pháp nâng cao hiệu quả công tác nổ.

Từ khóa: *Nổ phá; Lượng nổ; Tác dụng nổ; Khoảng cách giữa các lượng nổ.*

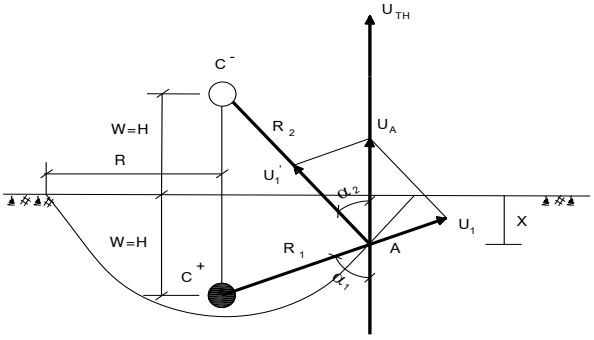
1. Đặt vấn đề

Trong quá trình nổ phá đất đá bằng năng lương nổ trong đào nền công trình có một mặt thoáng là một mặt phẳng thì việc bố trí khoảng cách giữa các lượng nổ rất có ý nghĩa quan trọng đảm bảo kích thước hố đào theo đúng thiết kế phá. Hiện nay chưa có công trình nghiên cứu lý thuyết về tương tác giữa hai lượng nổ tập trung trong môi trường đất đá để làm cơ sở cho việc điều khiển nổ và đảm bảo không để lại mô chân tầng [1-8]. Vì vậy việc nghiên cứu tác dụng phá huỷ đất đá của hai lượng nổ đặt cạnh nhau làm cơ sở để đưa ra giải pháp điều khiển thông số hộ chiếu nổ nhằm đảm bảo hố đào theo thiết kế là một nhiệm vụ có tính cấp thiết, có ý nghĩa thực tế.

2. Phân tích cơ sở lý thuyết

2.1. Tác dụng phá huỷ đất đá của lượng nổ đơn khi đặt gần mặt thoáng tự do

Theo lý thuyết thuỷ động lực học, khi nổ lượng nổ tập trung trong môi trường bán vô tận thì tác dụng nổ tại mỗi điểm trong đó được xem như tác dụng của lượng nổ thực (C^+) và lượng nổ ảo (C^-) nằm đối xứng với lượng nổ thực qua mặt thoáng. Lượng nổ thực có đặc tính đẩy các phần tử đất đá ra xe tâm nổ, lượng nổ ảo có tác dụng ngược lại, hút các phần tử đất đá về phía tâm nổ. Vì vậy mỗi phần tử môi trường nhận được hai véc tơ tốc độ. Tổng hợp hai véc tơ tốc độ này là một véc tơ tổng, nếu có trị số vượt quá tốc độ tới hạn thì môi trường bị phá huỷ tại điểm đó [1, 2, 4 và 6]. (xem hình 1)



Hình 1. Sơ đồ tương tác của lượng nổ thực và ảo trong môi trường bán vô tận

Ta xét điểm A bất kỳ nằm trên biên phễu nổ có chiều sâu x so với mặt thoáng.

Tại A thành phần tốc độ do lượng nổ thực (C^+) gây ra là:

$$u_1 = u_0(\frac{r_0}{R_1})^2 \quad (1)$$

Thành phần tốc độ do lượng nổ ảo (C^-) gây ra là:

$$u_1^{'} = u_0(\frac{r_0}{R_2})^2 \quad (2)$$

Thành phần tốc độ tổng hợp do lượng nổ thực (C^+) và lượng nổ ảo (C^-) gây ra là

$$|\overrightarrow{u_A}| = |\overrightarrow{u_1}| + |\overrightarrow{u_1^{'}}| \quad (3)$$

$$=> \ u_A = u_0.(\frac{r_0}{R_1})^2 \cos\alpha_1 + u_0.(\frac{r_0}{R_2})^2 \cos\alpha_2$$

$$=> \ u_A = u_0.r_0^2.[\frac{w-x}{R_1^3} + \frac{w+x}{R_2^3}]$$

$$=> \ u_A = u_0.r_0^2.[\frac{w-x}{[(\frac{a}{2})^2+(w-x)^2]^{3/2}} + \frac{w+x}{[(\frac{a}{2})^2+(w+x)^2]^{3/2}}] \quad (4)$$

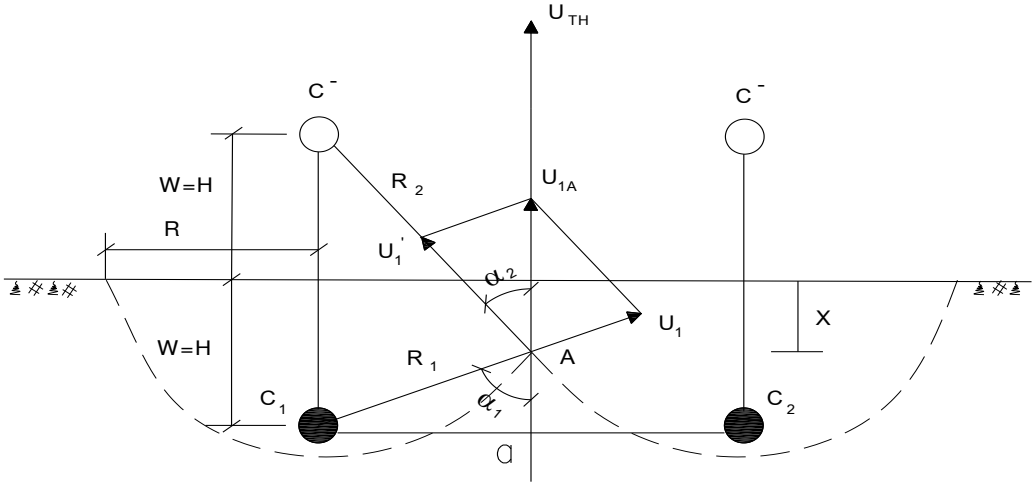
Phần tử môi trường đất ở điểm A bị phá hoại khi tốc độ tổng hợp tác dụng lên nó bằng tốc độ tới hạn.

$$u_A = u_{th} \quad (5)$$

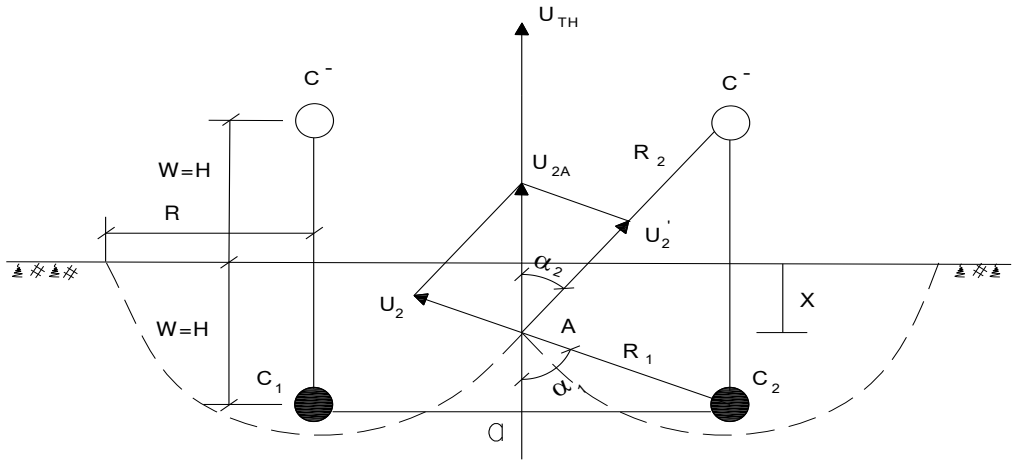
2.2. Thiết lập và phân tích mô hình tác dụng nổ của hai lượng nổ tập trung đặt gần nhau

Đối với lượng nổ đặt gần nhau ta có thể sử dụng mô hình cặp lượng nổ. Giả thiết cho nổ hai lượng thuốc nổ hình hộp chữ nhật C_1 và C_2 trong môi trường đất đá bán vô tận, lượng thuốc đặt gần mặt thoáng để tạo thành phễu nổ văng. Theo lý thuyết thuỷ động lực học, các phần tử môi trường sẽ chịu tác động của hai thành phần vận tốc từ lượng nổ ở C_1 và C_2. Giả sửa có hai lượng nổ (C^-) là lượng nổ ảo của C_1 và C_2 đối xứng qua mặt phân cách.

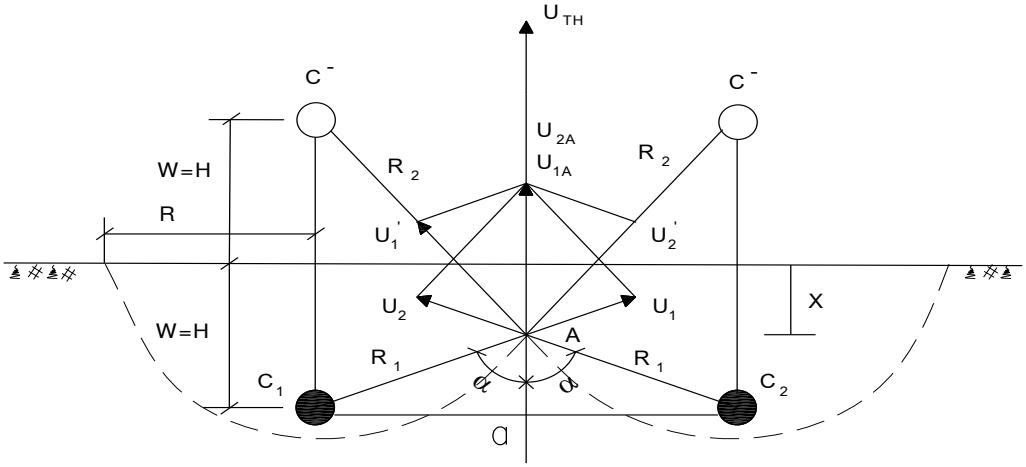
Ta xét điểm A trên mặt phẳng giữa 2 lượng nổ có độ sâu x so với mặt đất, điểm A bị phá hoại khi tốc độ tổng hợp tác dụng lên nó bằng tốc độ tới hạn.



a)



b)



c)

Hình 2. Sơ đồ tương tác của hai lượng nổ đặt gần nhau trong môi trường bán vô tận

Nét - - - đường bao phễu nổ văng ứng với các khoảng cách giữa hai lượng nổ a khác nhau

a) Véc tơ tốc độ của lượng nổ thật C_1 và lượng nổ ảo (C^-)

b) Véc tơ tốc độ của lượng nổ thật C_2 và lượng nổ ảo (C^-)

c) Véc tơ tốc độ tổng hợp của lượng nổ thật C_1 và C_2 và lượng nổ ảo (C^-)

Thành phần tốc độ tổng hợp do lượng nổ thực C_1 và lượng nổ ảo (C^-) gây ra theo công thức (3) và (4) là:

$$\left|\overrightarrow{u_{1A}}\right| = \left|\overrightarrow{u_1}\right| + \left|\overrightarrow{u_1'}\right|$$

$$\Rightarrow \quad u_{1A} = u_0 . r_0^2 . \left[\frac{w-x}{[(\frac{a}{2})^2+(w-x)^2]^{3/2}} + \frac{w+x}{[(\frac{a}{2})^2+(w+x)^2]^{3/2}}\right]$$

Thành phần tốc độ tổng hợp do lượng nổ thực C_2 và lượng nổ ảo (C^-) gây ra theo công thức (3) và (4) là:

$$\left|\overrightarrow{u_{2A}}\right| = \left|\overrightarrow{u_2}\right| + \left|\overrightarrow{u_2'}\right|$$

$$\Rightarrow \quad u_{2A} = u_0 . r_0^2 . \left[\frac{w-x}{[(\frac{a}{2})^2+(w-x)^2]^{3/2}} + \frac{w+x}{[(\frac{a}{2})^2+(w+x)^2]^{3/2}}\right]$$

Thành phần tốc độ tổng hợp do lượng nổ thực C_1 và C_2 và lượng nổ ảo (C^-) gây ra là:

$$u_A = u_{1A} + u_{2A} = 2.u_0.r_0^2.[\frac{w-x}{[(\frac{a}{2})^2+(w-x)^2]^{3/2}} + \frac{w+x}{[(\frac{a}{2})^2+(w+x)^2]^{3/2}}]$$

Phần tử môi trường đất ở điểm A bị phá hoại khi tốc độ tổng hợp tác dụng lên nó bằng tốc độ tới hạn.

$$u_A = u_{t□}$$

2.3. Thiết lập biểu đồ sự phụ thuộc u_A vào chiều sâu x ở giữa biên của hai lượng nổ và khoảng cách giữa hai lượng nổ a

2.3.1. Khi thay đổi chiều sâu x và cố định khoảng cách giữa hai lượng nổ a

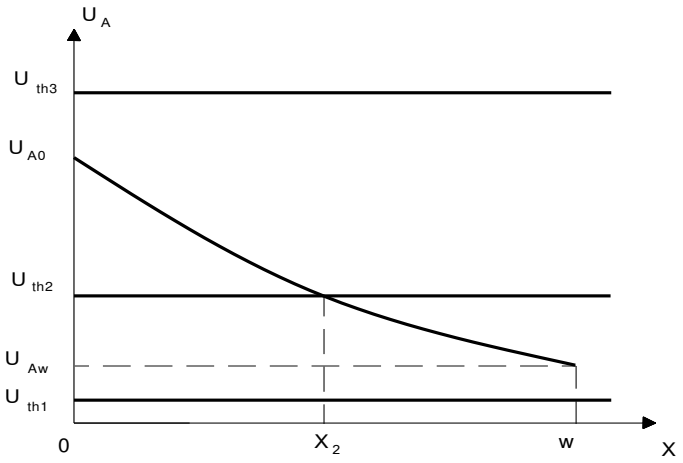
- Khi x = 0, tốc độ tổng hợp tại A tương ứng trên bề mặt tự do:

$$u_{A0} = 4.u_0.r_0^2.[\frac{w}{[(\frac{a}{2})^2+(w)^2]^{3/2}}]$$

- Khi x = w, tốc độ tổng hợp tại A tương ứng chiều sâu yêu cầu cần phá huỷ

$$u_{Aw} = 4.u_0.r_0^2.[\frac{w}{[(\frac{a}{2})^2+(2w)^2]^{3/2}}]$$

Dựa vào kết quả tính toán trên ta thấy x tăng dần thì tốc độ tổng hợp tại A (u_A) giảm dần và ngược lại x giảm dần thì u_A tăng dần, ta có biểu đồ sự phụ thuộc u_A vào x được phản ánh trên hình 3.



Hình 3. Biểu đồ sự phụ thuộc u_A vào chiều sâu x ở giữa biên của hai lượng nổ khi a=const

- Nhận xét: Trên hình 3 các đường thẳng nằm ngang có trị số bằng U_{th1}, U_{th2}, U_{th3} tương ứng đặc trưng cho ba trường hợp độ bền phá hủy tới hạn của đất đá 1, 2, 3. Điều kiện phá hủy là trị số tốc độ dịch chuyển của hạt đất tại điểm khảo sát phải lớn hơn hoặc bằng trị số tốc độ tới hạn tương ứng của đất đá đó. Như vậy phần tử đất đá tại điểm A sẽ xảy ra bốn trường hợp sau:

Trường hợp 1 khi $u_{A0} < u_{t□3}$ thì một phần môi trường ở giữa hai lượng nổ bao bọc điểm A từ mặt đất xuống dưới không bị phá huỷ. Trường hợp này tương ứng khi hai lượng nổ đặt cách nhau ở khoảng cách a rất lớn hoặc khoảng cách a không lớn nhưng đá rất bền;

Trường hợp 2 khi $u_{Aw} < u_{th2} < u_{A0}$ thì phần môi trường ở giữa hai lượng nổ bao bọc điểm A từ mặt đất xuống đến độ sâu x bị phá huỷ. Trường hợp này tương ứng khi hai lượng nổ đặt cách nhau ở khoảng cách a không lớn và sau nổ vẫn để lại mô chân tầng có độ dày bằng w-x;

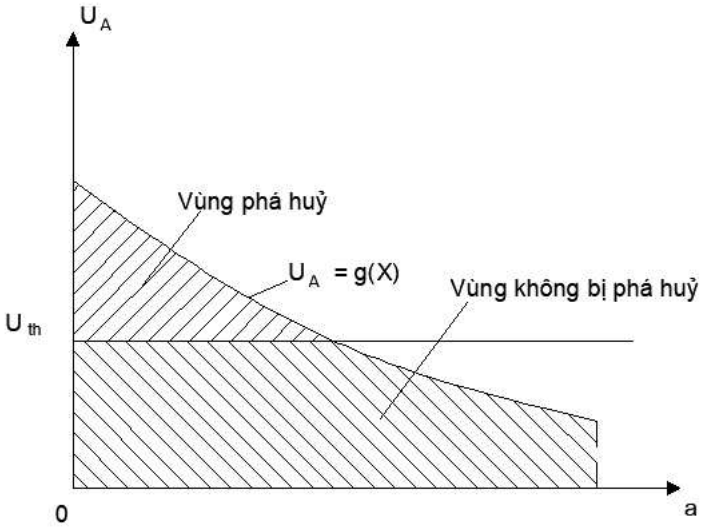
Trường hợp 3 khi $u_{t□1} < u_{Aw}$ thì phần môi trường ở giữa hai lượng nổ bao bọc điểm A từ mặt đất xuống đến độ sâu x lớn hơn w bị phá huỷ. Trường hợp này tương ứng khi hai lượng nổ đặt cách nhau ở khoảng cách a nhỏ và sau nổ không lại mô chân tầng, nhưng có độ dày phá dư bằng x-w;

Trường hợp 4 khi $u_{t□1} = u_{Aw}$ thì phần môi trường ở giữa hai lượng nổ bao bọc điểm A từ mặt đất xuống đến độ sâu bằng w bị phá huỷ. Trường hợp này tương ứng khi hai lượng nổ đặt cách nhau ở khoảng cách a tối ưu và sau nổ không lại mô chân tầng, đạt đúng độ sâu thiết kế. Trường hợp này chỉ là trường hợp đặc biệt của trường hopk 3.

Như vậy chiều sâu tối ưu phải thoả mãn điều kiện không để lại mô chân tầng, không phá quá sâu là: $u_{Aw} \leq u_{t□}$.

2.3.2.Khi thay đổi khoảng cách giữa hai lượng nổ a và cố định chiều sâu x

Từ kết quả trên cho phép thiết lập biểu đồ sự phụ thuộc u_A vào khoảng cách giữa hai lượng nổ a khi cố định chiều sâu x được chỉ ra trong hình 4.



Hình 4. Biểu đồ sự phụ thuộc u_A vào khoảng cách giữa hai lượng nổ khi x=const

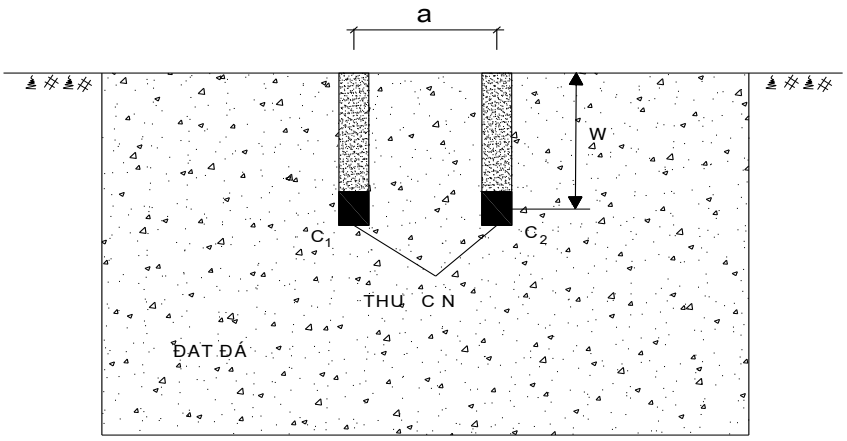
Phân tích biểu đồ hình 4 ta thấy thành phần tốc độ tổng hợp u_A phụ thuộc vào khoảng cách a giữa 2 lượng nổ, giá trị a tăng dần thì u_A giảm dần, tác dụng phá hoại ở điểm A giảm dần, ngược lại a giảm dần thì u_A tăng dần, tác dụng phá hoại ở điểm A cũng tăng dần.

Để làm sáng tỏ mô hình trên cần tiến hành thực nghiệm kiểm chứng.

3. Thí nghiệm kiểm chứng

3.1. Xây dựng bài thí nghiệm

- Bố trí hai lượng nổ có khối lượng giống nhau $C_1 = C_2 = 0{,}4$ kg
- Chiều sâu chôn thuốc nổ W=0,6 m
- Khoảng cách a thay đổi: $a_1 = 0{,}4$ m $a_2 = 0{,}6$ m ; $a_3 = 0{,}8$ m



Hình 5. Sơ đồ bố trí hai lượng nổ



Hình 6. Đào hố chôn thuốc nổ

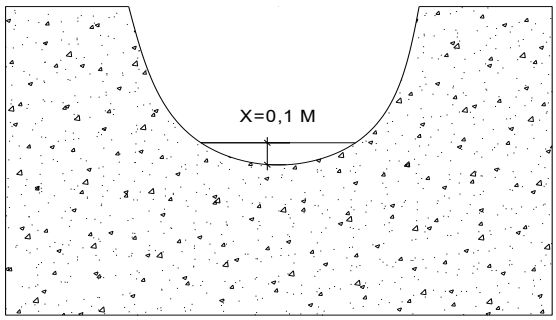


Hình 7. Đấu buộc lượng nổ 0,4 kg xuống hố đào

3.1.1. Trường hợp 1: Khoảng cách giữa hai lượng nổ $a_1 = 0{,}4$ m



Hình 8. Kích thước hố đào sau khi gây nổ a=0,4 m

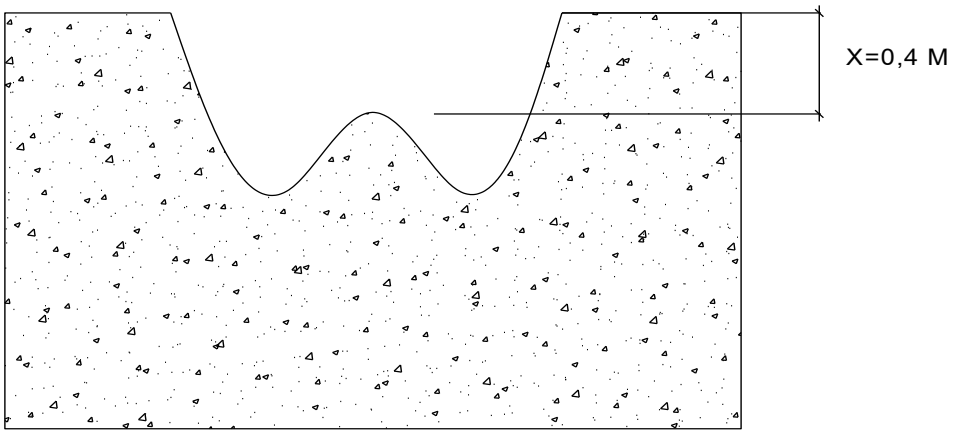


Hình 9. Hình ảnh phễu nổ a=0,4 m

3.1.2. Trường hợp 2: Khoảng cách giữa hai lượng nổ $a_1 = 0{,}6$ m



Hình 10. Kích thước hố đào sau khi gây nổ a=0,6 m

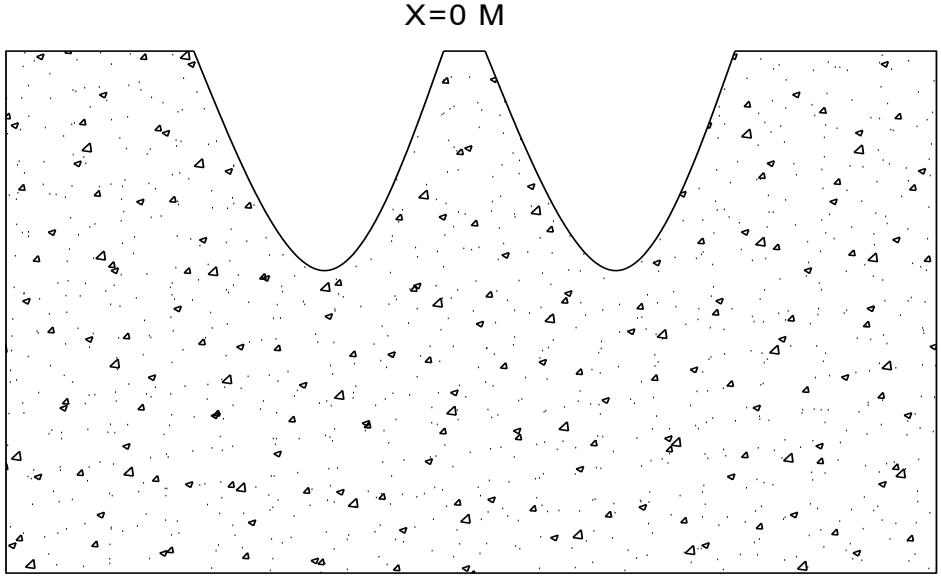


Hình 11. Hình ảnh phễu nổ a=0,6 m

3.1.3. Trường hợp 3: Khoảng cách giữa hai lượng nổ $a_2 = 0{,}8$ m



Hình 12. Kích thước hố đào sau khi gây nổ a=0,8 m



Hình 13. Kích thước hố đào sau khi gây nổ a=0,8 m

3.2. Kết quả

Bảng 1. Bảng tổng hợp kết quả

TT	Khối lượng thuốc nổ C (kg)	Chiều sâu chôn thuốc nổ W (m)	Khoảng cách giữa 2 lượng nổ a (m)	Chiều dày phá huỷ từ bề mặt tự do x (m)	Ghi chú
1	0,4	0,6	0,4	0,7	Phá sâu hơn chiều sâu chôn thuốc nổ 0,1m
2	0,4	0,6	0,6	0,4	Hình thành mô chân tầng dày 0,2 (m)
3	0,4	0,6	0,8	0	Hình thành mô chân tầng dày 0,6 m, không phá được biên giữa 2 lượng nổ

Nhận xét: Khoảng cách tối ưu giữa 2 lượng nổ để không hình thành mô chân tầng là $0{,}4 \leq a_{tu} \leq 0{,}6$ (m)

4. Đề xuất một số biện pháp điều khiển hộ chiếu nổ mìn để nâng cao hiệu suất nổ

Khi chôn thuốc nổ ở độ sâu $W = W_{th}$ (chiều sâu tới hạn) ta điều chỉnh khoảng cách giữa các lượng nổ để kết quả nổ theo thiết kế ban đầu. Nếu:

- Chiều sâu mô chân tầng là $\Delta > 0$ ta giảm khoảng cách a giữa các lượng nổ.
- Chiều sâu mô chân tầng là $\Delta < 0$ ta tăng khoảng cách a giữa các lượng nổ.
- Ta điều chỉnh khoảng cách a giữa các lượng nổ để chiều sâu mô chân tầng là $\Delta = 0$, khi đó khoảng cách $a = a_{tu}$ (khoảng cách tối ưu).

5. Kết luận và kiến nghị

5.1. Kết luận

- Hình dạng, kích thước của phễu nổ phụ thuộc vào khối lượng, chiều sâu chôn thuốc nổ và khoảng cách đặt lượng nổ.
- Khoảng cách giữa các lượng nổ đặt gần thì rãnh nổ thông suốt, lượng nổ đặt xa thì rãnh nổ không thông suốt, có mô chân tầng.
- Lượng nổ đặt càng gần nhau thì năng lượng nổ tập trung càng lớn, lượng nổ đặt càng xa thì năng lượng nổ bị phân tán.

5.2. Kiến nghị

- Thí nghiệm nổ ở nhiều loại đất đá khác nhau, ở nhiều khoảng cách đặt lượng nổ khác nhau để tìm được khoảng cách tối ưu nhất.
- Nổ nhỏ nhiều lần trước khi nổ lớn để tăng độ chính xác sau mỗi lần nổ.

Tài liệu tham khảo

1. Hồ Sĩ Giao; Đàm Trọng Thắng; Lê Văn Quyển; Hoàng Tuấn Chung. Nổ hóa học-lý thuyết và thực tiễn. NXB khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2010.
2. Nguyễn Văn Tính, Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Hoài Nam. Công tác nổ mìn. NXB Quân đội Nhân dân, Hà Nội, 2012.

3. Đàm Trọng Thắng; PGS.TS. Bùi Xuân Nam; TS.Trần Quang Hiếu. Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình. NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ, Hà Nội, 2015, (153, 156, 157, 159, 160).
4. Nguyễn Quang Trung, Lê Hồng Đức, Võ Thanh Tùng. Công tác nổ, tập 1. Học viện Kỹ thuật quân sự - Năm 1998.
5. Nguyễn Quang Trung, Võ Thanh Tùng, Giáo trình công tác nổ tập 2, Học viện KTQS; 2005.
6. Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Hữu Hà, Phan Thành Trung, Lý thuyết cơ bản về nổ, Học viện KTQS; 2022.
7. Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Hữu Hà, Phan Thành Trung, Lê Hồng Hải, Nổ trong xây dựng công trình, Học viện KTQS; 2023.
8. Руководство для инженерных воиск – подрывные работы. Военно издательство министерства обороны союза СССР, Москва 1961.
9. Josef Henrych – The dynamic of explosion and its use. Academia Prague, 1979.

Research analysis of the destructive effect of two explosive charges placed side by side

Summary: *Based on the research on the method of establishing the velocity field of rock particles around a single explosive charge of the theory of hydrodynamics of explosion, the paper has established and analyzed the velocity field and the destruction conditions of rock particles when exploding two explosive charges concentrated close together in a semi-infinite rock environment. Combining experimental explosions is consistent with the arguments about the destructive interaction of rock between two explosive charges depending on the distance between the two explosive charges and the durability of the rock environment. Finally, the paper proposes some measures to improve the efficiency of blasting.*

Keywords: Blasting; Explosive charge; Explosive effect; Distance between explosive charges.

Nghiên cứu thực nghiệm sự suy giảm cường độ sóng ứng suất khi nổ trong môi trường bê tông san hô

Ngô Thế Đức[1], Vũ Tùng Lâm[1], Nguyễn Hữu Hà[1]

[1)] Viện Kĩ thuật Công trình Đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: ducnt1988@lqdtu.edu.vn; Tel: 0948 743 611

Tóm tắt: Vật liệu bê tông san hô gần đây được nghiên cứu để có thể đưa vào áp dụng trong các công trình, đặc biệt là các công trình biển đảo. Các tính chất cơ lý của vật liệu bê tông san hô được nhiều tác giả tập trung nghiên cứu. Tuy nhiên, đặc tính của vật liệu bê tông san hô khi chịu tác dụng nổ nói chung và khi lan truyền sóng ứng suất do nổ nói riêng vẫn chưa có nhiều nghiên cứu. Bằng phương pháp nghiên cứu thực nghiệm trên mẫu bê tông san hô với thiết bị đo, nhóm tác giả đã tiến hành đo cường độ sóng ứng suất do lượng nổ tập trung gây ra khi lan truyền trong vật liệu bê tông san hô. Sử dụng đầu đo áp lực nước trong lỗ khoan có chứa nước trên đường truyền của sóng ứng suất. Dựa trên kết quả đo ở các cự ly khác nhau, nhóm tác giả đã tiến hành xử lý và thu được hệ số suy giảm cường độ sóng ứng suất do nổ khi lan truyền trong vật liệu bê tông san hô có giá trị bằng 1,272. Đây là tham số quan trọng để xác định quy luật lan truyền của sóng ứng suất trong vật liệu bê tông san hô.

Từ khoá: *Sóng ứng suất nổ, hệ số suy giảm sóng ứng suất, đo đạc sóng ứng suất nổ, bê tông san hô*

1. Đặt vấn đề

Khi kích nổ lượng thuốc, dưới áp lực cực lớn của sản phẩm nổ tác dụng lên thành lỗ mìn sẽ là cho các phần tử đất đá dịch chuyển. Sự dịch chuyển này sẽ kéo theo các phần tử lân cận tiếp tục dịch chuyển, sự lan truyền các dao động của phần tử đất đá như vậy tạo thành sóng ứng suất. Ngay từ thế kỷ trước việc nghiên cứu tác dụng phá huỷ của sóng ứng suất đối với môi trường đất đá đã được nhiều các nhà khoa học tiến hành nghiên cứu và cho ra đời thuyết phá đá bằng sóng ứng suất. Theo quan điểm phá huỷ do sóng ứng suất có một số tác giả nghiên cứu như Khanukaev, Kumao Hino… Theo quan điểm trên khi cường độ sóng ứng suất vượt quá độ bền tạm thời của vật liệu thì phần tử vật liệu ở đó sẽ bị phá huỷ [1]. Do đó, sóng ứng suất do nổ gây ra là một yếu tố quan trong trong việc phá vỡ đất đá, kết cấu vật liệu khi nổ mìn.

Tuy nhiên, trong quá trình lan truyền trong môi trường đất đá vô tận sóng ứng suất sẽ bị suy giảm cường độ và đến một phạm vi nào đó sẽ không đủ cường độ để phá huỷ đất đá. Sự suy giảm của sóng ứng suất trong quá trình lan truyền phụ thuộc chủ yếu vào tính chất cơ lý của vật liệu. Do đó, việc nghiên cứu quá trình hình thành, lan truyền và suy giảm cường độ sóng ứng suất do nổ trong đất đá hoặc các loại vật liệu là một trong những nghiên cứu quan trọng của lĩnh vực nổ mìn.

Li Yuan Chi (Lý Nguyên Trí) và công sự đã sử dụng đầu đo biến dạng điện trở để tiến hành đo áp lực của sóng đập trong đất đá ở khu vực gần lỗ mìn, dựa trên kết quả thực nghiệm nhóm tác giả đã xây dượng được đường cong suy giảm cường độ sóng ứng suất gần khu vực tâm nổ trên đá granit [2]. Các đặc tính suy giảm khi lan truyền cũng như dạng sóng của sóng ứng suất trong đá cát kết (sandstone) đã được Yun Cheng (Vân Thành) cùng cộng sự thực hiện trên mô hình thanh 1 chiều với hệ thống kiểm tra SHPB cải tiến (modified split Hopkinson pressure bar test system).

Nghiên cứu chỉ ra rằng dưới các ứng suất dọc trục khác nhau thì cũng ảnh hưởng đến đặc tính suy giảm cũng như dạng sóng của sóng ứng suất khi xuất hiện và lan truyền trong thanh [3]. Bằng phương pháp mô phỏng số, PGS TS Đàm trọng Thắng cùng cộng sự đã nghiên cứu mô phỏng quá trình lan truyền của sóng ứng suất khi nổ trong môi trường đá vôi và xác định hệ số suy giảm của cường độ sóng ứng suất khi nổ mìn với lượng nổ dài hữu hạn trong môi trường đá vôi [4].

Vật liệu bê tông san hô là một loại vật liệu mới và nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu trên thế giới. Nghiên cứu ảnh hưởng của các thành phần cấp phối trong bê tông san hô so với các loại vật liệu sử dụng trong bê tông thường đến cường độ chịu nén dọc trục của mẫu lăng trụ được Yijie Huang (Hoàng Ý Kiệt) và cộng sự thực hiện [5]. Bing Liu (Lưu Băng) cùng cộng sự đã thực hiện nghiên cứu thực nghiệm khả năng chống va đập của bê tông san hô cốt sợi các bon với các cấp độ bên bê tông và hàm lượng sợi các bon khác nhau [6]. Một số quốc gia và vùng lãnh thổ cũng đã nghiên cứu để đưa vật liệu bê tông san hô vào ứng dụng trong các công trình từ khá sớm như công trình của Ủy ban Năng lượng Nguyên tử tại Eniwetok và Bikini được xây dưng cuối nhứng năm 40 đầu những năm 50 của thế kỷ trước hay công trình Cảnh báo Sớm Nâng cao (AEW) của Hải quân Hoa Kỳ tại Midway được xây dựng vào giữa những năm 1950 [7].

Ở nước ta, hiện nay các nghiên cứu về bê tông san hô chủ yếu được thực hiện bởi các nhà khoa học của Học viện Kỹ thuật Quân sự. GS,TS Vũ Đình Lợi cùng cộng sự đã nghiên cứu sử một phần cát và đá san hô để thay thế cát và đá thông thường, kết hợp với sử dụng nước biển thay thế nước ngọt cừng một số phụ gia để chế tạo bê tông có cường độ 35MPa [8]. TS Nguyễn Xuân Bàng cùng cộng sự đã tiến hành nghiên cứu chế tạo các cấp phối bê tông để chế tạo các mẫu bê tông san hô có cấp bền nén B15, B20 và B22,5 [9]. Tuy nhiên ở nước ta vật liệu bê tông san hô vẫn chưa được đưa vào ứng dụng nhiều trong các công trình, và kết cấu vì còn ít các nghiên cứu về loại vật liệu này. Đặc biệt là tính chất cơ lý của vật liệu bê tông san hô khi chịu tác dụng của nổ nói chung và sự lan truyền sóng ứng suất do nổ trong bê tông san hô nói riêng. Chính vì vậy, việc nghiên cứu sự lan truyền và suy giảm sóng ứng suất do nổ trong bê tông san hô có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao

2. Cơ sở lý thuyết

Khi kích nổ lượng thuốc, các phản ứng hoá học xảy ra sẽ chuyển đổi thuốc nổ thành sản phẩm nổ dạng khí với nhiệt độ cao và áp lực cực lớn, tác động lên thành buồng mìn.

Áp lực này sẽ làm cho các phần tử đất đá ngay sát xung quanh lượng thuốc bị nén ép mạnh và dịch chuyển sự dịch chuyển này sẽ làm cho các phần tử đất đá lớp tiếp theo bị nén ép và dịch chuyển. Quá trình liên tục diễn ra từ lớp này đến lớp khác tạo thành sóng ứng suất lan truyền trong đất đá. Phương trình sóng ứng suất do nổ tại một điểm trong đất đá do nổ sinh ra có dạng [10]

$$p(t) = p_0 e^{-\alpha t} \tag{1}$$

trong đó: p_0 – áp lực tối đa ban đầu của sản phẩm nổ, $p_0 = \dfrac{\rho_T D^2}{2(k+1)}$ (pa)

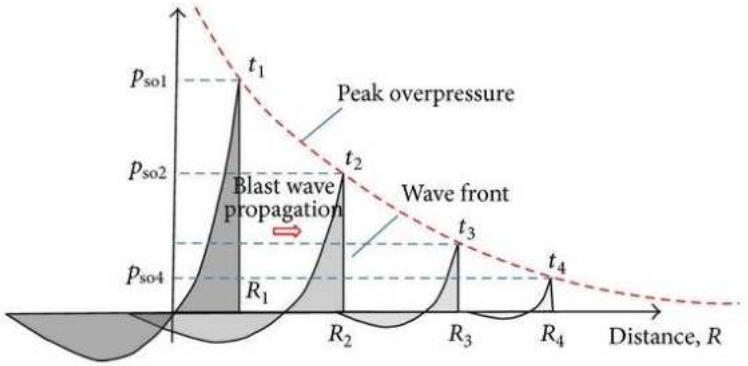
ρ_T – mật độ thuốc nổ, kg/m^3;

D – tốc độ nổ, m/s;

k – chỉ số đa biến, đối với sản phẩm nổ, đối với thuốc nổ TNT k=2,54;

t – thời điểm khảo sát sau khi kích nổ, s;

α – hệ số đặc trưng cho sự suy giảm của hàm áp lực nổ trong buồng mìn, phụ thuộc vào đặc tính bua, lượng nổ, đất đá.



Hình 1: Biểu đồ áp lực sóng ứng suất suy giảm theo khoảng cách [11]

Trong quá trình lan truyền, sóng ứng suất tác dụng lên đất đá do nổ mìn bị suy giảm cường độ. Cường độ sóng ứng suất trong đất đá khi lan truyền có thể xác định theo công thức [10]

$$\sigma_1(\bar{r},t)=\frac{1}{(\bar{r}-1)^{\beta}}\,p(t)\;;\quad \frac{(\bar{r}-1).r_0}{c}\le t\le\frac{(\bar{r}-1).r_0}{c}+\theta \qquad (2)$$

$\bar{r}$ - khoảng cách tương đối tương đối từ điểm nghiên cứu đến tâm nổ, $\bar{r}=\dfrac{r}{r_0}\ge 1$;

c- tốc độ lan truyền của sóng ứng suất nổ trong môi trường đá, m/s;

θ- thời gian tồn tại pha dương của hàm áp lực nổ, s;

$p(t)$- áp lực nổ theo thời gian tại thành lỗ khoan, Pa;

r- khoảng cách từ trục lượng nổ đến điểm nghiên cứu, m;

r_0- bán kính lượng nổ, m;

β- hệ số suy giảm sóng ứng suất theo khoảng cách, phụ thuộc vào đặc tính tự nhiên môi trường đất đá, theo Phenonov $\beta = 1\div3$.

Biện pháp để đo sóng ứng suất do nổ mìn gây ra trong khối đất đá là sử dụng đầu đo áp lực nước để đo cường độ sóng khúc xạ vào trong nước. Để tiến hành đo sẽ tạo ra một hố nước có kích thước hữa hạn với thành tường thẳng đứng. Sau đó đặt các cảm biến áp lực nước vào thành bể cách

bề mặt đất đá từ 2 đến 8mm. Trên khối đất đá với các khoảng cách đến tường khác nhau, tạo các lỗ để đặt lượng nổ. Thông số của sóng ứng suất trong sóng tới sẽ được xác định thông qua trị số đo trên cảm biến áp lực nước và hệ số khúc xạ [12]

$$K_{kx} = \frac{2}{1 + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}} \quad (3)$$

trong đó: K_{kx} - Hệ số khúc xạ sóng ứng suất;

ρ_1 và c_1 là mật độ khối lượng và vận tốc truyền sóng dọc của môi trường 1

ρ_2 và c_2 là mật độ khối lượng và vận tốc truyền sóng dọc của môi trường 2

Ứng suất trong trong sóng tới được xác định

$$\sigma = \frac{p_n}{K_{kx}}$$

Như vậy, thông qua việc xác định áp lực của sóng khúc xạ và hệ số khúc xạ sẽ xác định được áp lực của sóng ứng suất lan truyền trong khối đất đá

3. Nghiên cứu thực nghiệm

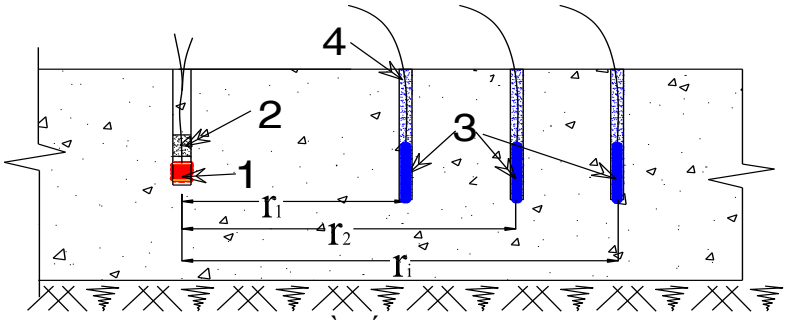
Mô hình thí nghiệm: Việc đo áp lực sóng nổ được thực hiện trong hố nước trên đường truyền sóng, do vậy mô hình nghiên cứu bao gồm khối bê tông san hô có kích thước các chiều dài, rộng, cao (L×B×H) = (1,8×0,8×0,5) m; trên khối bê tông có khoan lỗ đường kính ϕ=27 mm và ϕ=14mm. khoan lỗ khoan đường kính ϕ=27 mm để bố trí thuốc nổ; các lỗ khoan 14mm được đổ đầy nước để bố trí đầu đo áp lực nước; khoảng cách từ các lỗ khoan ϕ=14 mm đến lượng nổ thay đổi với các khoảng cách r=20cm, 30cm, 40cm, 50cm và 60cm;

Vật liệu thí nghiệm : Bê tông san hô có cường độ tương đương cấp bền nén B20. Cấp phối vật liệu bê tông san hô dựa trên kết quả nghiên cứu của TS Nguyễn Xuân Bàng cùng cộng sự [9].

Vật liệu nổ : sử dụng lượng nổ chế thức do nhà máy Z121 chế tạo có đượng lượng nổ tương đương 1 gam thuốc nổ TNT hình trụ có kích thước r=6mm; h=45mm, lượng nổ được bố trí tại độ sâu h=25cm (hình 2);

Trang thiết bị đo đạc : Sử dụng đầu đo Áp lực nước loại W138 – A05, nhãn hiệu PCB để đo áp lực của sóng khúc xạ từ môi trường bê tông vào trong nước. Đầu đo được đặt trong lỗ khoan chứa đầy nước. Đầu đo được bố trí ở những vị trí có khoảng cách đến tâm nổ khác nhau lần luợt là 20, 30, 40, 50 và 60 cm. Sử dụng máy đo động đa kênh NI SCXI-1000DC để tiến hành ghi nhận các tín hiệu từ đầu đo.

Tiến hành gây nổ lượng nổ và đo đạc kết quả sóng ứng suất tại các vị trí lỗ khoan với các khoảng cách từ tâm nổ như đã nêu ở trên. Mỗi khoảng cách tiến hành nổ và đo 3-4 lần.



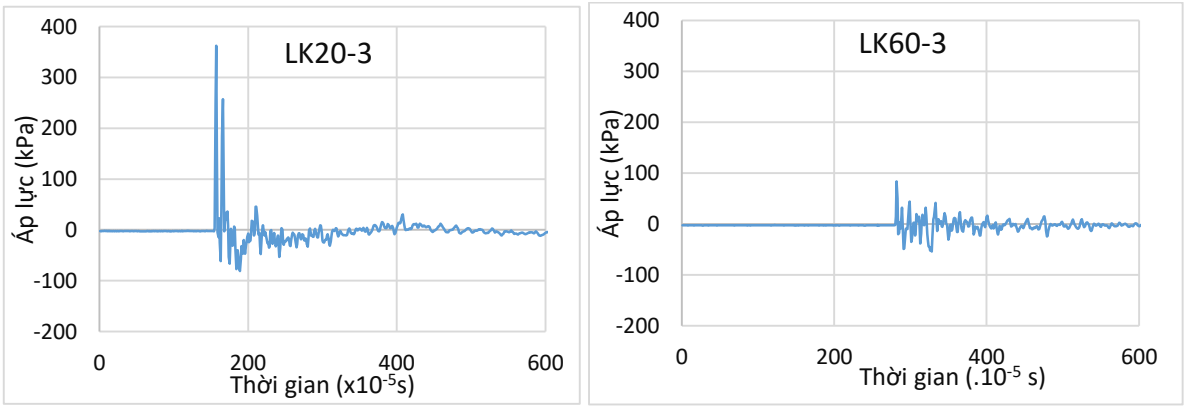
Hình 2. Sơ đồ bố trí thí nghiệm

1- Lượng nổ; 2- Bua; 3- Đầu đo áp lực; 4- Lỗ khoan Φ14 chứa nước



Hình 3. Một số hình ảnh công tác thí nghiệm

4. Kết quả thí nghiệm



Hình 4. Áp lực sóng khúc xạ theo thời gian

Kết quả biểu đồ áp lực sóng ứng suất (sóng khúc xạ) trong lỗ khoan chứa nước theo thời gian được biểu diễn trên hình 4. Từ biểu đồ, dễ ràng nhận thấy sóng ứng suất do nổ tồn tại pha nén và pha dãn rõ rệt. Pha nén cường độ pha nén lớn hơn nhiều so với pha dãn

Giá trị cường độ lớn nhất trong sóng ứng suất tại các khoảng cách khác nhau trong mỗi lần đo được thể hiện trong bảng 1

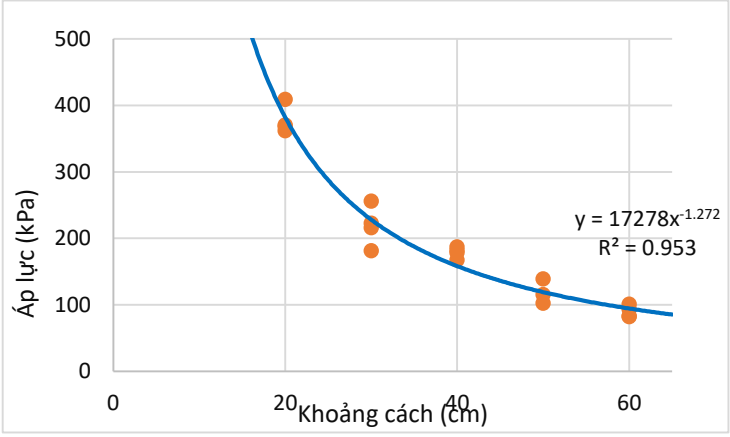
Bảng 1. Kết quả ứng suất lớn nhất tại các vị trí đo

Lần đo	Mã hiệu	Khoảng cách r (cm)	Khoảng cách tương đối r/r_0	Áp lực đo (kPa)
1	LK20-1	20	14.81481	368.24
2	LK20-2		14.81481	370.8869
3	LK20-3		14.81481	362
4	LK20-4		14.81481	409.4039
5	LK30-1	30	22.22222	181.3285
6	LK30-2		22.22222	215.9789
7	LK30-3		22.22222	256.1552
8	LK30-4		22.22222	222.734
9	LK40-1	40	29.62963	187.0356
10	LK40-2		29.62963	167.4683
11	LK40-3		29.62963	181.7726
12	LK40-4		29.62963	178.512
13	LK50-1	50	37.03704	102.2439
14	LK50-2		37.03704	115.4926
15	LK50-3		37.03704	138.9326
16	LK60-1	60	44.44444	101
17	LK60-2		44.44444	82.06508
18	LK60-3		44.44444	83.28804
19	LK60-4		44.44444	93.48

5. Phân tích kết quả thí nghiệm

Dựa trên kết quả thu được ở bảng 2 sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu thiết lập quy luật phân bố cường độ sóng ứng suất lớn nhất theo khoảng cách được biểu diễn trên hình 5 và có dạng

$$\sigma_{kx} = 17278.r^{-1,272} \text{ (kPa) với } R^2=0,964 \quad (4)$$



Hình 5:Kết quả suy giảm sóng ứng suất theo khoảng cách

Từ biểu thức trên, ta thu được hệ số suy giảm sóng ứng suất khi lan truyền đối với vật liệu bê tông san hô có cượng độ tương đương cấp bền nén B20 có giá trị β=1,272. Đây là thông số quan trọng sử dụng để nghiên cứu tính toán cường độ sóng ứng suất khi lan truyền.

6. Kết luận

Bê tông san hô là một loại vật liệu mới có tiềm năng ứng dụng vào xây dụng các công trình, đặc biệt là các công trình biển, đảo, những khu vực khó khăn trong việc vận chuyển vật liệu truyền thống để xây dựng. Việc nghiên cứu các đặc tính cơ lý của bê tông san hô cần được nghiên cứu một cách kỹ lưỡng trước khi đưa vào áp dụng. Thông qua nghiên cứu chỉ ra rằng sóng ứng suất do nổ lan truyền trong bê tông san hô bị suy giảm cường độ theo khoảng cách. Hệ số suy giảm cường độ sóng ứng suất nổ trong bê tông san hô có cấp bền nén tương đương B22,5 đối với lượng nổ tập trung được xác định bằng 1,272. Đây là hệ số quan trọng để các định các tham số của sóng ứng suất khi nổ trong môi trường bê tông san hô. Để có thể ứng dụng vật liệu bê tông san hô cho các công trình bảo vệ chịu tải trọng nổ cần tiếp tục nghiên cứu các tham số khác như hệ số phá, hệ số chấn sụp….

Tài liệu tham khảo

[1] Đàm Trọng Thắng, Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình, Hà Nội: NXB Khoa học tự nhiên và Công nghệ, 2015.

[2] Li Yuan Chi, Zong-Xian Zhang, Arne Aalberg, Jun Yang, Charlie C. Li, "Measurement of shock pressure and shock-wave attenuation near a blast hole in rock," *International Journal of Impact Engineering,* vol. 125, pp. 27-38, 2019.

[3] Cheng, Y., Song, Z., Jin, J., & Yang, T., "Attenuation Characteristics of Stress Wave Peak in Sandstone Subjected to Different Axial Stresses," *Advances in Materials Science and Engineering,* pp. 1-11, 2019.

[4] Đàm Trọng Thắng, Ngô Thế Đức, "Nghiên cứu sự suy giảm sóng ứng suất nổ khi lan truyền trong môi trường đá vôi," *Tạp chí Xây dựng,* vol. 11, pp. 70-75, 2023.

[5] Yijie Huang, Xiaowei Li, Yu Lu, Haichao Wang, Qing Wang , Huangsheng Sun , Dayong Li, "Effect of mix component on the mechanical properties of coral concrete under axial compression," *Construction and Building Materials,* vol. 223, pp. 736-754, 2019.

[6] Liu Bing, Jingkai Zhou, Xiaoyan Wen, Jianhua Guo, Xuanyu Zhang, Zhiheng Deng & Huailiang Wang., "Experimental Investigation on the Impact Resistance of Carbon Fibers Reinforced Coral Concrete," *Materials,* vol. 12, no. 23, 2019.

[7] P. Howdyshell, " The use of coral as an aggregate for portland cement concrete structures,," National Technical Information Service., Illinois, 1974.

[8] Ngô Ngọc Thủy, Vũ Đình Lợi, Đinh Quangg Trung, "Nghiên cứu sử dụng cốt liệu san hô thay thế một phần cốt liệu thông thường trong sản xuất bê tông xi măng," *Tạp Chí Vật liệu Và Xây dựng,* vol. 3, pp. 5-9, 2021.

[9] Lê Hải Dương, Trần Văn Cương, Nguyễn Trí Tá, Đinh Quang Trung, Nguyễn Xuân Bàng, "Thiết kế cấp phối bê tông san hô," *Tạp chí Xây dựng,* vol. 3, pp. 72-77, 2024.

[10] Đàm Trọng Thắng, Nổ trong xây dựng công trình, Hà Nội: Học viện Kĩ thuật Quân sự, 2020.

[11] Markellos P. Andreou, Anastasios N. Kotsoglou, Stavroula Pantazopoulou, "Modelling Blast Effects on a Reinforced Concrete Bridge," *Advances in Civil Engineering,* 2016.

[12] Hồ Sĩ Giao, Đàm Trọng Thắng, Lê Văn Quyền, Hoàng Tuấn Trung, Nổ Hoá Học - Lí thuyết và Thực tiến, Ha Noi: NXB Khoa học va Kĩ thuật, 2010.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE ATTENUATION OF PEAK STRESS WAVE DURING EXPLOSION IN CORAL CONCRETE ENVIRONMENT

Abstract: *Coral concrete has recently been increasingly applied in various construction projects, especially in marine and island structures. The mechanical characteristics of coral concrete have been studied and researched by many authors. However, there is still limited research on the behavior of coral concrete under explosive loading, particularly regarding the propagation of blast-induced stress waves. Through experimental methods on coral concrete samples, the authors have measured the attenuation coefficient of stress wave intensity caused by a concentrated explosive charge propagating through the material. The measurements were conducted using water pressure sensors placed in water-filled boreholes along the stress wave propagation path. Based on the measurements at different distances, the authors determined that the attenuation coefficient of blast-induced stress wave intensity in coral concrete is 1.272. This parameter is crucial for determining the propagation laws of stress waves in coral concrete.*

Keywords: Blasting stress waves, attenuation coefficient of stress wave, blasting stress wave measurement, coral concrete

Nghiên cứu thăm dò hiệu quả giảm chấn cho kết cấu khung thép bằng hệ giằng siêu đàn hồi

Nguyễn Bá Tiến[1], Nguyễn Xuân Đại [2] , Đinh Quang Trung[2]

[1]*Hệ Quản lý học viên sau đại học, Học viện KTQS*

[2]*Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện KTQS*

Email: xuandai.nguyen@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Hệ thống khung giằng trong kết cấu nhà thép đã trở thành một giải pháp thiết kế phổ biến trong những thập kỷ gần đây, giúp gia cường kết cấu và chống lại các tác động của tải trọng động. Các thanh giằng bằng thép thông thường có đặc tính ứng xử phi tuyến dạng song tuyến tính, do đó khi chịu tác động mạnh có thể gây ra chuyển vị dư, dẫn đến các yêu cầu về công tác bảo trì và phục hồi lại trạng thái làm việc của kết cấu. Vật liệu hợp kim siêu đàn hồi, là dạng vật liệu mới có tính năng ghi nhớ hình dạng và phục hồi ưu việt, đã được nghiên cứu và phát triển trong những năm gần đây. Bài báo này trình bày các phân tích thử nghiệm sử dụng vật liệu ghi nhớ hình dạng để phát triển hệ thanh giằng siêu đàn hồi áp dụng cho kết cấu nhà thép chịu tác động của động đất. Các phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian được thực hiện bằng phần mềm Etabs, với mô hình kết cấu nhà thép sử dụng thanh giằng thông thường và thanh giằng siêu đàn hồi. Kết quả phân tích cho thấy thanh giằng siêu đàn hồi giúp giảm mô men uốn trong cột và ngăn ngừa chuyển vị dư của công trình.

Từ khóa: *Kết cấu thanh giằng; Hệ giằng siêu đàn hồi; Vật liệu ghi nhớ hình dạng; Phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian; Phân tích công trình chịu động đất.*

1. Đặt vấn đề

Sự phát triển mạnh mẽ về kinh tế - xã hội và công nghệ ở Việt Nam trong vài thập kỷ qua đã tạo ra những thay đổi đáng kể trong kết cấu hạ tầng. Điển hình là sự gia tăng của các công trình quy mô lớn, cả về chiều rộng lẫn chiều cao, nhằm đáp ứng nhu cầu phát triển kinh tế và xã hội. Tuy nhiên, sự phát triển này cũng khiến các công trình trở nên nhạy cảm hơn với các tải trọng động, như gió bão và đặc biệt là động đất. Do đó, nghiên cứu, phân tích và thiết kế công trình đảm bảo đủ khả năng chịu các tác động như vậy là yêu cầu hết sức quan trọng.

Trong các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành [1-4], các giải pháp thiết kế kháng chấn được chia thành 02 nhóm giải pháp lớn: nhóm giải pháp kháng chấn truyền thống (dựa trên kết cấu) và nhóm giải pháp kháng chấn hiện đại (sử dụng các thiết bị cách ly và tiêu tán năng lượng).

Trong thiết kế kháng chấn hiện đại, mục tiêu là đảm bảo khả năng chịu lực và tiêu tán năng lượng của kết cấu. Kết cấu công trình cần có độ bền đủ lớn, độ cứng thích hợp để kiểm soát gia tốc dao động và lực quán tính, đồng thời đảm bảo chuyển vị không quá lớn. Bên cạnh đó, khả năng tiêu tán năng lượng (tỷ số cản tương đương cao) cũng rất quan trọng để giảm tác động của động đất. Tuy nhiên, việc cho phép biến dạng không đàn hồi trong kết cấu đồng nghĩa với việc chấp nhận mức độ hư hỏng nhất định khi xảy ra động đất. Nếu kết cấu chịu tải trọng lặp hoặc vượt quá tiêu chuẩn động đất, các biến dạng này có thể dẫn đến mất khả năng hồi phục, thậm chí phá hoại, làm gián đoạn hoặc mất khả năng khai thác công trình.

Trong nửa thế kỷ qua, các công nghệ thiết kế kháng chấn hiện đại đã trở thành xu hướng phổ biến cho các công trình ở vùng động đất. Những công nghệ này sử dụng thiết bị cơ học

(hoặc bán cơ học) tích hợp vào kết cấu công trình để cải thiện khả năng chịu lực khi bị động đất tác động. Các giải pháp kháng chấn chủ yếu được chia thành ba loại: giảm chấn thụ động, giảm chấn chủ động, và giảm chấn bán chủ động. Trong đó, giảm chấn thụ động được ưa chuộng và áp dụng rộng rãi nhất nhờ tính tiết kiệm chi phí, khả năng áp dụng linh hoạt và không phụ thuộc vào nguồn năng lượng ngoài.

Hệ thống thanh giằng, được nghiên cứu và phát triển trong suốt hàng chục năm qua, là một bổ sung quan trọng vào bộ công cụ giảm chấn thụ động dùng để thiết kế công trình chống động đất. Hệ thanh giằng là giải pháp hiệu quả cho các công trình chịu tải trọng ngang lớn, như gió, bão, và đặc biệt là động đất [5-9]. Thông thường, hệ kết cấu này được chế tạo từ thép – một vật liệu có khả năng chịu kéo, nén tốt và ổn định khi chịu các tải trọng lặp, như động đất. Khi tích hợp vào kết cấu chính của công trình, hệ thống thanh giằng giúp tăng cường đáng kể khả năng hồi phục của kết cấu và cải thiện độ biến dạng dẻo của toàn bộ hệ thống so với kết cấu thông thường [10]. Ưu điểm lớn nhất của giải pháp này là khả năng biến dạng dẻo tốt và hoạt động ổn định dưới tải trọng lặp như động đất [5, 7, 8], mang lại giải pháp không chỉ hiệu quả về mặt kỹ thuật mà còn linh hoạt về mặt thiết kế, với lợi ích kinh tế rõ rệt. Vì vậy, hệ kết cấu thanh giằng đã được áp dụng rộng rãi trong các công trình nhà khung, đặc biệt là nhà khung thép, tại các vùng có động đất mạnh.

Hệ thanh giằng kháng chấn bắt đầu được nghiên cứu từ những năm 1970 tại Nhật Bản, với mục tiêu ban đầu là tạo ra kết cấu có độ cứng đàn hồi tốt hơn khi chịu tác động của các trận động đất mạnh [11, 12]. Sau đó, công nghệ này tiếp tục được phát triển, đặc biệt ở các vùng động đất mạnh, với khả năng tiêu tán năng lượng cao. Nhiều nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về hệ thanh giằng đã được thực hiện, đạt được nhiều thành tựu, và ngày càng trở nên phổ biến, đặc biệt là giai đoạn sau những năm 1970 [6, 10, 13-16].

Trong thập kỷ qua, nghiên cứu về giảm dao động đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trong nước. Tác giả Nguyễn Đông Anh và cộng sự [17] đã trình bày cơ sở lý thuyết về giảm dao động với các giải pháp khác nhau, trong đó có hệ thống thanh giằng. Nghiên cứu này cũng đề cập đến việc tính toán độ cản tương đương của thiết bị, được xác định là hàm tỷ lệ nghịch với tần số dao động và bậc 2 của nghịch đảo biên độ dao động. Tác giả Nguyễn Tiến Chương và cộng sự [18] đã nghiên cứu động lực học của khung thép sử dụng hệ giằng chống oằn với các mô hình số khác nhau để mô phỏng ứng xử của thanh giằng. Kết quả cho thấy, các mô hình này không làm thay đổi đáng kể kết quả tính toán của kết cấu.

Hệ thanh giằng sử dụng vật liệu dạng siêu đàn hồi, có tính năng ghi nhớ hình dạng (Shape Memory Alloy - SMA) trong thiết kế kháng chấn cho khung thép đã trở thành một lĩnh vực nghiên cứu nổi bật trong những năm gần đây. SMA là một dạng vật liệu siêu đàn hồi (mô đun đàn hồi rất lớn) và có khả năng biến dạng lớn và hồi phục lại trạng thái ban đầu khi chịu tác động (tính năng ghi nhớ hình dạng). Điều này khiến SMA trở thành một lựa chọn lý tưởng để ứng dụng trong các hệ thống giảm chấn, đặc biệt là trong việc nghiên cứu phát triển hệ thống thanh giằng thế hệ mới áp dụng cho các công trình chịu động đất.

Khi sử dụng trong hệ thống thanh giằng, SMA giúp cải thiện khả năng tiêu tán năng lượng và giảm dao động cho các kết cấu thép, đồng thời khả năng hồi phục hình dạng ấn tượng của thiết bị sau khi chịu các biến dạng ngoài đàn hồi giúp bảo vệ kết cấu khỏi sự hư hỏng vĩnh

viễn, loại bỏ được các chuyển vị dư của kết cấu công trình. Chính vì vậy, công nghệ này ngày càng được ưa chuộng trong thiết kế kháng chấn cho các công trình khung thép, đặc biệt là ở những khu vực có nguy cơ động đất cao.

Tuy nhiên, ở Việt Nam còn rất ít các nghiên cứu về việc ứng dụng giải pháp vật liệu mới trong thiết kế hệ thanh giằng siêu đàn hồi gia cường cho hệ kết cấu. Do đó, việc đi sâu tìm hiểu, phân tích và đánh giá hiệu quả của việc sử dụng thanh giằng SMA còn giàu tiềm năng khai thác, phát triển.

2. Cơ sở lý thuyết tính toán

2.1. Tính toán tác động của động đất lên công trình

Hiện nay, tác dụng của động đất lên công trình được tính toán thông qua hai dạng chính: phổ phản ứng gia tốc và giản đồ gia tốc.

2.1.1. Phổ phản ứng gia tốc

Các tham số phổ phản ứng cung cấp các giá trị cực đại của sự khuếch đại chuyển động trên mặt đất do phản ứng của kết cấu, bao gồm gia tốc, vận tốc và chuyển vị. Những tham số này đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá tác động của động đất đối với kết cấu, khi xem xét năng lượng động đất trong khoảng thời gian dịch chuyển nhất định.

Theo tiêu chuẩn thiết kế công trình chịu động đất TCVN 9386:2012 [1], nội dung tính toán phổ phản ứng gia tốc đàn hồi được trình bày cụ thể như sau:

Với các chu kỳ dao động ngắn hơn 4,0s, phổ phản ứng đàn hồi theo phương nằm ngang, $S_e(T)$, được tính theo công thức sau:

$$\begin{aligned} 0 \;\; &\le T \le T_B : S_e(T) = a_g S\left[1+\left(2.5\eta-1\right)T/T_B\right] \\ T_B &\le T \le T_C : S_e(T) = 2.5 a_g S \eta \\ T_C &\le T \le T_D : S_e(T) = 2.5 a_g S \eta \left(T_C/T\right) \\ T_D &\le T \le 4s : S_e(T) = 2.5 a_g S \eta \left(T_C T_D/T^2\right) \end{aligned} \tag{1}$$

Phổ phản ứng đàn hồi chuyển vị $S_{de}(T)$ được tính từ phổ phản ứng đàn hồi gia tốc, theo công thức sau:

$$S_{de}(T) = S_e(T).\left(T/2\pi\right)^2 \tag{2}$$

Với các chu kỳ dao động dài hơn 4.0s, dựa theo tiêu chuẩn Eurocode 8 [2], phổ phản ứng đàn hồi gia tốc được tính toán từ phổ phản ứng đàn hồi chuyển $S_{de}(T)$, với $S_{de}(T)$ được định nghĩa như sau [1]:

$$\begin{aligned} T_E \le T \le T_F &: S_{de}(T) = 0.025 a_g S T_C T_D \left[2.5\eta + \left(\frac{T-T_E}{T_F-T_E}\right)\left(1-2.5\eta\right)\right] \\ T_F \le T \;\; &: S_{de}(T) = 0.025 a_g S T_C T_D \end{aligned} \tag{3}$$

Trong đó: a_g ($a_g = \gamma_I \times a_{gR}$) - là gia tốc nền thiết kế với nền loại A

γ_I - là hệ số tầm quan trọng, a_{gR} là đỉnh gia tốc nền tham chiếu

S - là hệ số nền

η - là hệ số điều chỉnh phụ thuộc vào độ cản nhớt $\xi(\%)$

T là chu kỳ dao động của kết cấu

T_B, T_C, T_D, T_E, T_F là các giới hạn chu kỳ của phổ phản ứng gia tốc, phụ thuộc vào loại nền đất, được lấy trong bảng sau:

Bảng 1. Giá trị của các tham số mô tả các phổ phản ứng đàn hồi theo TCVN 9386:2012 [1]

Loại nền đất	S	T_B	T_C	T_D	T_E	T_F
A	1	0.15	0.4	2	4.5	10
B	1.2	0.15	0.5	2	5	10
C	1.15	0.2	0.6	2	6	10
D	1.35	0.2	0.8	2	6	10
E	1.4	0.15	0.5	2	6	10

2.2.2. Giản đồ gia tốc

Hiện nay, trong phân tích động đất, có hai loại giản đồ gia tốc chính được sử dụng: giản đồ gia tốc nhân tạo và giản đồ gia tốc thực. Tiêu chuẩn TCVN 9386:2012 đưa ra các quy định cụ thể về việc áp dụng giản đồ gia tốc trong phân tích động đất. Theo đó, hầu hết các giản đồ gia tốc cần được hiệu chỉnh để phù hợp với điều kiện khớp phổ phản ứng. Các phương pháp tạo giản đồ gia tốc nhân tạo và/hoặc hiệu chỉnh giản đồ gia tốc thực đã được nghiên cứu và thực hiện bởi một số tác giả, như Đinh Văn Thuật [19], Vũ Ngọc Anh [20], Nguyễn Xuân Đại [21-23].

Đối với hệ kết cấu sử dụng thanh giằng, đặc biệt là thanh giằng siêu đàn hồi, việc mô phỏng chính xác ứng xử phi tuyến của kết cấu là rất quan trọng. Điều này giúp hiểu rõ nguyên lý hoạt động và tối ưu hóa khả năng của thiết bị. Trong khi các phương pháp phân tích tĩnh hoặc mô hình đàn hồi tương đương (dùng trong phân tích dạng dao động) không thể phản ánh đầy đủ hoặc chính xác ứng xử phi tuyến của kết cấu, phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian lại là giải pháp hiệu quả nhất. Phương pháp này được lựa chọn để áp dụng trong nghiên cứu này, phù hợp với các nhận định và yêu cầu trong các tiêu chuẩn hiện hành [1-4, 24].

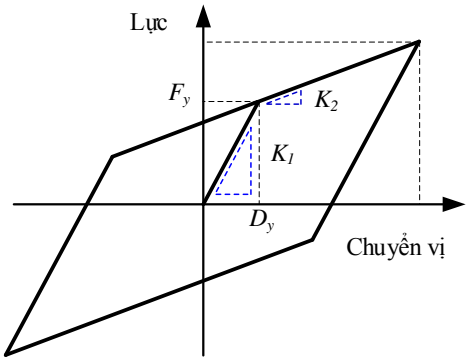
2.2. Phương pháp mô hình hóa thanh giằng

Trong hệ kết cấu tổng thể, dầm và cột chịu tải trọng thẳng đứng và ngang, còn hệ thanh giằng có vai trò giảm bớt tải trọng ngang tác dụng lên cột. Hệ giằng thường được thiết kế theo các hình dạng điển hình như giằng chữ V, giằng chữ X, giằng chữ K, v.v., được bổ sung vào các khu vực kết cấu hình chữ nhật để tăng độ ổn định cho khung [5, 8].

Thanh giằng, với vai trò là thiết bị phụ trợ bổ sung vào hệ kết cấu ban đầu, có chức năng tăng cường độ cứng và cải thiện khả năng tiêu tán năng lượng cho toàn hệ kết cấu. Để mô phỏng ứng xử của thanh giằng, một mô hình phi tuyến thường được sử dụng. Thực tế, sự làm việc của thanh giằng có thể được mô phỏng bằng nhiều phương pháp khác nhau [18], nhưng hầu hết các mô hình đều có đường cong quan hệ lực – chuyển vị dạng vòng trễ [13, 14, 25]. Hai phương pháp chính để mô hình hóa hệ thanh giằng bao gồm:

- Mô hình hóa trực tiếp kết cấu.

- Mô hình hóa thanh giằng bằng phần tử liên kết, với ứng xử gần đúng theo dạng song tuyến tính, như minh họa trong Hình 1.



Hình 1. Mô hình ứng xử song tuyến tính đại diện cho thanh giằng

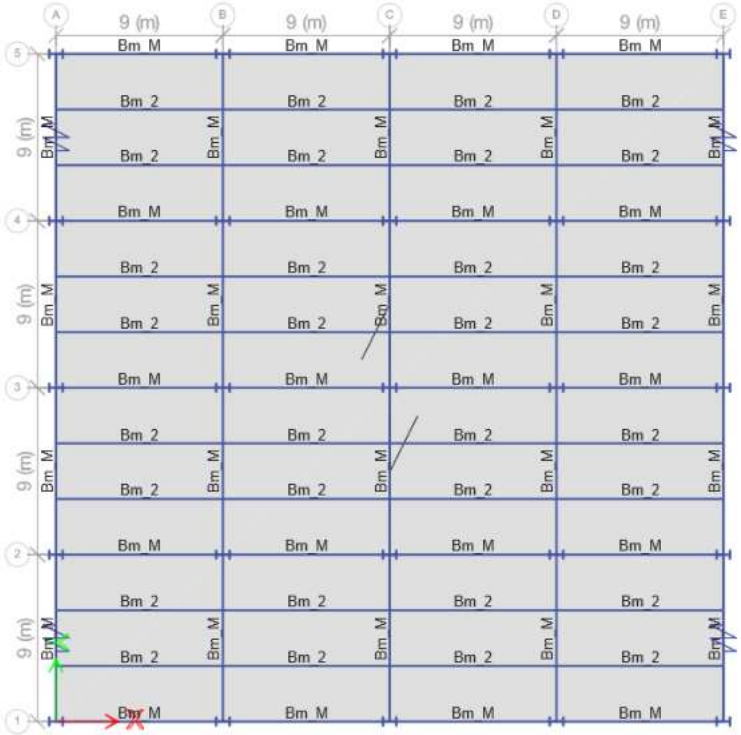
Trong Hình 1, K_1 là độ cứng đàn hồi ban đầu của cấu kiện ban đầu, K_2 là độ cứng sau đàn hồi, điểm chảy dẻo được xác định bởi lực giới hạn đàn hồi (F_y) và biến dạng chảy dẻo D_y.

3. Khảo sát ví dụ số

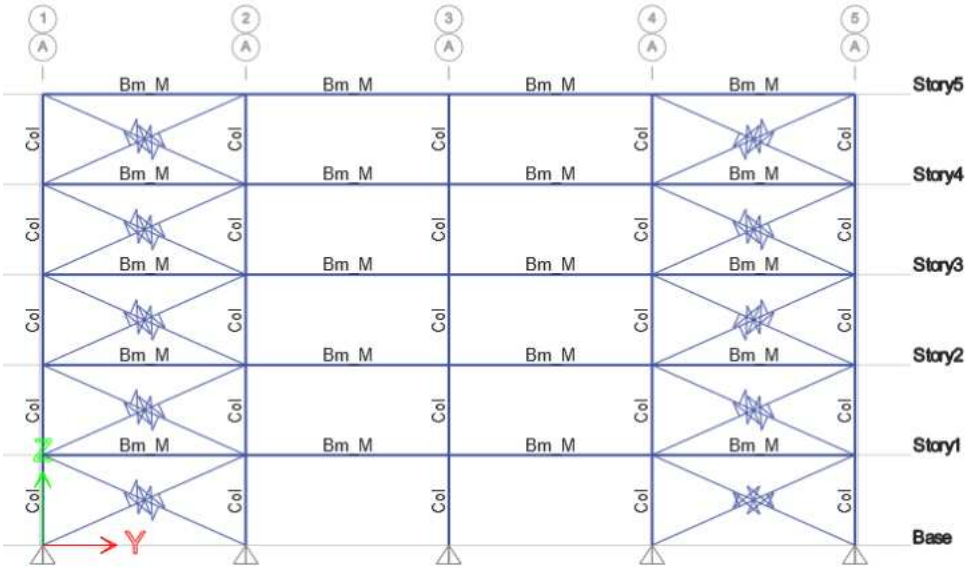
3.1. Mô hình phân tích

Xét hệ kết cấu nhà khung thép như Hình 2 và Hình 3. Mặt bằng tòa nhà có dạng hình vuông, mỗi cạnh gồm 04 nhịp có chiều dài 7m/nhịp, công trình cao 5 tầng, chiều cao mỗi tầng là 4 m.

Liên kết giữa chân cột với móng là dạng liên kết bulong và thường được mô phỏng bằng liên kết nửa cứng. Tuy nhiên trong phạm vi phân tích, nhóm tác giả tập trung thể hiện rõ hơn hiệu ứng phi tuyến của kết cấu thanh giằng, do đó giả thiết rằng liên kết giữa cột và móng có thể mô hình đơn giản hóa bằng các liên kết khớp.



Hình 2. Mặt bằng công trình



Hình 3. Mặt đứng công trình

Bảng 2. Thông số kết cấu công trình

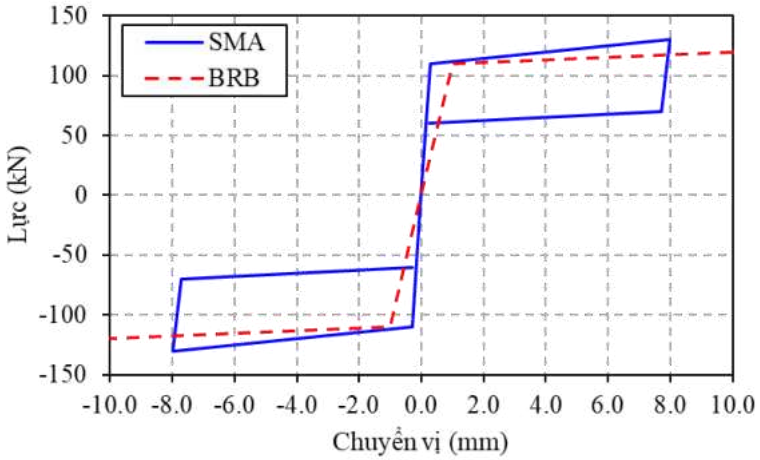
Tên cấu kiện	Vật liệu	Tiết diện			
		B	H	Độ dày bản cánh	Độ dày bản bụng
Cột (H)	S355	450	600	15	10
Dầm chính (H)	S355	300	750	15	8
Dầm phụ (H)	S355	200	500	15	8

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiến hành phân tích với 02 dạng thanh giằng khác nhau nhằm đánh giá tính ưu việt của hệ thanh giằng siêu đàn hồi sử dụng dạng vật liệu SMA.

Với hệ thanh giằng thông thường (BRB - Buckling Restrained Braces), sử dụng thép S325, ứng xử có dạng song tuyến tính, như minh hoạt trên Hình 1, dựa vào thông số vật liệu và tiết diện, tính toán được độ cứng đàn hồi K_1 = 110kN/mm, độ cứng sau đàn hồi K_2 = 1,1kN/mm, giới hạn đàn hồi F_y = 110kN.

Với hệ thanh giằng siêu đàn hồi, tác giả tham khảo kết quả nghiên cứu thực nghiệm với hợp kim Nickel-Titanium, mô hình ứng xử của thành giằng sử dụng trong phân tích như thể hiện trong Hình 4. Ở đây, để đảm bảo việc so sánh hiệu quả của hai loại thanh giằng với cùng thang tham chiếu, tác giả lựa chọn hệ thanh giằng siêu đàn hồi thỏa mãn điều kiện giá trị giới hạn đàn hồi F_y là tương đương với thanh giằng thông thường (nghĩa là F_y = 110kN).

Các mô hình ứng xử trong Hình 4 được khai báo dưới dạng phần tử lò xo phi tuyến (multi-plastic) trong phần mềm Etabs. Trong đó, ứng xử của phần tử thanh giằng thông thường được mô tả bằng mô hình ứng xử song tuyến tính (đường nét đứt màu đỏ), phần tử thanh giằng siêu đàn hồi được mô tả dưới dạng vòng trễ đặc trưng của vật liệu ghi nhớ hình dạng (đường nét liền màu xanh).



Hình 4. Mô hình ứng xử của thanh giằng thông thường (BRB) và giằng siêu đàn hồi (SMA)

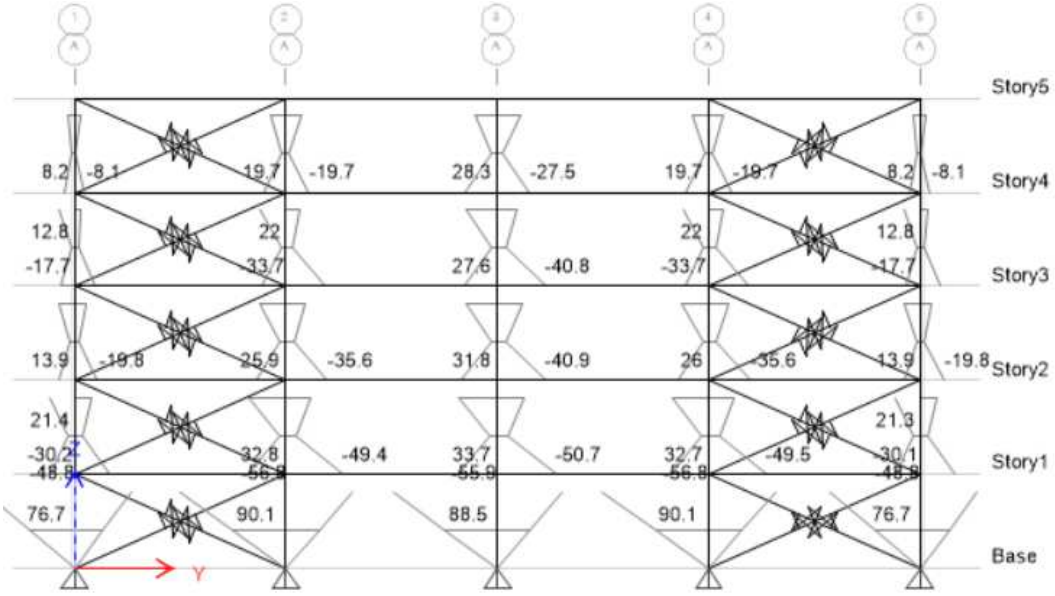
Tải trọng tác dụng lên công trình là tải trọng động đất, với gia tốc nền tham chiếu được lựa chọn tại Sơn La, Việt Nam. Để thực hiện các phân tích theo lịch sử thời gian, nhóm tác giả lựa chọn phương pháp sử dụng công cụ có sẵn và dữ liệu có sẵn trong phần mềm Etabs để hiệu chỉnh bản ghi gia tốc nhằm khớp phổ phản ứng.

3.2. Kết quả và bình luận

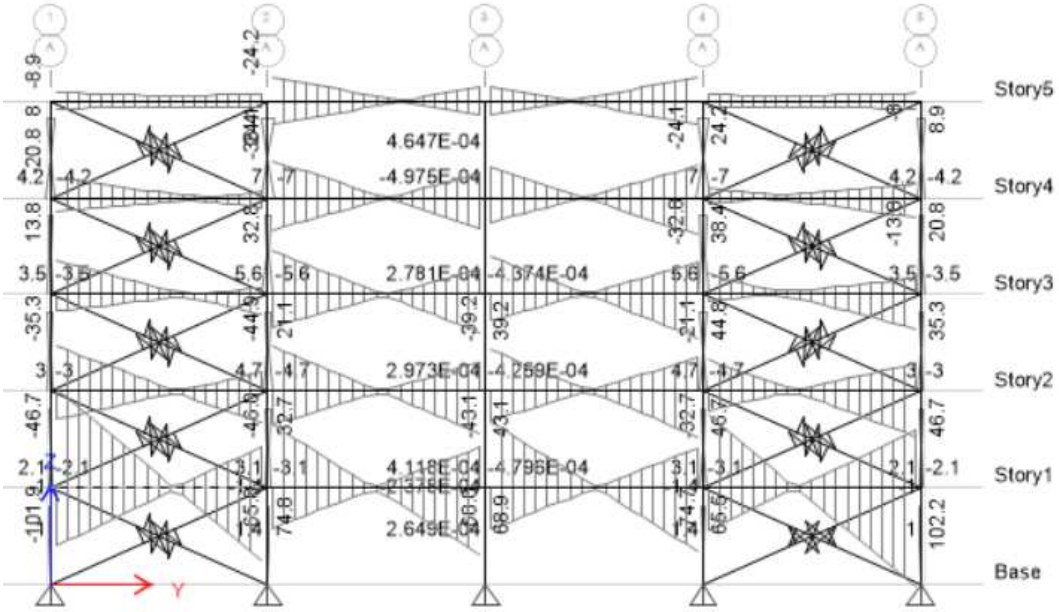
3.2.1. Phân tích kết cấu sử dụng hệ giằng thông thường

Kết quả nội lực (mô men uốn trong cột, dầm), chuyển vị (tại đỉnh công trình) và ứng xử phi tuyến của các thanh giằng được lựa chọn để khảo sát.

Kết quả mô men uốn trong cột và dầm được thể hiện lần lượt trong *Hình 5* và *Hình 6* với kết cấu sử dụng hệ thanh giằng thông thường.

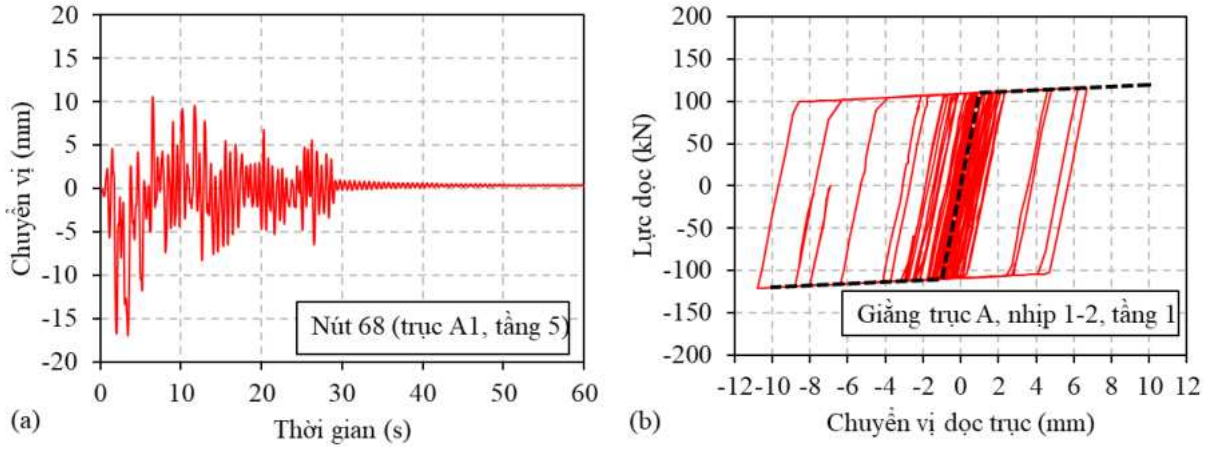


Hình 5. Mô men uốn tại cột khi sử dụng giằng thông thường (kNm)



Hình 6. Mô men uốn trong dầm khi sử dụng giằng thông thường (kNm)

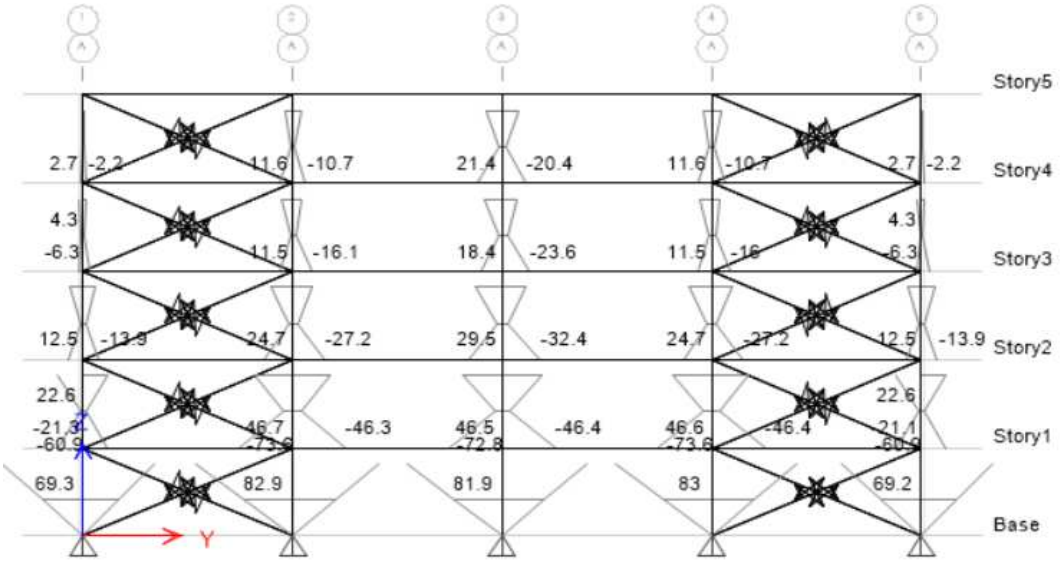
Chuyển vị theo thời gian tại đỉnh công trình được thể hiện điển hình trong *Hình 7*.(a). Theo quan sát trên hình, kết quả phân tích cho thấy xuất hiện chuyển vị dư tại đỉnh công trình (mặc dù giá trị tương đối nhỏ). *Hình 7*.(b) trình bày phản ứng phi tuyến của thanh giằng.



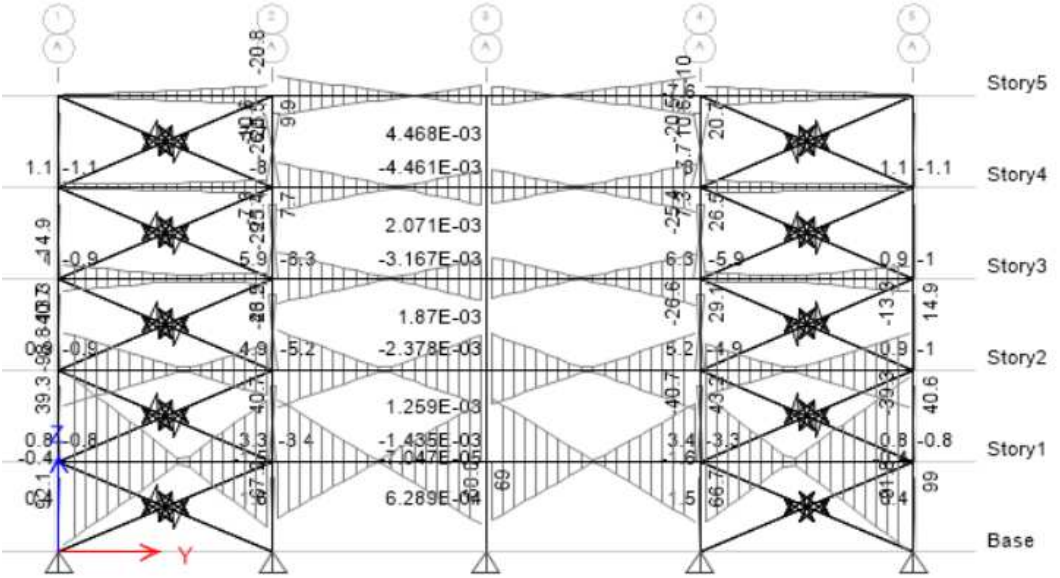
Hình 7. Phản ứng của kết cấu theo lịch sử thời gian khi sử dụng giằng thông thường: (a) Chuyển vị tại đỉnh, (b) Ứng xử phi tuyến của thanh giằng

3.2.2. Phân tích kết cấu sử dụng hệ giằng siêu đàn hồi

Tương tự như phần 3.2.1, *Hình 8* và *Hình 9* lần lượt thể hiện mô men uốn tại cột và dầm khung trục A.

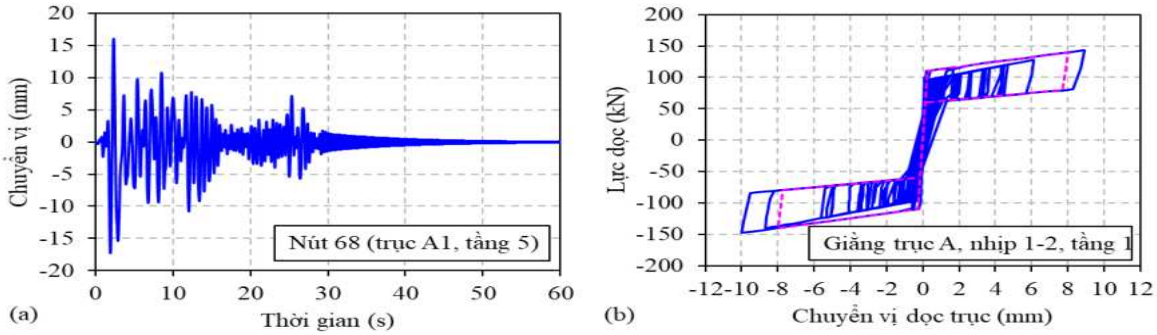


Hình 8. Mô men uốn tại cột khi sử dụng giằng siêu đàn hồi (kNm)



Hình 9. Mô men uốn trong dầm khi sử dụng giằng siêu đàn hồi (kNm)

Chuyển vị theo thời gian tại đỉnh công trình được thể hiện điển hình trong *Hình 10*.(a). *Hình 10*.(b) trình bày phản ứng phi tuyến của thanh giằng, thể hiện sự phù hợp với các tham số đã khai báo mô hình (đường nét đứt, màu tím).



Hình 10. Phản ứng của kết cấu theo lịch sử thời gian khi sử dụng giằng siêu đàn hồi:
(a) Chuyển vị tại đỉnh, (b) Ứng xử phi tuyến của thanh giằng

3.2.2. Bình luận

Chỉ tiêu so sánh		Giằng thông thường	Giằng siêu đàn hồi
Dầm trục A, nhịp 1-2, tầng 1	M_{max} (kNm)	74,8	92,1
	M_{min} (kNm)	**-101,9**	-98,8
Cột tầng 1, trục A-1	M_{max} (kNm)	**76,7**	62,6
	M_{min} (kNm)	-48,8	-36,9
Chuyển vị đỉnh	(mm)	**17,3**	17,0
Chuyển vị tại 60s	(mm)	**0,3**	0,0016

Từ kết quả phân tích ta nhận thấy, với cùng giới hạn đàn hồi, hệ thanh giằng siêu đàn hồi có hiệu quả đáng kể (cỡ 20%) trong việc giảm mô men uốn trong cột (theo đó đồng thời giảm mô men uốn trong dầm). Hệ quả là, giá trị chuyển vị đỉnh công trình có giảm khi so sánh với kết cấu sử dụng hệ giằng thông thường. Ngoài ra, việc sử dụng hệ thanh giằng siêu đàn hồi có hiệu quả cao trong việc loại bỏ các giá trị chuyển vị dư do phản ứng phi tuyến của kết cấu công trình.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả khảo sát hiệu quả của hệ thanh giằng siêu đàn hồi sử dụng vật liệu ghi nhớ hình dạng trong kết cấu nhà khung thép chịu tác động của tải trọng động đất. Hệ thanh giằng siêu đàn hồi có đặc tính vượt trội với độ cứng đàn hồi cao và khả năng phục hồi ấn tượng, giúp giảm đáng kể mô men uốn trong cột, đồng thời hạn chế hiệu quả chuyển vị dư của kết cấu khi chịu tác động của động đất. Các phân tích sơ bộ này sẽ làm cơ sở cho các nghiên cứu sâu hơn và thử nghiệm tiếp theo nhằm đánh giá tiềm năng của hệ thanh giằng siêu đàn hồi trong việc thiết kế giảm dao động cho kết cấu công trình.

Tài liệu tham khảo

1. TCVN-9386:2012, *Vietnam national standard - Design of structures for earthquake resistances*. 2012, Ministry of Science and Technology.
2. ECS, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. 2005a: European Committee for Standardization Brussels.
3. ASCE/SEI-41-13, *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*, in *ASCE Standard ASCE/SEI*. 2014, American Society of Civil Engineers.
4. NRCC, *National building code of Canada (NBCC)*. 2015, National Research Council of Canada, Associate Committee on the National Building Code.
5. Azad, S.K. and C. Topkaya, *A review of research on steel eccentrically braced frames.* Journal of constructional steel research, 2017. **128**: p. 53-73.
6. Fahnestock, L.A., J.M. Ricles, and R. Sause, *Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame.* Journal of structural engineering, 2007. **133**(9): p. 1205-1214.
7. Kim, J. and H. Choi, *Response modification factors of chevron-braced frames.* Engineering structures, 2005. **27**(2): p. 285-300.
8. Naqash, M.T., K. Mahmood, and S. Khoso, *An overview on the seismic design of braced frames.* American Journal of Civil Engineering, 2014. **2**(2): p. 41-47.

9. Roeder, C.W., *Seismic behavior of concentrically braced frame.* Journal of structural engineering, 1989. **115**(8): p. 1837-1856.
10. Sabelli, R., S. Mahin, and C. Chang, *Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces.* Engineering Structures, 2003. **25**(5): p. 655-666.
11. Fujimoto, M., et al., *Structural characteristics of eccentric k-braced frames.* Transactions AIJ, 1972. **195**: p. 39-49.
12. Tanabashi, R., K. Naneta, and T. Ishida. *On the rigidity and ductility of steel bracing assemblage*. in *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*. 1974. IAEE Rome.
13. Ioan, A., et al., *Experimental validation of re-centring capability of eccentrically braced frames with removable links.* Engineering Structures, 2016. **113**: p. 335-346.
14. Vetr, M.G., A. Ghamari, and J. Bouwkamp, *Investigating the nonlinear behavior of Eccentrically Braced Frame with vertical shear links (V-EBF).* Journal of Building Engineering, 2017. **10**: p. 47-59.
15. Fathali, M.A. and S.R.H. Vaez *Optimum performance-based design of eccentrically braced frames*. Engineering Structures, 2020. **202**, 109857 DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109857.
16. Kersting, R.A., L.A. Fahnestock, and W.A. López, *Seismic design of steel buckling-restrained braced frames.* NIST GCR, 2015: p. 15-917.
17. Nguyễn Đông Anh and Lã Đức Việt, *Giảm dao động bằng thiết bị tiêu tán năng lượng*. 2007, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam: Nhà Xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ. 429.
18. Chương, N.T. and P.T. Hiền, *Phân tích động lực học khung thép có hệ giằng chống oằn trên cơ sở kết quả thí nghiệm giằng.* Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, 2015. **2**: p. 15-19.
19. Dinh Van Thuat, *Generation of ground motion accelerations from design elastic response spectrum using the Fourier series.* Journal of science and technology in Civil Engineering, 2011. **10**: p. 3-14.
20. Vu Ngoc Anh, *Using of wavelet transform to generate pseudo-acceleration according to response spectrum matching conditions to calculate earthquake resistant structures*, in *Le Quy Don technical university*. 2020: .
21. Dai Nguyen, X., *A proposed method for selecting and scaling recorded seismic accelerations according to TCVN-9386: 2012.* Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE, 2022. **16**(1): p. 100-112.
22. Nguyễn, X.Đ. and V.T. Nguyễn, *Hiệu chỉnh giản đồ gia tốc động đất đáp ứng theo tiêu chuẩn Việt Nam.* Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, 2021. **3**: p. 69-77.
23. Nguyen, X.D., et al., *Automated calibration of recorded ground motions for nonlinear response history analysis of isolated bridges.* International Journal of Structural Engineering, 2024. **14**(4): p. 437-460.
24. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 9th Edition*. 2020, American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.
25. Bazzaz, M., et al., *Evaluating the seismic performance of off-centre bracing system with circular element in optimum place.* International Journal of Steel Structures, 2014. **14**: p. 293-304.

Research on the seismic performance of superelastic bracing systems for steel frame structures

Abstract: *The bracing system has become a widely used design solution in recent decades, reinforcing the steel frame structures and protecting them from dynamic impacts. Conventional steel braces exhibit a nonlinear behavior with a hysteresis bilinear response, which can lead to significant residual displacements when subjected to strong impacts, resulting in requirements of maintenance and restoring the functions of structures. Superelastic alloys, a new material with shape memory and excellent restoring capacities, have been studied and developed in recent years. This paper presents preliminary analyses using shape memory alloys to develop a superelastic bracing system for steel framce structures subjected to earthquake. Nonlinear time-history analyses were performed using the Etabs software, with models of steel structures incorporating both conventional braces and superelastic braces. The results show that superelastic braces reduce significantly the bending moment in columns and prevent residual displacements of the structure.*

Keywords: Bracing systems; Superelastic braces; Shape memory alloys; Nonlinear time-history analysis; Seismic structural analysis.

Numerical analysis of the effects of different behavior models of isolators on the seismic responses of multi-story buildings

Hai Dang Tran[1], Xuan Dai Nguyen[1], Van Tu Nguyen[1], Hoang Nguyen[1], Quang Trung Dinh[1]

[1]*Institute of Construction Technology, Le Quy Don Technical University*

[*] *Email: xuandai.nguyen@lqdtu.edu.vn*

Abstract

This paper presents a numerical investigation into the influence of different seismic isolator models on the seismic response of isolated buildings. Four distinct isolator models, including equivalent linear, plastic Wen, bilinear, and rubber isolator models, are evaluated to assess their impact on the seismic response of structures. Typical 3D models of a multi-story building are subjected to nonlinear time-history analyses using the Northridge earthquake record (1994), scaled to match the Eurocode 8 target spectrum. Key response parameters, including isolator behavior, lateral displacements, and base shear forces, are analyzed to highlight differences among the models. Results indicate that nonlinear models, such as plastic Wen, bilinear, and rubber isolator, produce similar and realistic seismic responses, whereas the linear model significantly overestimates displacements and lateral forces. This finding underscores the limitations of linear assumptions and emphasizes the importance of nonlinear modeling for accurate performance evaluation.

Keywords*: Seismic base isolation; hysteresis behavior; nonlinear time-history analysis; seismic isolation multi-story building.*

1. Introduction

Earthquakes are a type of seismic activity that occurs when the surface of the Earth shakes due to the release of energy from its internal layers. This energy release is caused by the movement and collision of tectonic plates and/or due to nuclear explosions, which lead to large deformation and the accumulation of stress. When the stress exceeds the threshold of the tectonic plates' tolerance, the energy is suddenly released in the form of seismic waves. The impacts of earthquakes may significantly influence not only humans but also the infrastructure, especially the near-fields. According to historical observations, earthquakes are among the deadliest and most destructive natural disasters. The widespread devastation, loss of life, and damage to infrastructure result in significant economic costs for rescue, containment, reconstruction, and recovery efforts. Recovering from an earthquake demands substantial time and financial resources, and often, aid struggles to reach the affected regions.

Multi-story buildings are characterized by great height and large loads distributed over a small area. Consequently, their structures are very vulnerable to strong horizontal impacts such as earthquakes. Typical effects of earthquakes on multi-story structural buildings include strong vibrations, large stress and deformation, foundation shifting, structural damages, pancake collapse, etc.

A number of advanced methods, including seismic protection devices, have become popular in the domain of construction design to mitigate the consequences of earthquakes. Each of these technologies has its concept, which involves modifying one or more structural parameters of the equation of motion of the dynamic structure to reduce the seismic demand and/or improve the structural capacity.

Particularly, Seismic Base Isolations (SBI) are effective for protecting multi-story buildings by decoupling the structure from ground motion. Several key features of this technique include:

- Isolation Unit: This is the core technique of seismic base isolations, which allows the building to move independently from the ground motion during an earthquake.

- Energy Dissipation: Seismic isolators are often integrated with impressive energy dissipation capabilities, allowing them to effectively reduce the vibration energy of the structure, thereby reducing internal forces and the lateral displacements of buildings.

- Restoring capacity: Generally, seismic impacts cause significant displacements, leading to inelastic deformations of structural components. Therefore, in addition to the capacity of isolation from the source of vibration and dissipation capacity, seismic isolators also offer great restoring capacity, helping the structure to return to its original regime.

Before the 1980s, the use of Seismic Base Isolation (SBI) as a method to mitigate the effects of seismic forces on structures was viewed with skepticism by the engineering community and was considered an impractical approach. However, over time, this concept has gained considerable traction and is now widely accepted [1]. This growing acceptance is reflected in the increasing number of journal articles, technical reports, workshops, and conferences focused on the subject. Currently, seismic isolation is an area of active development, with numerous new systems being investigated and existing ones enhanced, particularly elastomeric-based bearings. SBI is commonly used in seismic design to protect structures from seismic impacts and is becoming an integral part of seismic-resistant designs for both new constructions and the renovation of existing structures. This technique has increasingly proven to be one of the most promising solutions to mitigate earthquake effects on constructions, not only in high-seismic zones but also in regions with moderate seismic activity [2, 3],

Seismic Base Isolation is considered an effective technique for protecting structures from the damaging effects of earthquakes and is widely applied for seismic-resistant design. However, the response of base isolators is inherently nonlinear, meaning that their behavior does not follow a simple, proportional relationship between force and displacement, especially under large seismic forces. Currently, several behavior models are applied to seismic isolation-bearing elements. Each model has different advantages and disadvantages. However, the analysis to consider and evaluate these differences is still quite limited. This paper aims to investigate several representative behavior models and evaluate their impact on the seismic response of specific building structures using seismic isolation bearings.

2. Description of the isolator's behavior

2.1. Equivalent effective linear model

The linear viscoelastic model is a combination of an elastic spring and a viscous damper, mounted in parallel, which is an equivalent linear model used to simplify the simulation of the nonlinear behavior of the viscous bearing, as illustrated in Figure 1. It is defined by the effective

stiffness, K_{eff}, (of the linear spring), and the equivalent viscous damping ratio, β_{eff}, (of the damper), evaluated at the design displacement.

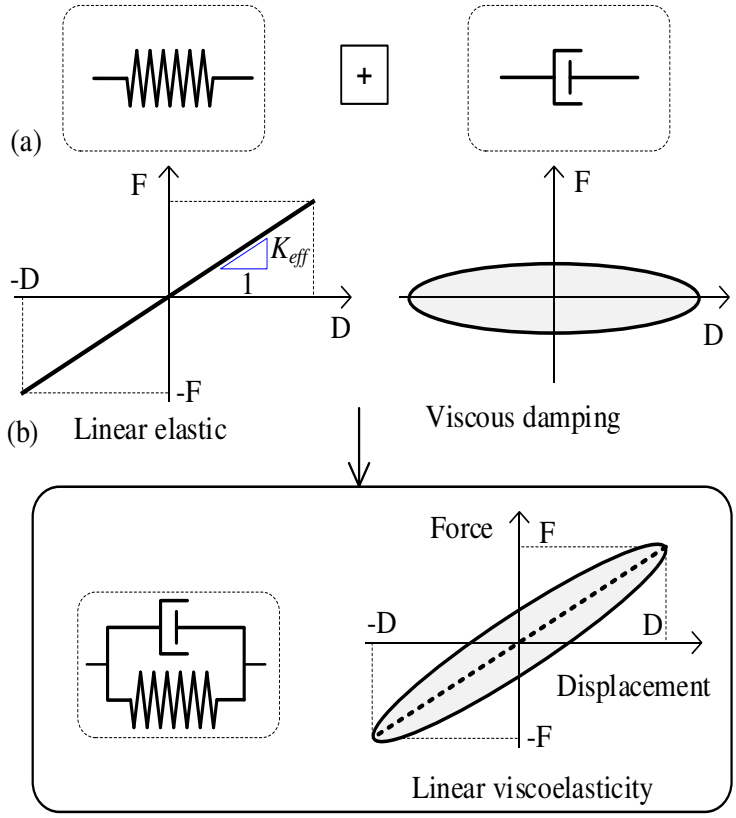


Figure 1. Linear viscoelastic model: (a) diagrams; (b) component behavior

Generally, effective parameters are approximately determined at the expected peak responses and the constitutive parameters of the bilinear model, as follows:

$$K_{eff} = \frac{F_{\max}}{D_{\max}} \tag{1}$$

Accordingly, the energy dissipated per circle depends on the maximum displacement, while the expected displacement is unknown and shall be matched by the design spectrum, damping ratio, and bilinear behavior. Therefore, an iterative procedure is usually employed to estimate these effective parameters and the seismic demands of isolated structures [2, 4].

2.2. Rubber isolator model

The rubber isolator model is a built-in model in Etabs software, used to model nonlinear link elements representing rubber isolator devices. The hysteresis loop shape of this model is shown in Figure 2. Accordingly, the model's shape is similar to the bilinear model, but the hysteresis curve at the transition position is smoother than the bilinear model. Further, the software sets the transition curvature so the designer cannot simply intervene.

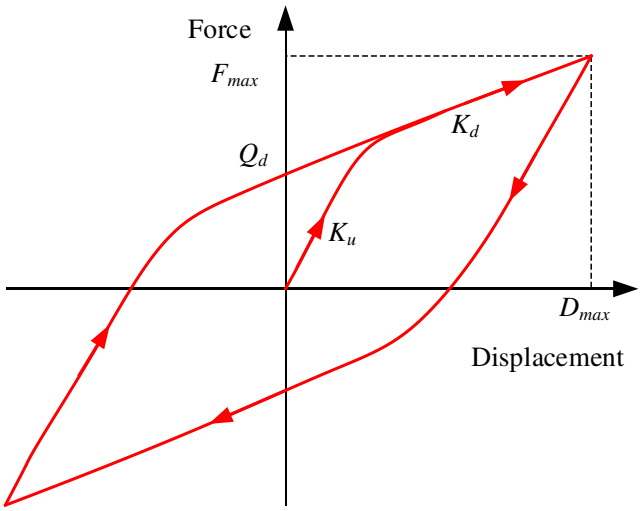


Figure 2. Rubber isolator hysteresis model

2.3. Bilinear model

The bilinear model of the force-displacement relationship is considered an idealized general theoretical behavior for typical SBIs. This behavior model with main parameters and characteristics is defined in Figure 3. It is the simplest model used for nonlinear temporal analyses where the level of deformations is very variable [2, 5-8].

The constitutive parameters of this model include: the characteristic strength (Q_d), the initial elastic stiffness (K_u), the post-elastic stiffness (K_d), and the elastic limit [$F_y = Q_d.K_u / (K_u - K_d)$], and the force maximum ($F_{max} = Q_d + K_d.D_{max}$).

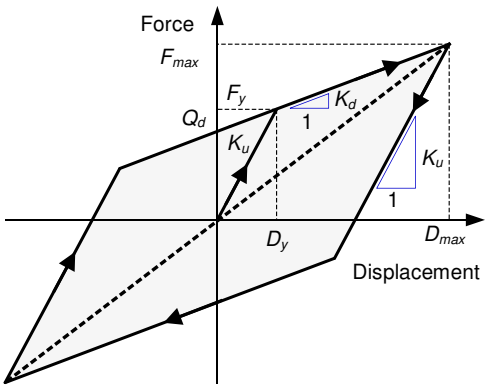


Figure 3. Bilinear hysteresis model

For this model, the initial elastic stiffness, Ku, is typically a very high value, as the displacement at the yield point, D_y, is typically 0 to a few millimeters. This characteristic has a secondary importance on the system's behavior in earthquakes and its main role consists in ensuring the initial rigidity of the system, under the non-seismic loads. The initial characteristic strength, Q_d, and the post-elastic stiffness, K_d, are the most important system characteristics affecting its efficiencies as well as the performance of structures under large earthquakes [2, 5, 6].

2.4. Plastic Wen model

The Plastic Wen model is common and widely applied to represent the nonlinear hysteresis behavior of materials and components. The non-linear force versus displacement relationship is given by the following expression:

$$f = \alpha kd + (1-\alpha) f_y z \tag{2}$$

Where k is the elastic constant, f is the yield force, α is the ratio of post-yielding stiffness and elastic stiffness k, and z is an internal hysteretic variable. This variable has a range between $|z| \leq 1$, with the yielding surface represented by $|z|=1$. The curvature of the transition position is defined by the factor "r" named yield exponent, which is usually taken to between 2 and 20, as illustrated in Figure 4. Accordingly, the Plastic Wen model is similar to the Rubber Isolator model, with the exception that it is simpler to control curvature at the transition location.

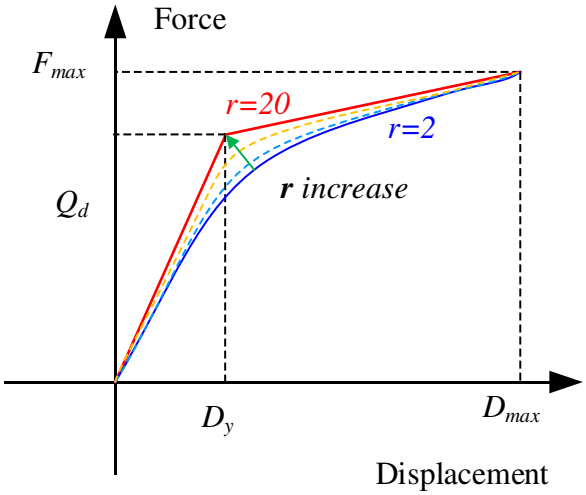


Figure 4. Plastic Wen model

3. Case study

To investigate the seismic nonlinear time history response, a set of numerical analyses for a typical isolated building structure is performed. The selected building structure characterizes the resident buildings in cities where the impact of earthquakes is significant. In addition, the fundamental vibration mode of the structure allows a clear demonstration of the efficiency of SBI. Accordingly, a model 3D of the selected multi-story building that is set up by Etabs software is detailed below:

- The reinforced concrete building has 15 floors. The floor height is 3.9 m for the stories and 3.6 m for the basement. The plan has three bays in the X and Y directions, as shown in Figure 5.

- Structural components include: the cross-section of the main beam systems is 35cm x 75cm (width x depth), the cross-section of the sub-beam is 30cm x 60 cm and the cross-section of the foundation beam is 80cm x100cm. The cross-section dimensions of columns: from the 1st to 6th story 100cm x 100cm; from the 7th to 11th story 90cm x 90cm; from the 12th to the

roof 80cm x 80cm. The concrete wall thickness is 35cm, the floor thickness is 15cm, and the basement floor is 20cm.

- Grade of structural concrete: C35/45 (EN 1993-1-1).

- Load acting: the floor loading: dead load 100 daN/m2, live load 200 daN/m2, and the roof loading: dead load 150 daN/m2, live load 100 daN/m2.

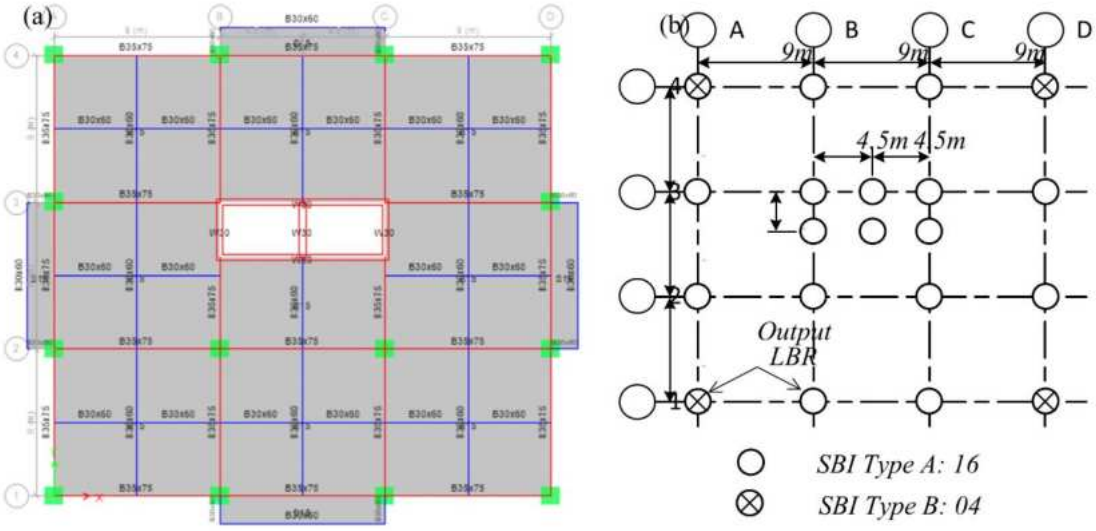


Figure 5. The specific floor plan model of the building analyzed [9]

The building is designed to be supported on soil type C, located in an area with a design ground acceleration of a_{gR} = 0.25g, according to Eurocode 8 [10]. Previous studies have shown no significant difference in the seismic response obtained from nonlinear time-history analyses using earthquake records scaled to match the elastic design spectra and the response spectra, particularly for long periods such as those associated with isolated structures. As a result, the earthquake records are scaled to align with the target spectrum defined by EC8, with 5% damping, to standardize the design procedure across both the spectral analysis (simplified method) and nonlinear time-history analysis methods. For this purpose, a set of historical ground motions is selected, as shown in **Table 1**, and the spectra of the scaled records are presented in Figure 6.

Table 1. Earthquake records selected for analyses [29].

#	Earthquake, station	Nation, date	Mw	R (km)	PGA (g)
Acc1	Northridge, Castaic-Old Ridge Rte	US, 17-01-1994	6,7	41	0,568

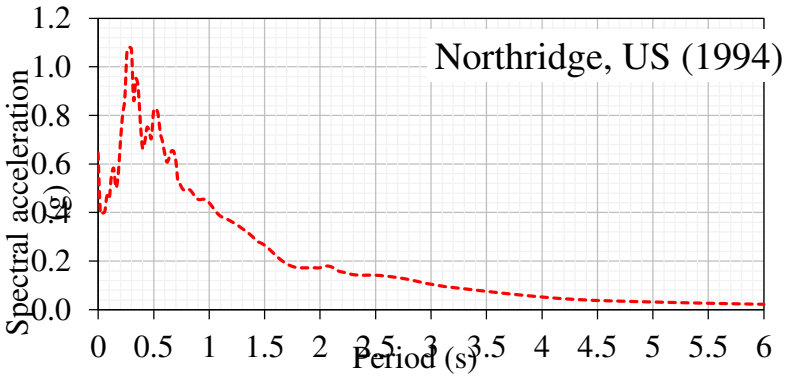


Figure 6. Ground motion time history and spectral acceleration used for the study

The properties of isolators, represented by the constitutive parameters of the models, are detailed as follows:

Rubber isolator model:

Parameters	Type A	Type B
Initial elastic stiffness (kN/m)	65.312	34.188
Yield Strength (kN)	210,000	110,250
Post Yield Stiffness Ratio	0,048	0,048

Bilinear model

Parameters	Type A	Type B
Initial elastic stiffness (kN/m)	65.312	34.188
Post elastic stiffness (kN/m)	3.110	1.628
Yield Strength (kN)	210,000	110,250

Plastic Wen model

Parameters	Type A	Type B
Initial elastic stiffness (kN/m)	65.312	34.188
Yield Strength (kN)	210,000	110,250
Post Yield Stiffness Ratio	0,048	0,048
Yield Exponent:	10	10

Equivalent linear model

Parameters	Type A	Type B
Effective stiffness (kN/m)	4.586	2.400
Effective damping (kNs/m)	233,0295	121,9615

Accordingly, for the nonlinear model (i.e., rubber isolator model, bilinear model, and plastic Wen model), the values of elastic stiffness, post-elastic stiffness, and yield strength are the same. The parameters of an equivalent linear model are determined based on the bilinear model and the elastic response spectrum, iteratively calculating according to the convergence of the design displacement [11].

4. Results and discussion

The seismic responses of seismic isolators, top displacement, and base shear force are selected to evaluate the effects of different behavior models of SBI on the seismic response of the buildings.

Figure 7 shows the hysteresis behavior of different isolator models. The three models including rubber isolator, bilinear, and plastic Wen are observed to provide similar results. In contrast, the lateral displacement and force of the equivalent linear model (magenta dashed line) are significantly higher than the remaining models. Although the damping ratio is determined to be equivalent (the hysteresis loop area is comparable to the remaining models), the effective stiffness value is constant resulting in a lack of nonlinear characteristics in the post-elastic regime, so that the lateral force increases with the displacement rate. From a design perspective, using an equivalent linear model seems to make the structure safer. However, highly conservative designs will significantly reduce the effectiveness of isolators.

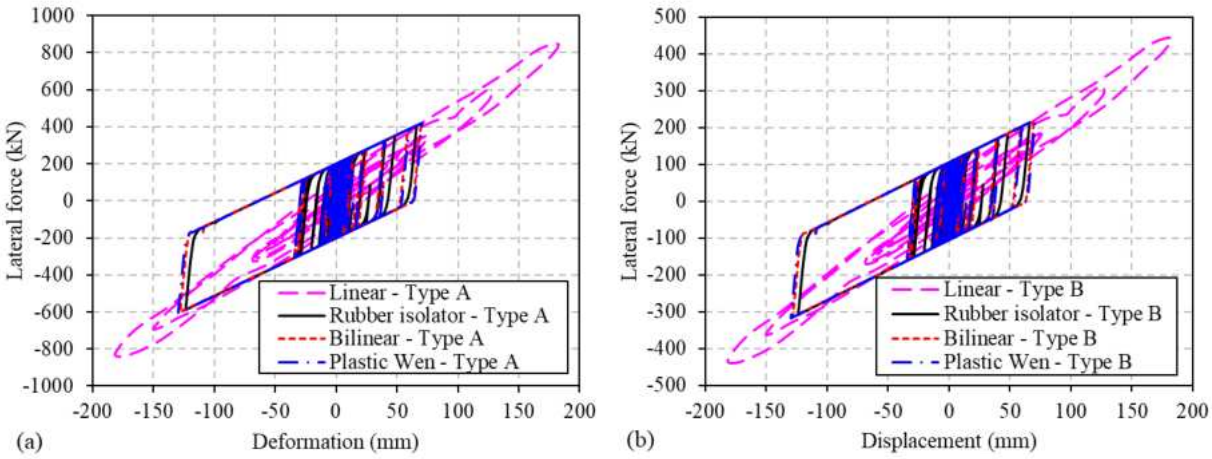


Figure 7. Hysteresis behavior of different models of isolators

Similarly, Figure 8 shows the time-history results of the top displacement and lateral force of the structure. A similar observation of the obtained results shows that the use of equivalent linear models has many limitations compared to nonlinear models.

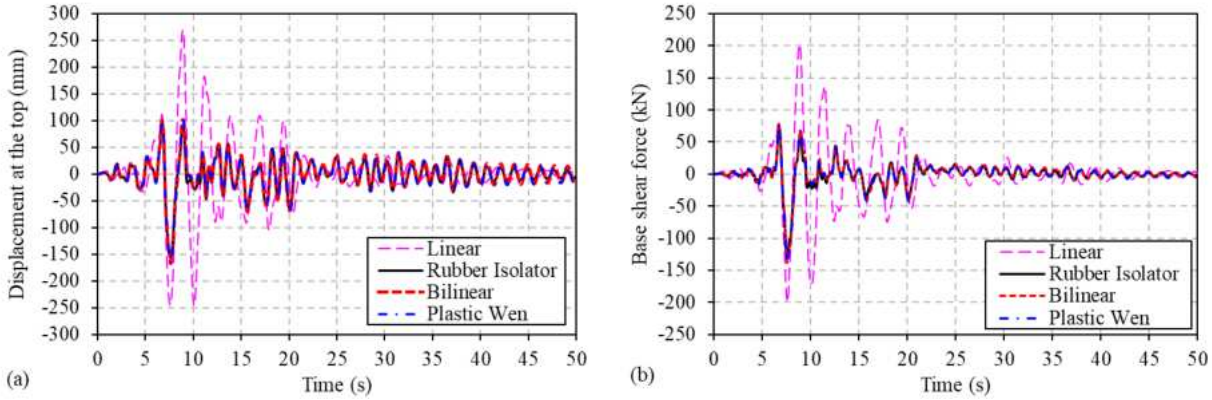


Figure 8. Time-history responses of building: (a) top displacement (b) base shear force

The differences in obtained results are detailed in **Table 2**

Table 2. Comparison of the seismic responses with different models of isolators

Model	Displacement at the top (mm)		Base shear force (kN)	
	max	min	max	min
Linear	269,6	-245,8	202,2	-199,8
Plastic Wen	103,3	-167,4	78,9	-138,6
Bilinear	102,2	-167,2	78,5	-138,1
Rubber Isolator	97,5	-156,9	74,1	-132,1

Despite the similarity in the hysteresis nonlinear of the isolators and the time-history responses of structure, among three models (i.e., plastic Wen, bilinear, and rubber isolator), the plastic Wen model offers the largest displacement and lateral force, followed by the bilinear model, and rubber isolator model gives the smallest results. In the author's opinion, this difference may be due to the curvature control during the transition from elastic to post-elastic regime.

5. Conclusion

In this paper, a numerical study evaluates the impact of different seismic isolator models on the seismic response of isolated buildings. The analysis aims to provide insights into the performance of various modeling approaches and their influence on the dynamic behavior of structures subjected to seismic loading. The characteristics of the seismic isolators are represented through four distinct models, including linear, plastic Wen, bilinear, and rubber isolators.

To assess seismic performance, detailed 3D models of a typical multi-story building are subjected to nonlinear time-history analyses. The analyses employ the Northridge earthquake record (1994), carefully calibrated to match the Eurocode 8 target spectrum. The study examines the evolution of the isolator's behavior, lateral displacements, and base shear forces of structures.

The following preliminary conclusions are drawn from the investigation:

Models plastic Wen, bilinear, and rubber isolator exhibit similar seismic responses, with relatively minor differences. This consistency underscores the significance of accurately capturing the nonlinear behavior of seismic isolators in analytical models.

The equivalent linear model, in contrast, predicts substantially higher displacements and lateral forces compared to the nonlinear models. This discrepancy highlights the limitations of linear assumptions and demonstrates that nonlinear modeling provides a more realistic representation of isolator behavior under seismic loading.

Based on the observed trends, the study strongly advocates for the adoption of nonlinear models in the analysis and design of seismic isolators. These models not only offer improved accuracy but also help engineers better evaluate the performance and safety of seismically isolated buildings.

References

1. Kelly, J.M., *The current status of seismic isolation technology in the United States*. 1992.
2. Buckle, I., et al., *Seismic isolation of highway bridges*. 2006: MCEER, University at Buffalo, the State University of New York.
3. JSSI. *The Japan Society of Seismic Isolation*. 2015; Available from: https://www.jssi.or.jp/english/.
4. Nguyen, X.D. and L. Guizani, *On the application limits and performance of the single-mode spectral analysis for seismic analysis of isolated bridges in Canada.* Canadian Journal of Civil Engineering, 2022. **49**(11): p. 1747-1763.
5. Naeim, F. and J. M. Kelly, *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. 1999, the United States of America: John Wiley & Sons.
6. AASHTO, *Guide specifications for seismic isolation design*. 2014, Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
7. CSA-S6, *CSA-S6-19, Canadian highway bridge design code*. 2019: Canadian Standards Association.
8. ECS, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges*. 2005b: European Committee for Standardization Brussels.

9. Nguyen, V.-T. and X.-D. Nguyen. *Seismic responses of multi-story buildings isolated by Lead-Rubber Bearings considering effects of the vertical stiffness and buckling behaviors*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. IOP Publishing.
10. ECS, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. 2005a: European Committee for Standardization Brussels.
11. Nguyen, V.T., N.Q. Vu, and X.D. Nguyen. *Application of seismic isolation for multi-story buildings in moderate seismicity areas like Vietnam*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. IOP Publishing.

Nghiên cứu mô hình số về ảnh hưởng của các mô hình ứng xử khác nhau của gối cách chấn đến phản ứng động đất của nhà nhiều tầng

***Tóm tắt**: Bài báo này trình bày nghiên cứu mô hình số về ảnh hưởng của các mô hình ứng xử của gối cách chấn khác nhau đến phản ứng động đất của kết cấu nhà cách chấn. Bốn mô hình gối cách chấn khác nhau, bao gồm mô hình tuyến tính tương đương, mô hình dẻo Wen, mô hình song tuyến tính và mô hình gối cao su, được lựa chọn phân tích để đánh giá ảnh hưởng của chúng đối với phản ứng động đất của công trình. Mô hình không gian điển hình của kết cấu nhà nhiều tầng được phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian, sử dụng gia tốc động đất Northridge (1994), và hiệu chỉnh để khớp phổ phản ứng mục tiêu tính theo tiêu chuẩn Eurocode 8. Các thông số chính, bao gồm ứng xử gối cách chấn, chuyển vị ngang và lực cắt đáy được phân tích để làm rõ sự khác biệt giữa các mô hình khác nhau. Kết quả cho thấy các mô hình phi tuyến tính, chẳng hạn như mô hình dẻo Wen, mô hình song tuyến tính và mô hình gối cao su cho thấy các phản ứng động đất có sự tương đồng nhau và phù hợp với thực tế, trong khi mô hình tuyến tính tương đương đưa ra các giá trị quá cao chuyển vị và lực ngang. Kết quả này nhấn mạnh sự hạn chế của mô hình tuyến tính tương dương trong phân tích và khẳng định tầm quan trọng của mô hình phi tuyến tính trong việc đánh giá chính xác hiệu suất chống động đất của gối cách chấn.*

Từ khóa: Gối cách chấn đáy; mô hình ứng xử trễ; phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian; nhà nhiều tầng cách chấn đáy.

Nghiên cứu nhận dạng đặc trưng động của kết cấu chân đế dạng giàn công trình điện gió biển

Nguyen Hong Quang[1], Dao Cong Binh[1], Nguyen Thanh Trung[2]

[1] Le Quy Don Techical University, Ha Noi, Viet Nam

[2] University of Transport and Communications, Ha Noi, Viet Nam

Email: hongquangmta2512@gmail.com, Tel: 0869248685

Tóm tắt

Bài báo này tập trung nghiên cứu, phân tích và so sánh hiệu quả của hai phương pháp nhận dạng đặc trưng động của kết cấu chân đế dạng giàn trong công trình điện gió biển, sử dụng hai thuật toán xử lý và nhận dạng là Biến đổi Fourier nhanh (FFT) và Biến đổi Hilbert-Huang (HHT). Đây là các phương pháp quan trọng để nhận dạng các tham số động lực học như tần số dao động tự nhiên, dạng dao động, đặc biệt trong môi trường biển khắc nghiệt với các tác động phi tuyến và không ổn định. Kết quả nghiên cứu cho thấy HHT có khả năng nhận dạng các đặc trưng động theo thời gian, trong khi FFT hiệu quả hơn với các tín hiệu tuyến tính và ổn định.

Từ khóa: *Đo dao động phản ứng, FFT, HHT, kết cấu chân đế dạng giàn, công trình điện gió biển, tần số dao động riêng.*

1. Giới thiệu chung

Năng lượng gió ngoài khơi đã khẳng định vai trò quan trọng trong hệ thống năng lượng tái tạo toàn cầu. Với sự phát triển nhanh chóng, các turbin gió ngoài khơi (OWT) hiện được lắp đặt ở xa bờ hơn, công suất lớn hơn, và cấu trúc phức tạp hơn [1,2]. Tuy nhiên, điều này dẫn đến các thách thức lớn về độ tin cậy, với hơn 700 vụ tai nạn turbin gió được ghi nhận trong 5 năm qua [3]. Vì vậy, việc phát triển hệ thống giám sát và đánh giá an toàn cấu trúc cho OWT là cần thiết nhằm giảm thiểu sự cố và nâng cao hiệu suất vận hành [4,5].

Kết cấu chân đế dạng giàn, chịu ảnh hưởng trực tiếp từ sóng, gió và dòng chảy, là thành phần quan trọng trong OWT. Các yếu tố này không chỉ ảnh hưởng đến khả năng chịu lực mà còn làm thay đổi các đặc trưng động lực học như tần số dao động riêng, dạng dao động và hệ số cản, từ đó tác động đến độ bền và hiệu quả hoạt động [6,7,22,24]. Giám sát các đặc trưng này cho phép phát hiện sớm hư hỏng và đảm bảo an toàn vận hành [8,9,16].

Nhận dạng đặc trưng động hiện nay chủ yếu dựa trên hai nhóm phương pháp phân tích: miền tần số và miền thời gian. Phương pháp miền tần số gồm 2 phương pháp chính: Biến đổi nhanh Fourier (FFT), giúp tách tín hiệu thành các thành phần tần số để xác định tần số tự nhiên, phù hợp với tín hiệu ổn định, nhưng gặp hạn chế với tín hiệu không ổn định hoặc nhiễu [10,11,12]; và Hàm phản ứng tần số (RSF), xác định mối quan hệ giữa đầu vào (tải trọng) và đầu ra (đáp ứng dao động), cung cấp thông tin về độ cứng và độ cản của kết cấu [13]. Phương pháp miền thời gian gồm 3 phương pháp chính: Biến đổi Fourier ngắn hạn (STFT), phân tích tín hiệu thay đổi theo thời gian, giữ lại thông tin về tần số [14,15]; Biến đổi Wavelet (WT), phù hợp với tín hiệu phi dừng nhờ khả năng điều chỉnh kích thước cửa sổ theo thời gian [16]; và Hilbert-Huang Transform (HHT), kết hợp phân tích EMD và Hilbert để tách tín hiệu thành các chế độ dao động và xác định tần số tức thời [17,18,19].

Bài báo tập trung phân tích và so sánh hiệu quả của FFT và HHT trong nhận dạng đặc trưng động của kết cấu chân đế giàn OWT, đánh giá khả năng xác định các tham số động lực

học trong điều kiện vận hành thực tế, nhằm hướng đến các giải pháp tối ưu hóa giám sát và đảm bảo an toàn cho công trình điện gió ngoài khơi [20,21,22].

2. Cơ sở lý thuyết nhận đặc trưng động của kết cấu kết chân đế điện gió biển

2.1. Phương pháp đo dao động phản ứng

Phương pháp nhận dạng đặc trưng động của kết cấu chân đế điện gió biển dựa trên đo dao động phản ứng nhằm đánh giá chính xác các tham số động lực học trong điều kiện chịu tải trọng phức tạp [6,7]. Việc nhận dạng các đặc trưng này, bao gồm tần số dao động tự nhiên, dạng mode dao động, và hệ số cản, đóng vai trò quan trọng trong đảm bảo an toàn vận hành, phát hiện sớm bất thường và xây dựng chiến lược bảo trì hiệu quả [8,9].

Phương pháp tận dụng mối quan hệ giữa các tham số động lực học và trạng thái vật lý của kết cấu. Những thay đổi trong các tham số này phản ánh sự suy giảm độ cứng, biến dạng hình học hoặc hư hỏng cấu kiện do tác động của môi trường biển và tải trọng vận hành [16,17,18]. Các tín hiệu dao động (gia tốc, dịch chuyển) được thu thập từ hệ thống cảm biến dưới tác động của sóng, gió hoặc kích thích cưỡng bức, sau đó phân tích bằng các thuật toán xử lý tín hiệu để trích xuất đặc trưng động lực học và phát hiện bất thường [10,13,22].

Phương pháp này được thực hiện qua ba giai đoạn chính: thu thập dữ liệu dao động, xử lý tín hiệu và phân tích đặc trưng động [11,14,16].

a) Giai đoạn 1: Thu thập dữ liệu dao động.

Hệ thống cảm biến (cảm biến gia tốc, cảm biến dịch chuyển) được lắp đặt tại các vị trí chiến lược trên kết cấu để thu thập tín hiệu dao động một cách liên tục hoặc định kỳ. Dữ liệu được ghi nhận dưới dạng tín hiệu rung động phản ứng, phản ánh sự tương tác giữa kết cấu và môi trường tác động.

b) Giai đoạn 2: Xử lý tín hiệu.

Dữ liệu thu thập được thường chứa nhiễu và có tính phi tuyến cao. Do đó, các thuật toán xử lý tín hiệu hiện đại được áp dụng để phân tích và trích xuất các tham số động lực học. Biến đổi Fourier nhanh (FFT): Chuyển đổi tín hiệu sang miền tần số để xác định tần số dao động tự nhiên.Biến đổi Hilbert-Huang (HHT): Xử lý các tín hiệu phi tuyến và không ổn định, trích xuất thông số tức thời như tần số và biên độ dao động



Hình 1: Quy trình phân tích dao động

c) Giai đoạn 3: Phân tích đặc trưng động.

Các tham số động lực học như tần số dao động tự nhiên, hệ số cản động, và hình dạng mode dao động được trích xuất. Sự thay đổi các tham số này được so sánh với giá trị tham chiếu để nhận dạng mức độ suy giảm hoặc phát hiện hư hỏng trong kết cấu. Những thay đổi bất thường, chẳng hạn như giảm tần số dao động tự nhiên hoặc tăng biên độ dao động, thường là dấu hiệu của suy giảm độ cứng hoặc hư hỏng cấu kiện.

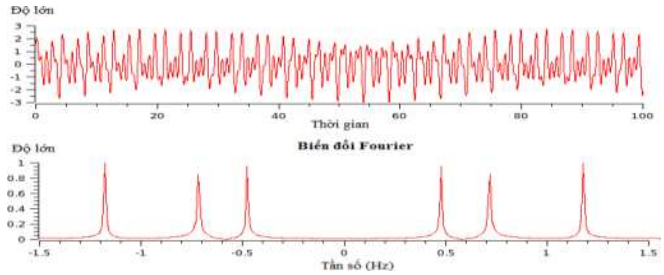
2.2. Thuật toán nhận dạng trong miền tần số FFT

Biến đổi Fourier nhanh (FFT) là phương pháp phổ biến để phân tích tần số dao động của kết cấu. Sử dụng biến đổi Fourier, chúng ta có thể tách tín hiệu thành các thành phần tần số, từ đó xác định tần số tự nhiên của kết cấu [10,11]. Tuy nhiên, phương pháp này có hạn chế trong việc xử lý các tín hiệu không ổn định, đặc biệt là trong các trường hợp có nhiều yếu tố gây nhiễu hoặc phi tuyến tính [12,13]. Phản ứng của hệ thống đối với sự kích thích ngẫu nhiên có thể được biểu diễn dưới dạng một cặp biến đổi Fourier như sau:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-iwt}dt \qquad (1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} X(w)e^{iwt}dw$$

Trong đó, x(t) được gọi là biến đổi Fourier ngược của *X(w)*



Hình 2: Biến đổi Fourier. (Nguồn: Huang et al., 1998 [11]).

Sau khi thực hiện biến đổi Fourier trong miền tần số, các tần số đặc trưng của kết cấu được xác định một cách dễ giàng, giúp ích trong nghiên cứu tín hiệu dao động và phân tích tần số [10,11]. Phép biến đổi Fourier nhanh (FFT) nổi bật với tốc độ tính toán cao, đặc biệt hiệu quả khi xử lý tín hiệu dài hoặc phân tích tín hiệu ổn định với khối lượng dữ liệu lớn [8,9]. Ngoài ra, FFT dễ triển khai nhờ các thuật toán tối ưu, phù hợp với cả các hệ thống hạn chế về hiệu năng [12].

Tuy nhiên, FFT không phù hợp với tín hiệu phi tuyến hoặc các tín hiệu biến đổi mạnh mẽ theo thời gian [13]. Khả năng nhận diện tức thời của FFT cũng bị hạn chế, khiến nó khó phát hiện sự thay đổi nhanh chóng trong môi trường phức tạp [14]. Do đó, việc ứng dụng FFT cần được cân nhắc kỹ lưỡng và có thể kết hợp với các phương pháp khác, chẳng hạn như Hilbert-Huang Transform (HHT), để nâng cao hiệu quả trong các điều kiện phức tạp [15,16].

2.3. Thuật toán nhận dạng trong miền thời gian HHT

HHT (Hilbert-Huang Transform) là một phương pháp phân tích tín hiệu phi tuyến bao gồm hai bước chính: Empirical Mode Decomposition (EMD) và Biến đổi Hilbert [10,11].

Empirical Mode Decomposition (EMD): Biến đổi Hilbert yêu cầu tín hiệu dải hẹp hoặc hàm thành phần đơn để đạt hiệu quả cao. Để đáp ứng yêu cầu này với tín hiệu tổng quát, Huang và cộng sự (1998) đã phát triển EMD [11]. Phương pháp này cho phép phân tích dữ liệu từ các quá trình không dừng kết hợp hiện tượng phi tuyến, trực quan và thích ứng với dữ liệu gốc. Nguyên lý cơ bản dựa trên giả thiết rằng tín hiệu bất kỳ chứa các mode dao động ẩn (Intrinsic Mode Function - IMF), mỗi mode là một dao động đơn giản thỏa mãn các điều kiện sau: Số cực trị và số giao điểm với trục không của tín hiệu bằng nhau hoặc khác đúng 1. Giá trị trung bình của đường bao được xác định bởi các cực đại và cực tiểu bằng 0 tại mọi điểm. Dựa trên nguyên lý này, tín hiệu x(t) có thể được biểu diễn thành tổng các IMF ci(t) và phần r(t):

$$x(t) = \sum_{i=1}^{l} c_i(t) + r_l(t) \qquad (2)$$

Quy trình thực hiện EMD:Xác định cực trị cục bộ: Tìm các cực đại và cực tiểu, xây dựng đường bao trên và dưới. Tính trung bình đường bao: Tính trung bình $m_{1k}(t)$) của hai đường bao, trừ nó khỏi tín hiệu để tạo

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \text{ (khi k=1).} \qquad (3)$$

Kiểm tra điều kiện IMF: Lặp lại bước 1 và 2 cho đến khi $h_{1k}(t)$ thỏa mãn điều kiện IMF. Tách IMF và phần dư: IMF đầu tiên $c_1(t)$ được trích xuất, phần dư $r_1(t)$ được tính: $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$. Tiếp tục lặp lại quy trình trên với phần dư $r_i(t)$ cho đến khi phần dư trở thành hàm đơn hoặc không đáng kể. Quá trình EMD dừng khi: Phần dư nhỏ hơn giá trị ngưỡng và Phần dư là hàm đơn không thể phân tách thêm.

Biến đổi Hilbert: Sau khi tín hiệu được phân tách thành các IMF, mỗi IMF là một tín hiệu dải hẹp phù hợp để thực hiện Biến đổi Hilbert. Biến đổi Hilbert được sử dụng để xác định tức thời biên độ, pha và tần số của từng IMF. Phối hợp EMD và Biến đổi Hilbert tạo thành phương pháp **HHT** (Huang et al., 1998, 1999) [11].

Biến đổi Hilbert cho IMF ci(t) tạo tín hiệu giải tích zi(t):

$$z_i(t) = c_i(t) + jH\left[c_i(t)\right] = a_i(t)e^{j\theta_i(t)} \qquad (4)$$

Trong đó $a_i(t) = \sqrt{c^2{}_i(t) + H^2\left[c_i(t)\right]}$ và $\theta_i(t) = \arctan\left(\frac{H\left[c_i(t)\right]}{c_i(t)}\right)$ là biên độ và pha tức thời đối với IMF thứ i.

Tần số tức thời của IMF ci(t) được tính bằng:

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i}{dt} = \frac{c_i(t)\dot{H}[c_i(t)] - \dot{c}_i(t)H\left[c_i(t)\right]}{a_i^2(t)} \qquad (5)$$

Phổ Hilbert của IMF ci(t) được biểu diễn:

$$HS_i(\omega,t) = \begin{cases} a_i(t), \omega = \omega_i(t) \\ 0, \omega \neq \omega_i(t) \end{cases} \qquad (6)$$

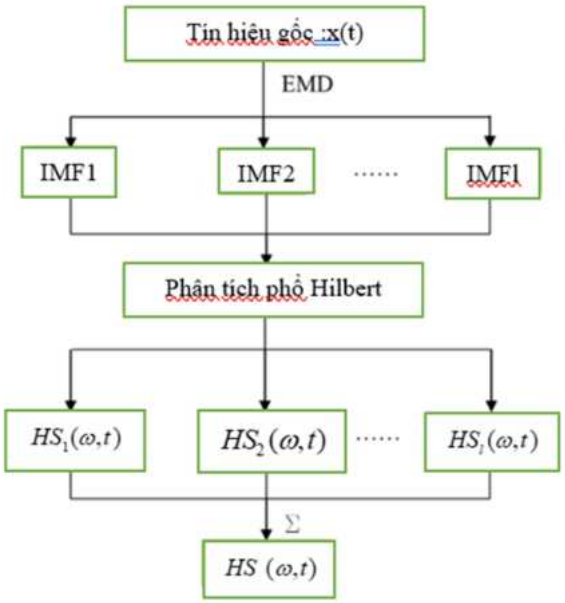
Tín hiệu gốc x(t) được biểu diễn qua các IMF:

$$x(t) = \mathrm{Re}\left[\sum_{i=1}^{l} a_i(t) e^{j\int_0^t \omega_i(\tau)d\tau}\right] \quad (7)$$

Phổ Hilbert của tín hiệu gốc:

$$HS(\omega,t) = \sum_{i=1}^{l} HS_i(\omega,t) \quad (8)$$

Biểu đồ khối tóm tắt quá trình HHT được minh họa trong *Hình 3*.



Hình 3. Biểu đồ khối của quá trình HHT

3. THÍ NGHIỆM MÔ HÌNH VẬT LÝ

Chương trình thí nghiệm được thực hiện dựa trên việc đo phản ứng dao động động của mô hình vật lý của công trình tuabin gió ngoài khơi trong một bể sóng trong phòng thí nghiệm. Kết quả đo phản ứng động của mô hình thí nghiệm sẽ được phân tích, nhận dạng tần số dao động riêng của kết cấu chân đế dạng giàn của công trình điện gió biển.

3.1. Mô hình vật lý

Nguyên mẫu của mô hình vật lý là một công trình tuabin gió ngoài khơi NREL 5 MW126-RWT được hỗ trợ bởi một kết cấu áo khoác thép cố định có bốn chân trong độ sâu nước 42 mét. Kích thước của nguyên mẫu và mô hình vật lý được trình bày trong **Bảng 1.** Quy luật tỷ lệ phải đáp ứng các điều kiện hình học, động lực học. Tỷ lệ hình học lấy bằng λ 1/60 được chọn là phù hợp điều kiện thí nghiệm bể sóng.

Bảng 1. *Kích thước và khối lượng của các thành phần cho mô hình vật lý và nguyên mẫu của tuabin gió ngoài khơi*

Thành phần	Tiết diện	Nguyên mẫu	Mô hình vật lý lý tưởng	Mô hình vật lý thực tế
Turbine				
Đường kính cánh		*Kích thước*	*Kích thước*	*Kích thước*

		L(m)	*L(m)*	*L(m)*
		126	2.1	1.8
Khối lượng (rotor, trục, buồng máy)		*Khối lượng*	*Khối lượng*	*Khối lượng*
		m(Tấn)	*m(kg)*	*m(kg)*
		441	4.1	4.1
Khối lượng cánh (3 cánh)		160	1.4	1.4
Tháp		*Kích thước(m)*	*Kích thước*	*Kích thước*
Chiều cao	H=H1+H2	*126*	*1460*	*1460*
		Kích thước	*Kích thước*	*Kích thước(tương đương)*
		D×t(m)	*D×t(mm)*	*D×t×H(mm)*
Phần 1 (H1)	Ống	*3.87×0.0247 (top)*	*64.5×0.82*	*70×1.5×1000*
Phần 2 (H2)	Ống	*6×0.0351(bottom)*	*100×1.2*	*80×1.5×460*
Kết cấu Jacket		*Kích thước*	*Kích thước*	*Kích thước*
		D×t(mm)	*D×t(mm)*	*D×t(mm)*
Chân chính + Cọc	Ống	1376×46.8	25×1.56	25×1.5
Thanh chéo X1	Ống	610×15	10.2×0.5	10.0×0.5
Thanh chéo X2	Ống	610×15	10.2×0.5	10.0×0.5
Thanh chéo X3	Ống	660×15	11.0×0.5	10.0×0.5
Thanh chéo DX1, DX2	Ống	508×15	8.5×0.5	8.0×0.5
Thanh chéo DX3, DX4	Ống	559×15	9.3×0.5	10.0×0.5
Thanh ngang DH1, DH2, DH3, DH4	Ống	610×15	10.2×0.5	10.0×0.5
Ghi chú: D là đường kính ngoài của thành phần; t là độ dày của thành phần; H là chiều cao của tháp; L là chiều dài của cánh quạt.				

Việc triển khai thiết bị trong bể sóng để thử nghiệm dao động được thể hiện trong **Hình 4**. Ba cảm biến gia tốc được gắn ở đỉnh, giữa và đáy của mô hình thử nghiệm, được ký hiệu là AX1, AX2 và AX3, để đo phản ứng cấu trúc theo hướng sóng. Trục X trùng với hướng tác động của sóng. Các cảm biến gia tốc này được kết nối với thiết bị ghi dữ liệu và máy tính. Một trạm đo sóng đã được lắp đặt trong bể sóng để đo các tham số đầu vào của sóng. Tần số lấy mẫu của thử nghiệm rung động được thiết lập ở mức 1000 Hz.



Hình 4. Thiết lập thử nghiệm rung động trong bể sóng cho mô hình vật lý.

Kích động của mô hình vật lý được xem xét trong mô hình vật lý gồm tác động của sóng, động cơ quay. Sóng tác động là sóng đều dưới dạng đồ thị sine, các đặc trưng sóng đều trong mô hình vật lý này được tính toán từ số liệu sóng khảo sát theo tỷ lệ mô hình, xem **Bảng 1**. Tác động quay của động cơ tuabin được xem xét 6.9 đến 12.1 vòng/phút (rpm) trong trạng thái hoạt động bình thường. Tốc độ được chọn là 7.0 rpm trong nguyên mẫu và 54.3 rpm trong thử nghiệm mô hình, dựa trên quy luật tương tự được chỉ định trong Bảng 4.

Bảng 2. Đặc điểm sóng của nguyên mẫu và mô hình vật lý.

Hạng mục	**Tham số sóng**			
	Chiều cao tối đa H_{max} (m)	Thời gian trung bình T (s)	Chiều cao quan trọng H_s (m)	Độ sâu nước d (m)
Nguyên mẫu	10.7	10.20	5.75	42
Mô hình vật lý	0.2	1.5 (0.67Hz)	0.10	0.7

Bảng 3. Tần số tốc độ rotor của nguyên mẫu và mô hình vật lý.

Hạng mục	**Tần số tốc độ quay**	
	Vòng/phút (rpm)	Hz
Nguyên mẫu	7.0	0.117
Mô hình vật lý lý tưởng	54.3	0.904
Mô hình vật lý thực tế	50.0	0.816

Trong nghiên cứu này, ta xem xét hai trường hợp

Trường hợp nghiên cứu	Kích động	
	Sóng đều Tần số sóng (Hz)	Động cơ quay Tần số quay (Hz)
TH1	-	0.816 Hz
TH2	0.2	0.816 Hz

4. Mô hình số

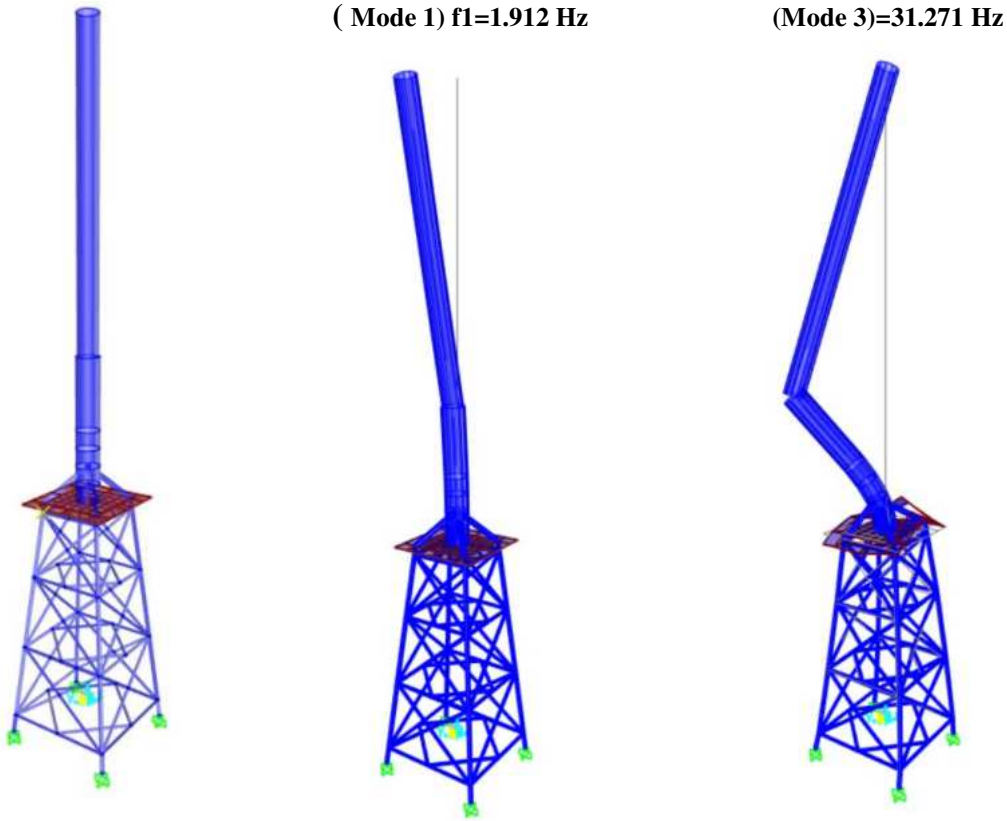
Phân tích giá trị riêng trên mô hình số được thực hiện để ước tính các tần số dao động tự nhiên cơ bản của mô hình vật lý của cấu trúc turbin gió ngoài khơi. Các tần số này được so sánh và đánh giá với tần số kết cấu được xác định bằng phép đo đáp ứng động sử dụng thuật toán nhận dạng FFT, HHT. Trong nghiên cứu này, mô phỏng số được thực hiện bằng chương trình phần tử hữu hạn SAP 2000.

Hình 3(a) cho thấy mô hình số 3D của mô hình vật lý của cấu trúc turbin gió jacket ngoài khơi. Tháp và cấu trúc jacket được mô hình hóa dưới dạng các thanh ống đàn hồi, và các cánh quạt được mô hình hóa dưới dạng các thanh cứng. Khối lượng của máy turbin và cánh quạt được gán tại đỉnh tháp; giá trị của nó được xác định dựa trên quy luật tương tự trong Bảng 2. Khối lượng của các cánh quạt được tập trung vào điểm trung tâm của rotor. Điều kiện biên được hạn chế chống lại cả chuyển dịch và xoay tại đầu của cấu trúc jacket.

Bảng 4 trình bày tần số tự nhiên thứ nhất cùng với tỷ lệ khối lượng tham gia. Có thể nhận thấy rằng tổng tỷ lệ khối lượng tham gia dao động đối với hai dạng dao động này là 67% trong tất cả các trường hợp. Điều này có nghĩa là tần số tự nhiên thứ nhất và thứ hai là tần số chính và cơ bản của cấu trúc turbin. Tần số thứ nhất gần bằng tần số thứ hai trong hướng chính X-Y, điều này có thể được giải thích bởi sự đối xứng của mô hình vật lý.

Bảng 4. *Bảng phân tích các mode dao động*

No	Chu kì (s)	Tần số (Hz)	Tỷ lệ khối lượng tham gia dao động			Note
			UX	UY	UZ	
Mode 1	0.523	1.912	0.19	0.21	0.000	Trong hướng chính XY
Mode 2	0.521	1.921	0.21	0.19	0.000	Trong hướng chính XY
Mode 3	0.032	31.271	0.048	0.051	0.000	Trong hướng chính XY
Mode 4	0.031	31.893	0.049	0.048	0.000	Trong hướng chính XY



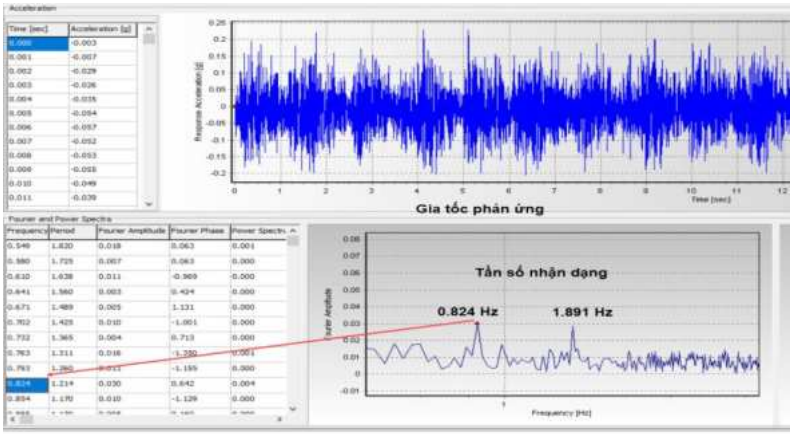
a) Mô hình số của mô hình vật lý *b) Dạng dao động cơ bản thứ nhất* *c) Dạng dao động cơ bản thứ hai*

Hình 5. Mô hình số của kết cấu điện gió biển

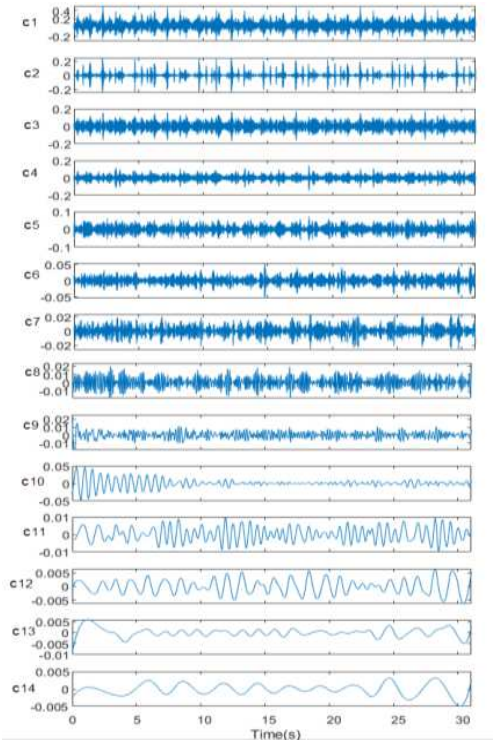
5. Kết quả và thảo luận

Nhận dạng tần số dao động riêng của kết cấu chân đế điện gió biển sử dụng thuật toán FFT và HHT

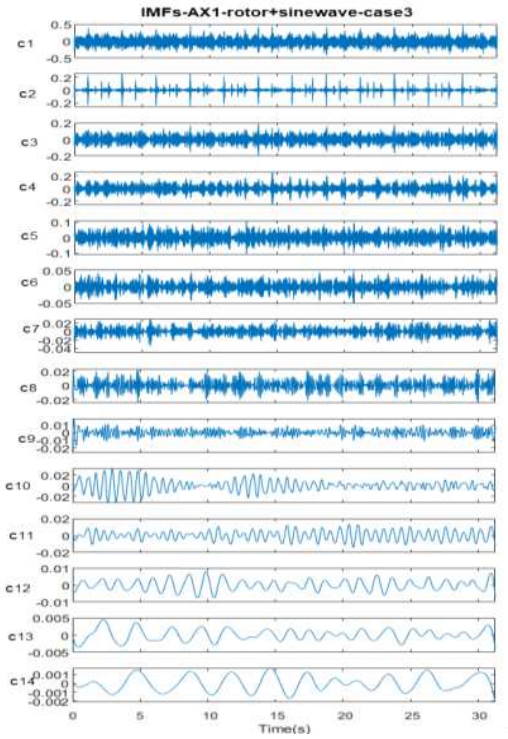
Hình 6 chỉ ra hai tần số được nhận dạng sử dụng thuật toán FFT trong trường hợp TH1, bao gồm tần số dao động riêng thứ 1 và tần số quay của động cơ lần lượt là 0.824 Hz và 1.891Hz. Các tần số này khá tương tự với tần số tần dao động riêng tính toán trong mô hình số, **Bảng 4** và tần số quay động cơ của mô hình vật lý **Bảng 3**



Hình 6. *Tần số dao động riêng kết cấu nhận dạng theo thuật toán FFT theo phương pháp bắt đỉnh*



Hình 7. Phân tách EMD trong TH1

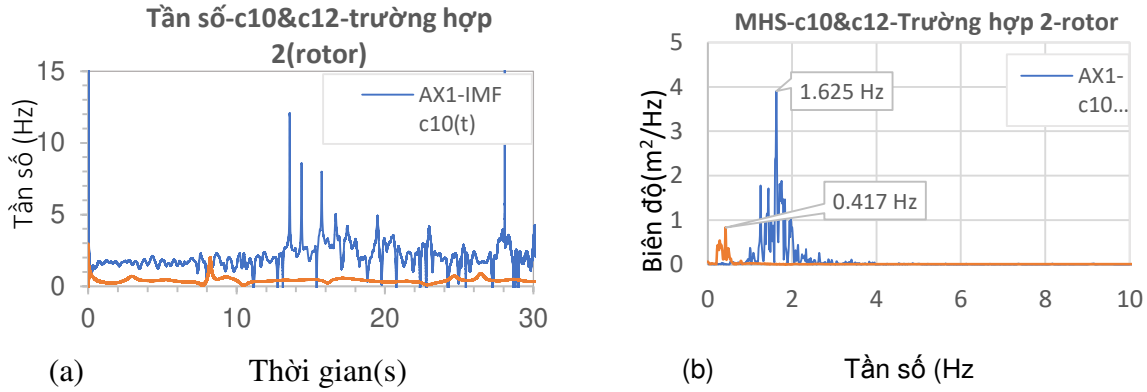


Hình 8. Phân tách EMD trong TH2

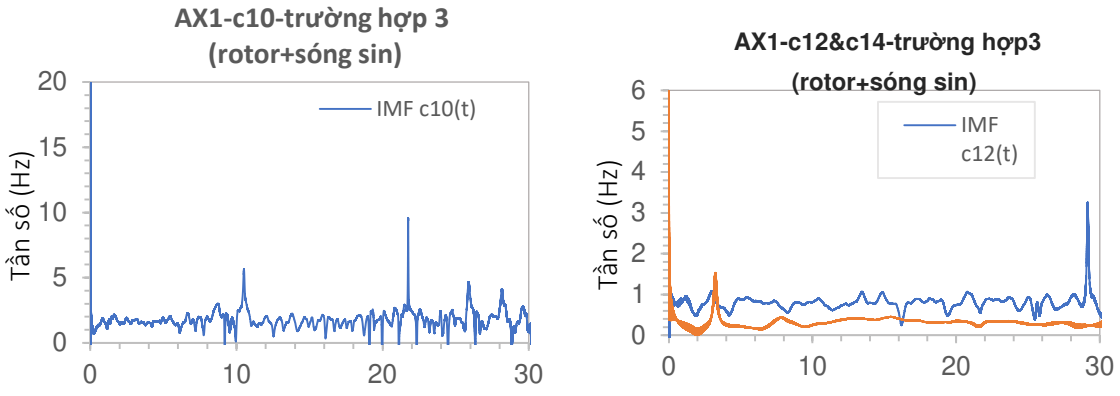
Hình 7 và 8 chỉ ra các phân tách EMD cho hai trường hợp TH1 có tác động động cơ quay và TH2 tác động đồng thời của cả động cơ và sóng điều hòa

Hình 9 chỉ ra các tấn số nhận dạng theo miền thời gian và giá trị của chúng sử dụng thuật toán HHT cho trường hợp TH1

Hình 10 chỉ ra các tấn số nhận dạng theo miền thời gian và giá trị của chúng sử dụng thuật toán HHT cho trường hợp TH2 có tác động đồng thời động cơ quay và sóng



Hình 9. Trường hợp TH1: (a) Tần số theo thời gian; and (b) Phổ Hilbrert



(a) Thời gian(s)

b) Thời gian(s)

Hình 10. Trường hợp TH2: (a) Tần số theo thời gian; and (b) Phổ Hilbrert

6. Kết luận

Nghiên cứu này đã tiến hành phân tích và so sánh hai phương pháp xử lý tín hiệu, Biến đổi Fourier Nhanh (FFT) và Biến đổi Hilbert-Huang (HHT), để nhận dạng đặc trưng động lực học của kết cấu chân đế dạng giàn công trình điện gió biển, tập trung chủ yếu vào việc so sánh, đánh giá tần số dao động riêng (chu kỳ) của công trình. Thông qua các thí nghiệm thực địa với sự kết hợp giữa kích thích nhân tạo và kích thích môi trường xung quanh, các kết quả thu được đã làm sáng tỏ những ưu điểm, hạn chế và tiềm năng ứng dụng của mỗi phương pháp trong việc xác định tần số dao động riêng, một trong các đặc trưng động lực học quan trọng (bao gồm tần số, dạng dao động riêng, hệ số cản, gia tốc, vận tốc, chuyển vị, tỷ lệ khối lượng tham gia dao động,…).

1. Hiệu quả nhận dạng đặc trưng động lực học (tần số dao động riêng):

Phương pháp FFT cho thấy khả năng phân tích tín hiệu nhanh chóng và chính xác đối với các tín hiệu ổn định và tuyến tính. Kết quả từ FFT phù hợp để xác định tần số dao động tự nhiên cơ bản trong điều kiện kích thích nhân tạo, nhờ tốc độ xử lý nhanh và yêu cầu tính toán thấp. Tuy nhiên, FFT bị hạn chế khi áp dụng cho các tín hiệu phi tuyến hoặc không ổn định, đặc biệt là trong môi trường biển với nhiều yếu tố gây nhiễu.

Phương pháp HHT vượt trội trong việc phân tích các tín hiệu phi tuyến và không ổn định. HHT không chỉ xác định được các tần số tự nhiên mà còn cung cấp thông tin tức thời về sự thay đổi động lực học của kết cấu, điều này đặc biệt hữu ích để phát hiện sớm các bất thường và giám sát tình trạng kết cấu trong điều kiện thực tế.

2. Ứng dụng kích thích môi trường xung quanh:

Kích thích từ môi trường xung quanh được chứng minh là phương pháp hiệu quả và kinh tế để đo lường phản hồi động lực học. Trong môi trường biển, nơi các tín hiệu thường có

tính phi tuyến và không ổn định, phương pháp HHT cho thấy ưu thế vượt trội trong việc xử lý và phân tích các tín hiệu này.

3. Hạn chế trong nhận dạng tần số tự nhiên xoắn:

Cả FFT và HHT đều không nhận dạng được tần số tự nhiên xoắn của kết cấu chân đế dạng giàn công trình điện gió biển. Hạn chế này có thể xuất phát từ việc khối lượng modal tham gia trong các hình dạng rung động tự nhiên không đủ rõ ràng trong các phép đo thực nghiệm. Đây là vấn đề cần được nghiên cứu sâu hơn trong tương lai để nâng cao độ chính xác của các phép nhận dạng.

4. Kết luận nghiên cứu:

Nghiên cứu đã chứng minh rằng HHT là một công cụ mạnh mẽ trong phân tích tín hiệu động lực học trong môi trường biển phức tạp, nơi mà FFT chỉ đạt hiệu quả tối ưu trong các điều kiện tín hiệu ổn định. Sự khác biệt này không chỉ giúp hiểu rõ hơn về động lực học của kết cấu chân đế dạng giàn công trình điện gió biển mà còn mở ra hướng nghiên cứu mới để phát triển các phương pháp kết hợp giữa FFT và HHT nhằm khắc phục các hạn chế của từng phương pháp đơn lẻ.Nghiên cứu này đã tiến hành phân tích và so sánh hai phương pháp xử lý tín hiệu, Biến đổi Fourier Nhanh (FFT) và Biến đổi Hilbert-Huang (HHT), để nhận dạng đặc trưng động lực học của kết cấu chân đế dạng giàn công trình điện gió. Thông qua các thí nghiệm thực địa với sự kết hợp giữa kích thích nhân tạo và kích thích môi trường xung quanh, các kết quả thu được đã làm sáng tỏ những ưu điểm, hạn chế và tiềm năng ứng dụng của mỗi phương pháp.

Tài liệu tham khảo

[1] Luengo, M.M.; Kolios, A. Failure Mode Identification and End of Life Scenarios of Offshore Wind Turbines:A Review. Energies 2015, 8, 8339–8354.

[2] Li, Z.; Chen, S.; Ma, H.; Feng, T. Design defect of wind turbine operating in typhoon activity zone.Eng. Fail. Anal. 2013, 27, 165–172.

[3] Seyr, H.; Muskulus, M. Safety Indicators for the Marine Operations in the Installation and Operating Phase of an Offshore Wind Farm. Energy Procedia 2016, 94, 72–81.

[4] Ozbek, M.; Rixen, D.J. Operational modal analysis of a 2.5 MW wind turbine using optical measurement techniques and strain gauges. Wind Energy 2013, 16, 367–381.

[5] G.H. James, T.G. Carne, J.P. Lauffer, Sandia National Laboratories, The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures, Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis 10(4) (1995) 260–277.

[6] S.R. Ibrahim, E.C. Mikulcik, A method for direct identification of vibration parameters from the free response, The Shock and Vibration Bulletin 47 (4) (1977) 183–198

[7] Mohanty, P.; Rixen, D.J. Modified ERA method for operational modal analysis in the presence of harmonic excitations. Mech. Syst. Signal Process. 2006, 20, 114–130.

[8] Peeters B, de Roeck G. Reference based stochastic subspace identification in civil engineering. Inverse Problems in Engineering. 2000;8(1):47–74

[9] Cohen L. Time–frequency analysis. 1st ed. NJ: Prentice-Hall; 1995

[10] N.E. Huang, and S.S.P. Shen, Hilbert-Huang Transform and Its Applications, World Sci., Singapore (2014) 399 pp.

[11] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., and Liu, H. H. (1998)."The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for

nonlinear and nonstationary time series analysis." Proceedings of the Royal Society Mathematical Physical and Engineering Sciences, 454(1971), 903-995.

[12] Z.H. Wu, N.E. Huang, Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method, Advances in Adaptive Data Analysis 1 (2009)1–41.

[13] Kunwar, A., Jha, R., and Whelan, M. and Janoyan, K. Damage detection in an experimental bridge model using Hilbert–Huang transform of transient vibrations. Struct. Control Health Monit. 2013. 20(1): 1-15.

[14] Reddy, M., Praveen Krishna, O., and Sathesa. Innovative method of empirical mode decomposition as spatial tool for structural damage identification. Struct. Control Health Monit. 2015. 22(2): 365-373.

[15] Aied, H., Gonz alez, A., and Cantero, D. Identification of sudden stiffness changes in the acceleration response of a bridge to moving loads using ensemble empirical mode decomposition", Mech. Syst. Signal Process., 66- 67, pp. 314-338 (2016).

[16] Liu J, Li H, Wang Y, Hu A (2009) Modal parameters identification of offshore platform structures using HHT method. In: Proceedings of the nineteenth international offshore and polar engineering conference, Osaka, Japan, pp 242–248.

[17] N.T. Trung. Application of the Hilbert–Huang transform to identify the dynamic characteristics of a caisson foundation during liquefaction. Structural Control and Health Monitoring. 26(10):1–16

[18] N.T. Trung. EEMD-HT transform for identifying modal parameters of fixed offshore jacket platforms using vibration response measurement. Civil Structural Health Monitoring. 10, pp. 883–897 (2020).

[19] N.T. Trung, N.H. Hung, N.D.T.T Dinh, T.T.K Chi, B.N. Dung and V.D. Chinh. Detection of the instantaneous frequency degradation due to damages of a fixed offshore jacket platforms using the iEEMD-based Hilbert Huang transform under a wave excitation. Structural Control and Health Monitoring e3129 (2022)

[20] Y. Amirat, M. Benbouzid, T. Wang, et al., Performance analysis of an EEMD-based Hilbert Huang transform as a bearing failure detector in wind turbines. IEEE ICGE 2014, Mar 2014, Sfax, Tunisia. pp.193-198. (HAL-01023502)

[21] Dingguo Lu, Wei Qiao, Xiang Gong, and Liyan Qu. Current-Based Fault Detection for Wind Turbine Systems via Hilbert-Huang Transform. IEEE 2013 Power & Energy Society General Meeting - Vancouver, BC 2013 1-5pp.

[22] Darryll J. Pines and Liming W. Salvino. Chapter 28 Damage detection using the Hilbert-Huang transform. Encyclopedia of Structural Health Monitoring (2009).

[23] C. Shumin, A. S. J. Swamidas and J. J. Sharp. Similarity method for modellings hydro-elastic offshore platforms. Ocean Engineering, 23(7) (1996) 575–595.

[24] N.T. Trung and N.A. Dan. Analysing vibration responses to predict water-added mass and hydrodynamic damping in offshore jacket structures. Journal of Ships and Offshore Structures, 2024. https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2398269

Research on identification of dynamic characteristics of offshore wind turbine foundation jacket structure

Abstract: *This paper focuses on researching, analyzing and comparing the effectiveness of two methods for identifying the dynamic characteristics of the offshore wind turbine foundation jacket structure, using two processing and identification algorithms - Fast Fourier Transform (FFT) and Hilbert-Huang Transform (HHT). These are important methods for identifying dynamic parameters such as natural vibration frequencies, vibration modes, especially in the harsh marine environment with nonlinear and unstable effects. The research results show that HHT has the ability to identify time-dependent characteristics, while FFT is more effective with linear and stable signals.*

Keywords: Vibration response measurement, FFT, HHT, offshore wind turbine foundation jacket structure, natural frequency.

Nghiên cứu sử dụng kết cấu khối xếp dạng vòm làm giải pháp chống tạm trong xây dựng công trình ngầm

Nguyễn Văn Hùng*

**Học viện KTQS*

Email: hungnguyen252@gmail.com; Tel: 0975319569

Tóm tắt

Sau khi đào hầm cần phải chống tạm ngay để đảm bảo an toàn cho người và trang thiết bị trong quá trình thi công. Các giải pháp kết cấu chống tạm có thể là: các khung chống bằng gỗ, thép, bê tông cốt thép lắp ghép, neo các loại, ... Dạng chống tạm bằng các khối xếp (gạch, đá, bê tông đúc sẵn,...) cũng được sử dụng từ xa xưa. Dạng kết cấu này ít bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường như nhiệt độ, độ ẩm,… và không cần chất kết dính hay liên kết giữa các khối với nhau. Điều này có ý nghĩa rất lớn đối với những công trình có thời gian thi công kéo dài. Nội dung của bài báo nghiên cứu sự làm việc của các dạng kết cấu khối xếp dạng vòm trong môi trường đất đá. Từ đó đưa ra giải pháp thiết kế kết cấu chống tạm có thể áp dụng chống tạm trong thi công hầm hiện nay.

Từ khóa: *Kết cấu khối xếp; hệ khối xếp dạng vòm hình tròn; đường truyền lực nén.*

1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

1.1. Các giải pháp chống tạm được sử dụng hiện nay

Các công trình ngầm được xây dựng trong lòng đất, trong lòng núi, có quy mô không lớn nhưng liên quan đến nhiều giải pháp kỹ thuật, chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố chi phối. Tùy thuộc vào đặc điểm điều kiện tự nhiên của đất đá mà cần thực hiện chống tạm hoặc không. Đối với đất đá cứng, đồng nhất, không nứt nẻ thì có thể không cần chống tạm. Nhưng trong thực tế, không thể tránh khỏi những đoạn đất đá bị phong hóa nứt nẻ, nước ngầm xuất hiện hoặc những vùng đất đá mềm rời… dễ gây sụt lở đòi hỏi phải chống tạm để đảm bảo an toàn cho người và các phương tiện thi công quá trình xây dựng công trình ngầm.



Hình 1. Sử dụng kết cấu chống tạm bằng thép hình trong khai thác khoáng sản



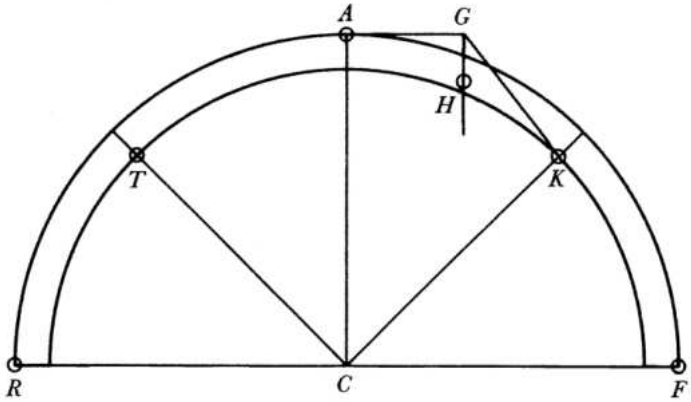
Hình 2. Sử dụng kết cấu chống tạm bằng gỗ trong xây dựng công trình ngầm quân sự

Hiện nay, các biện pháp thường áp dụng là sử dụng khung chống tạm bằng gỗ hoặc thép hình. Các dạng khung chống này phụ thuộc vào điều kiện cung cấp vật liệu tại chỗ của khu vực xây dựng và hệ số độ tin cậy giảm dần theo thời gian do ảnh hưởng bởi các tác nhân của môi trường bên ngoài như nhiệt độ, độ ẩm,…

1.2. Các kết quả nghiên cứu trước đó về kết cấu khối xếp dạng vòm

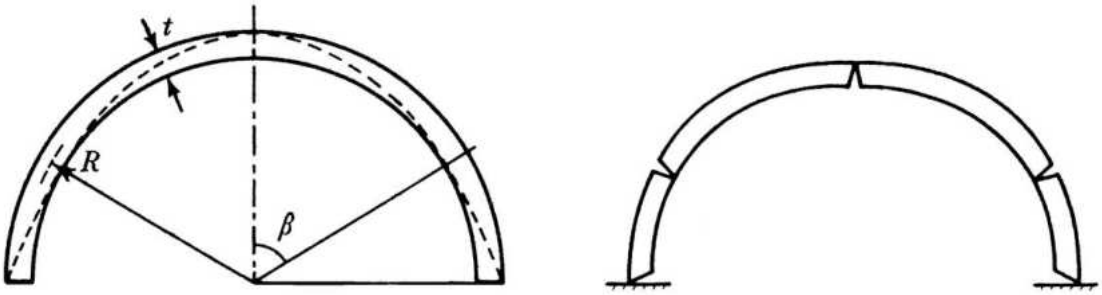
Robert Hooke (1635-1703) đã mô tả sự tương đồng về sự làm việc giữa treo một chuỗi hạt với một vòm dạng khối xếp. Xuất phát từ ý tưởng của Robert Hooke, Couplet (1730) đã đưa ra định nghĩa đường truyền lực nén trong khối xếp dạng vòm để xác định cơ chế làm việc ổn định và chiều dày tối thiểu của khối vòm khi chịu tải trọng bản thân.

Theo Couplet, hệ vòm khối xếp sẽ mất ổn định, sụp đổ thành 4 phần do sự hình thành của 5 khớp xoay trong hệ tại A, T, K, R và F như hình 3. Từ sự phân tích cân bằng tĩnh của hệ có thể xác định được mối quan hệ giữa chiều dày t của khối hệ với bán kích hệ khối xếp R. Couplet xác định được chiều dày tối thiểu của hệ vòm khối xếp dưới tác dụng của trọng lượng bản thân là t/R=0,101 [5]. Tuy nhiên tác giả chưa xác định được chính xác vị trí các khớp xoay T và K, được giả thiết tại vị trí góc $\beta=45^0$. Phân tích cân bằng tĩnh của khối AK, lực tác dụng tại A có phương nằm ngang và biểu diễn bằng AG; trọng lượng của khối đi qua trọng tâm H và biểu diễn bằng GH. Khi đó lực truyền tại K phải có phương trùng với GK và có thể thấy rằng GK không phải là tiếp tuyến với mặt trong của hệ vòm khối xếp tại K.



Hình 3. Mô hình phân tích của Couplet (1730)

Sau này, Heyman (1972) đã sử dụng cơ chế mất ổn định của Couplet để phân tích hệ vòm khối xếp hình tròn, nhưng đảm bảo rằng đường truyền lực nén tại khớp trên mặt trong của hệ là tiếp tuyến. Khi đó vị trí của khớp T và K được xác định tại vị trí góc $\beta=58,8^0$ và giá trị chiều dày tối thiểu của khối hệ là t/R=0,106 [3,4].



Hình 4. Việc xác định chiều dày tối thiểu t của hệ vòm và cơ chế mất ổn định

Ochsendorf (2006), sau khi chỉ ra những điểm bất hợp lý của các nghiên cứu trước đó đã đưa ra kết quả với chiều dày tối thiểu của khối vòm bán nguyệt t/R=0,10748 và vị trí của khớp xoay trên mặt trong của khối vòm là $\beta=54{,}484^0$ [1].

Nếu theo giả thiết của Hooke, chiều dày tối thiểu của một hệ khối xếp dạng vòm hình tròn để bao được đường cong của "chuỗi hạt treo ngược" là t/R=0,11166. Giá trị này còn lớn hơn các kết quả nêu trên và thường được sử dụng trong thiết kế để thiên về sự an toàn [6].

Trong kết quả nghiên cứu trước đó, tác giả đã đánh giá ảnh hưởng của số lượng khối trong hệ khối xếp dạng vòm hình tròn đến chiều dày tối thiểu để hệ ổn định dưới tác dụng của trọng lượng bản thân. Khi số lượng khối trong vòm lớn hơn 18 (góc chắn cung của một khối $<=10^0$) thì số lượng khối trong vòm ít ảnh hưởng tới chiều dày yêu cầu nhỏ nhất của mái vòm và giá trị này là t/R=0,127 [7].

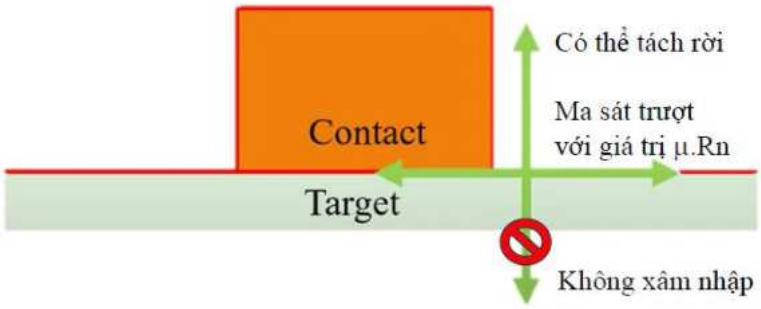
Khi khối vòm nằm trong môi trường đất đá, chiều dày mái vòm đạt t/R=0,14 thì hệ đảm bảo ổn định về mặt hình học đối với bất kì điều kiện địa chất nào. Tuy nhiên, nếu tải trọng do áp lực đất đá gây ra quá lớn thì cần kiểm tra về mặt chịu bền của vật liệu kết cấu khối xếp [7].

Như vậy, các nội dung nghiên cứu về hệ khối xếp dạng vòm đã nêu ở trên chủ yếu vẫn dựa trên việc phân tích một đường truyền lực nén tồn tại trong hệ và thiết kế kết cấu đảm bảo chiều dày của các khối bao trọn được đường truyền lực nén giả định.

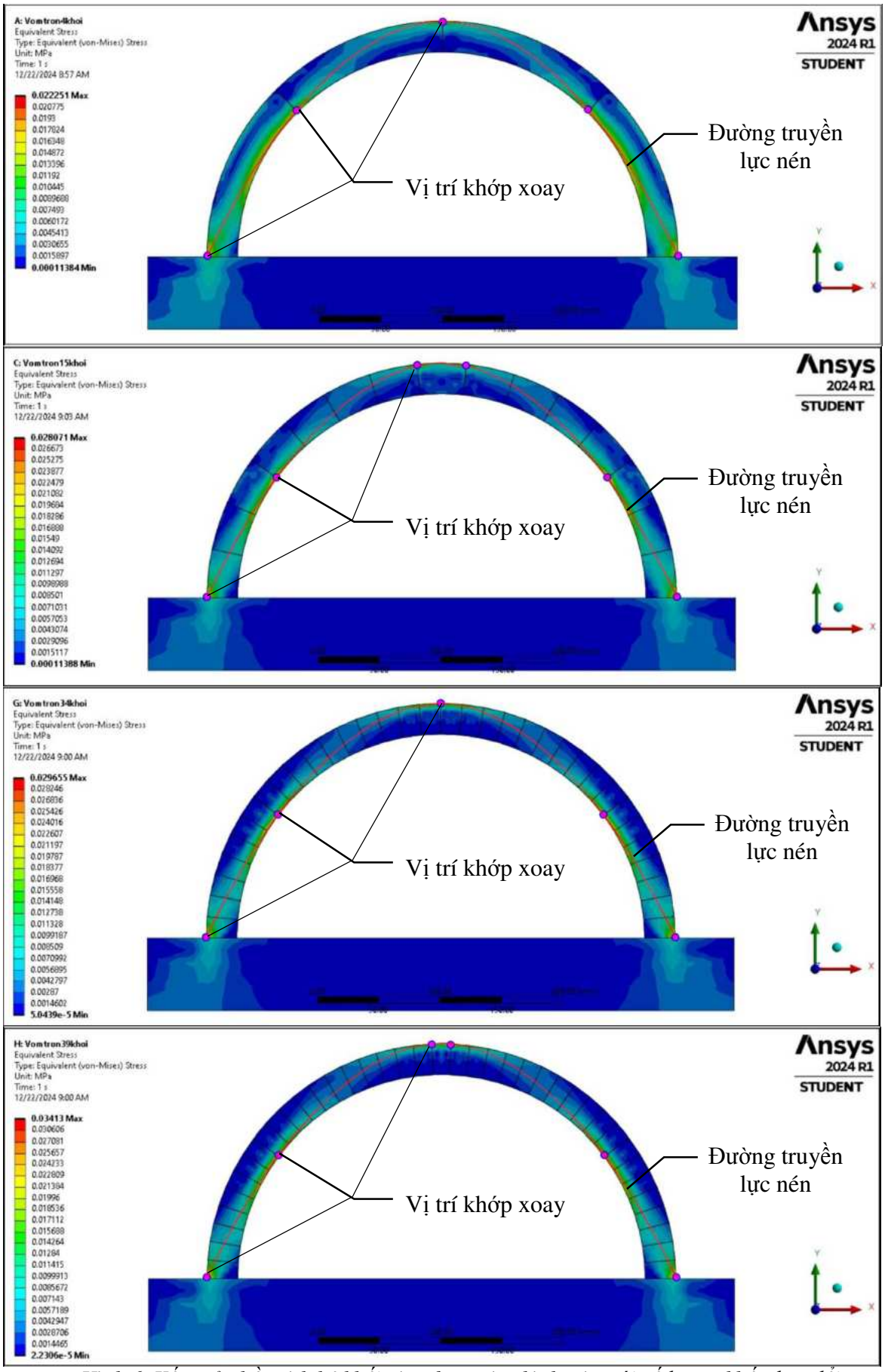
2. Nghiên cứu trên mô hình số

2.1. Nghiên cứu sự làm việc của hệ khối xếp dạng vòm hình tròn

Mô hình số được nghiên cứu sử dụng phần mềm Ansys để phân tích. Để nghiên cứu sự làm việc của hệ mái vòm hình bán nguyệt, sự tương tác lực giữa các khối trong vòm được xem xét thông qua việc phân tích sự phân bố ứng suất trong khối hệ. Mô hình được nghiên cứu với chiều dày kết cấu khối vòm là t/R=0,14; số lượng khối trong hệ thay đổi để đánh giá sự phụ thuộc. Trong mô hình, mô tả tương tác giữa các khối là tương tác tiếp xúc có ma sát (Frictional).



Hình 5. Mô hình tương tác giữa các khối trong hệ khối xếp dạng vòm

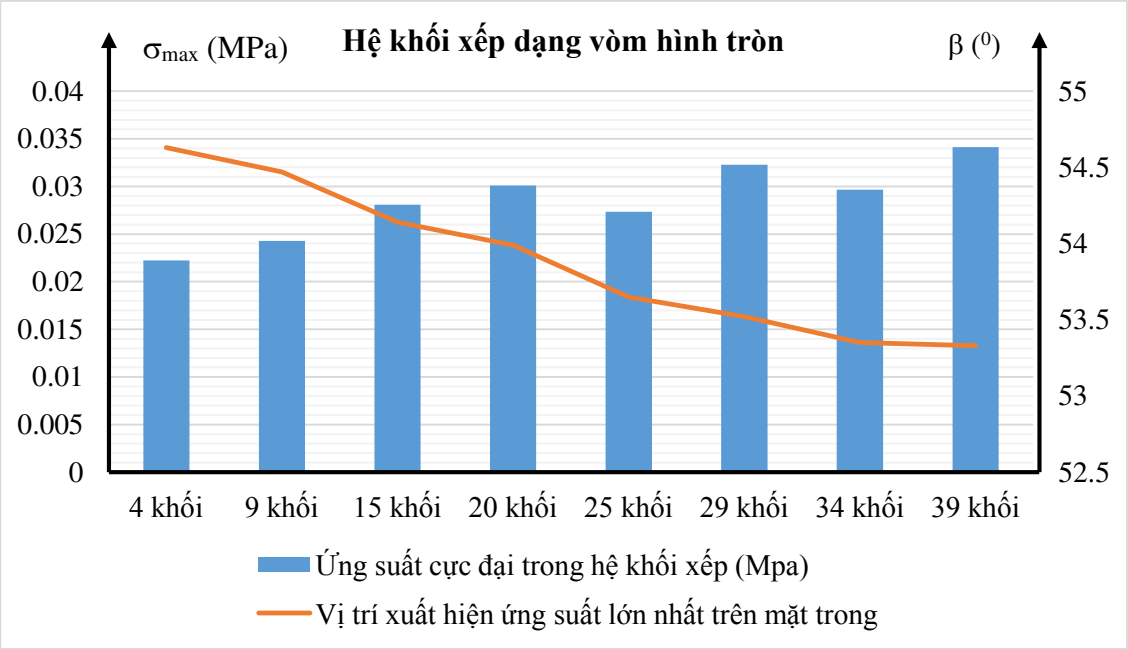


Hình 6. Kết quả phân tích hệ khối vòm dạng vòm hình tròn với số lượng khối thay đổi

Bảng 1. Kết quả phân tích trên mô hình số khối xếp dạng vòm hình tròn

Số lượng khối vòm trong hệ (N)	Ứng suất cực đại trong hệ khối xếp σ_{max} (Mpa)	Vị trí xuất hiện ứng suất lớn nhất trên mặt trong β (^{0})
4 khối	0,022251	54,63
9 khối	0,024293	54,47
15 khối	0,028071	54,14
20 khối	0,030108	53,99
25 khối	0,027349	53,65
29 khối	0,032281	53,52
34 khối	0,029655	53,35
39 khối	0,034130	53,33

**β là góc hợp bởi bán kính đi qua khớp xoay tại mặt trong và phương thẳng đứng*



Từ kết quả nghiên cứu trên mô hình số có thể thấy rằng:

- Khi chịu tác dụng của trọng lượng bản thân, sự tương tác giữa các khối trong hệ khối xếp hình bán nguyệt có xu hướng tuân theo một đường truyền lực xác định không phụ thuộc vào số lượng khối trong hệ. Đường truyền lực này có dạng đường cong "chuỗi hạt treo ngược" như theo Robert Hooke (1635-1703).

- Trong khối hệ sẽ hình thành các khớp xoay tại 5 vị trí: 1 khớp tại đỉnh mái vòm và 2 khớp tại chân nằm ở mặt ngoài của khối hệ; 2 khớp ở mặt trong của khối hệ và xuất hiện tại vị trí tùy thuộc vào vị trí tiếp giáp giữa 2 khối nằm trong phạm vi góc từ $\beta=42^0$ đến $\beta=64^0$.

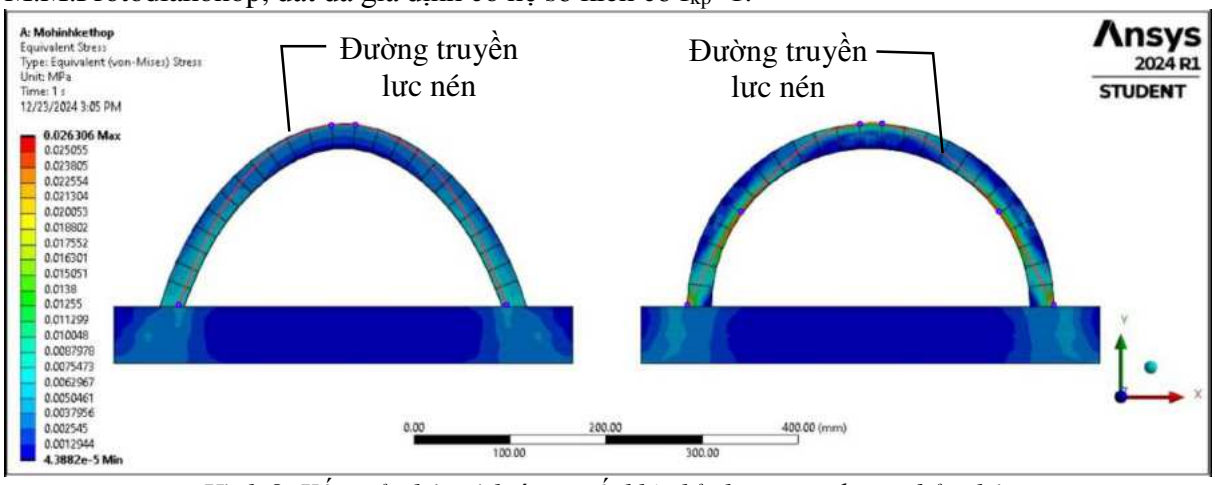


a) *b)*

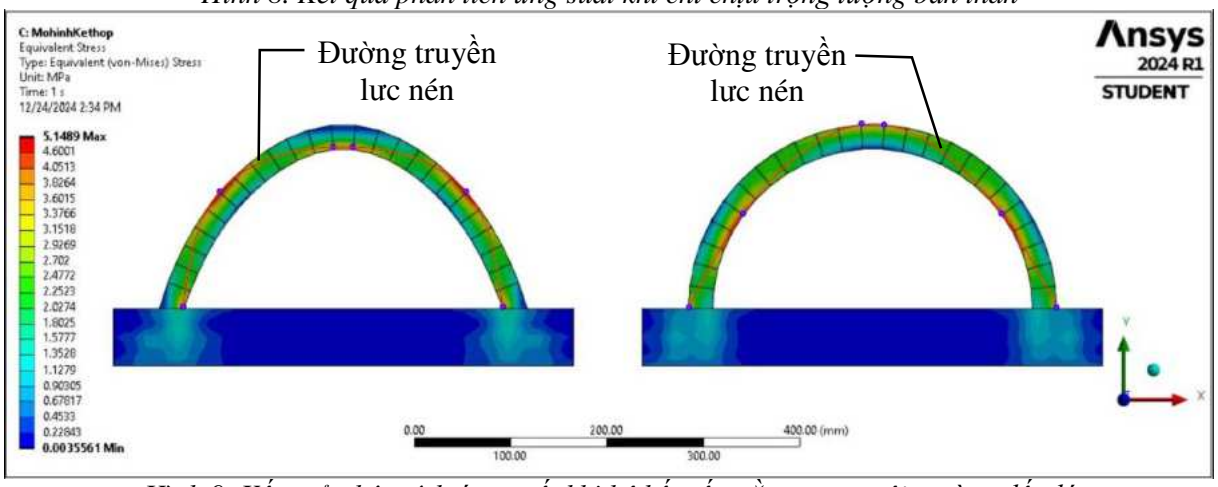
Hình 7. Cơ chế mất ổn định của hệ khối xếp dạng vòm hình tròn: a) mô hình số, b) mô hình thí nghiệm

2.2. Nghiên cứu trên mô hình số các dạng kết cấu khối xếp khi làm việc trong môi trường đất đá

Để đánh giá, lựa chọn được dạng kết cấu phù hợp khi làm việc trong môi trường đất đá, 2 mô hình số được nghiên cứu là mô hình khối xếp dạng vòm hình tròn và mô hình khối xếp dạng vòm hình móng ngựa. Việu liệu kết cấu là bê tông mác 250, số lượng khối trong hệ là 25 khối, kích thước của hệ kết cấu là t/R=0,14. Áp lực đất đá được xác định theo thuyết tạo vòm sụt lở của M.M.Protodiakonop, đất đá giả định có hệ số kiên cố f_{kp}=1.



Hình 8. Kết quả phân tích ứng suất khi chỉ chịu trọng lượng bản thân



Hình 9. Kết quả phân tích ứng suất khi hệ kết cấu nằm trong môi trường đất đá

Bảng 2. Kết quả phân tích về ứng suất cực đại trong hệ khối xếp

Hệ khối xếp	Ứng suất cực đại trong hệ khối xếp σ_{max} (Mpa)	
	Chỉ chịu trọng lượng bản thân	Trong môi trường đất đá
Dạng vòm hình móng ngựa	0,009507	5,1489
Dạng vòm hình tròn	0,027349	4,6010

Từ kết quả trên có thể nhận xét rằng:

- Nếu chỉ chịu tác dụng của trọng lượng bản thân, hệ khối xếp dạng vòm hình móng ngựa làm việc ổn định hơn hệ dạng vòm hình tròn nhờ vào hình dạng tương đồng với dạng của đường cong truyền lực xuất hiện trong hệ.

- Trong môi trường đất đá, dưới tác dụng của các thành phần áp lực đất đá, hệ khối xếp dạng vòm hình tròn làm việc ổn định và hiệu quả hơn hệ dạng vòm hình móng ngựa.

3. Kết luận

Trong nội dung nghiên cứu, tác giả đã thực hiện nghiên cứu hệ khối xếp dạng vòm trên mô hình số. Kết quả cho thấy rằng, trong môi trường đất đá thì việc sử dụng hệ khối xếp dạng vòm

hình tròn là an toàn và hiệu quả hơn hệ khối xếp dạng vòm hình móng ngựa. Để đảm bảo khả năng làm việc ổn định của hệ khối xếp dạng vòm hình tròn, chiều dày tối thiểu của hệ kết cấu là t/R=0,14. Việc ưu tiên sử dụng hệ khối xếp dạng vòm hình tròn cũng rất thuận lợi trong quá trình chế tạo và lắp dựng khi hình dạng và kích thước của từng khối trong hệ là giống nhau. Tùy thuộc vào kích thước của công trình, người thiết kế có thể linh hoạt trong lựa chọn kích thước của từng khối vòm trong hệ phù hợp với khả năng chế tạo và lắp dựng của đơn vị.

Cơ chế mất ổn định của hệ khối xếp dạng vòm cũng đã được tác giả đề cập. Việc hình thành các khớp xoay gây mất ổn định của hệ chủ yếu do sự dịch chuyển gối tựa tại chân của hệ kết cấu. Điều này cần được xem xét, nghiên cứu kỹ lưỡng khi mà hệ kết cấu nằm trong và tựa trực tiếp trên nền đất đá.

Tài liệu tham khảo

1. Philippe Block, Matt Dejong, John Ochsendorf (2006). *As hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches*. Nexus Network Journal 8, 13-24.
2. Ochsendore. J.A (2002). *Collapse of masonry structure*. Ph.D. dissertation, Department of Engineering, Cambridge University.
3. Milankovitch M. (1907). Theorie der Drunckkurven. *Zeitschrift fur Mathematik und Physik,* 1-27.
4. Heyman. J. (1966). *The stone skeleton*. International Journal of Solids and Structures, 2: 249-279.
5. Culmann, K. (1866). *Die graphische Statik*, *Zurich: Meyer und Zeller*.
6. Jacques Heyman (2009). *La Coupe des Pierres*. Proceedings of the Third International Congress on Construction History, University of Cambridge, UK.
7. Nguyễn Văn Hùng (2024). *Nghiên cứu sự làm việc của kết cấu khối xếp dạng vòm trong môi trường đất đá.* Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ lần thứ XIX - năm 2024.

Study on using masonry arches as temporary support structure in underground construction

Abstract: *After digging the tunnel, it is necessary to immediately support the structure to ensure the safety of people and equipment during the construction process. Temporary support structures can be: wooden, steel, prefabricated reinforced concrete frames, anchors of all kinds, ... Temporary support with stacked blocks (bricks, stones, precast concrete, ...) has also been used since ancient times. This type of structure is less affected by environmental factors such as temperature, humidity, ... and does not require adhesives or connections between the blocks. This is very important for projects with long construction times. The content of the article studies the operation of masonry arches in soil and rock environments. From there, it proposes a temporary support structure design solution that can be applied to temporary support in current tunnel construction.*

Keywords: masonry arches; masonry semi-circular arches; thrust lines.

Đánh giá hiệu quả năng lượng của bơm nhiệt trong hệ thống điều hòa không khí trung tâm

Nguyễn Vũ Hùng
Học Viện KTQS;
Email:nguyenvuhung262@gmail.com

Tóm tắt

Bài báo đánh giá hiệu quả của bơm nhiệt kết hợp với hệ thống điều hoà trung tâm, từ đó đưa ra kết quả điện năng tiêu thụ, so sánh đánh giá được khả năng tiết kiệm điện của các phương án.

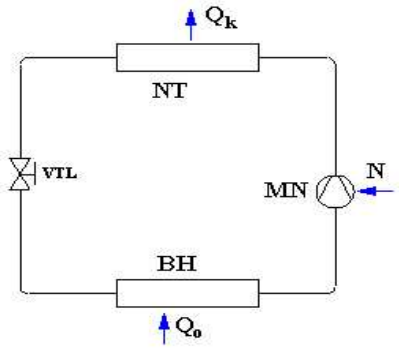
Từ khóa: *bơm nhiệt; điện năng tiêu thụ; điều hoà trung tâm*

1. Mở đầu

Ứng dụng rộng rãi nhất của bơm nhiệt là để sưởi ấm vào mùa đông, làm mát vào mùa hè để trở thành máy điều hòa hai chiều. Đây là bơm nhiệt có năng suất nhỏ từ vài kW đến vài chục kW sử dụng trong các công trình dân dụng và công nhiệp

Ứng dụng thứ hai cũng không kém phần quan trọng hiện nay là bơm nhiệt đun nước nóng từ 45~70^{0}C dùng cho gia đình, công sở và công nghiệp. Bơm nhiệt loại này có dàn ngưng gia nhiệt cho nước trong bồn nước nóng. Nước nóng sẽ được bơm đến hộ tiêu thụ. Dàn bay hơi chủ yếu là loại gió thu nhiệt trực tiếp từ không khí ngoài trời. Ví dụ, hãng York của Mỹ đã lắp đặt một bơm nhiệt kết hợp nóng lạnh ở Square Walley phụ vụ Olympic mùa đông. Đây là bơm nhiệt hai chiều nóng lạnh. Nguồn lạnh có năng suất 1919 kW để làm lạnh nước muối $CaCl_2$ ở nhiệt độ trung bình -10^{0}C được bơm cấp cho bốn sân trượt băng nghệ thuật. Nguồn nóng phát ra từ sáu dàn ngưng không khí dùng để sưởi ấm cho các phòng thể thao và các bể bơi.

2. Nguyên lý hoạt động của bơm nhiệt



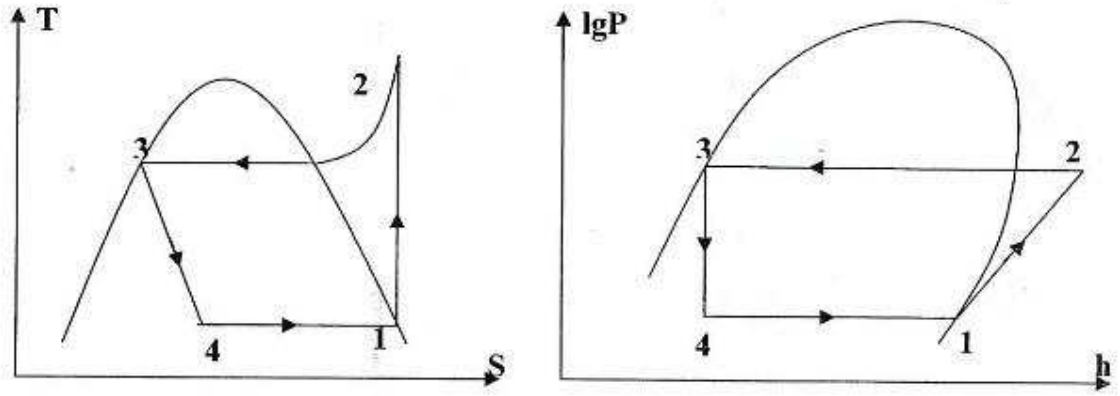
Hình 2.1. Nguyên lý cấu tạo và làm việc của bơm nhiệt nén hơi

Một hệ thống bơm nhiệt đơn giản bao gồm 4 thành phần chính là: dàn bay hơi (BH), máy nén (MN), dàn ngưng tụ (NT) và van tiết lưu (VTL). Trong đó, xảy ra sự luân chuyển nhiệt liên tục theo một vòng tuần hoàn kín nhờ các quá trình biến đổi trạng thái của môi chất lạnh: hóa hơi – nén – ngưng tụ - tiết lưu.

Nguyên lý làm việc của bơm nhiệt như sau: Hơi môi chất lạnh ra ở dàn bay hơi ở nhiệt độ thấp và áp suất thấp được máy nén hút về và nén lên áp suất cao và nhiệt độ cao rồi đẩy vào dàn ngưng tụ. Ở dàn ngưng tụ, hơi ngưng tụ lại thành lỏng và cấp nhiệt cho chất tải nhiệt (nguồn nóng) theo yêu cầu công nghệ như nước nóng hoặc không khí nóng phục vụ sấy suởi... Lỏng áp suất cao được tiết lưu xuống áp suất thấp khi qua thiết bị| tiết lưu và đi vào dàn bay hoi. Ở dàn bay hơi, lỏng bay hơi, thu nhiệt của nguồn nhiệt (nguồn nhiệt là nước, không khí

môi trường hoặc nguồn nhiệt thải...). Hơi sinh ra ở dàn bay hơi lại được máy nén hút về máy nén khép kín vòng tuần hoàn môi chất lạnh. Chất tải nhiệt sẽ được đưa đến hộ tiêu thụ.

Chu trình của bơm nhiệt:



Hình 2.2. Đồ thị chu trình khô đơn giản của bơm nhiệt

Chu trình khô giải quyết được hai nhược điểm của chu trình Carnot bằng cách cho máy nén hút hơi bão hòa khô và thay máy dãn nở bằng van tiết lưu. Bơm nhiệt do đó đơn giản hơn đỡ cồng kềnh hơn, vận hành dễ dàng và an toàn hơn, giá thành thấp hơn.

Các quá trình chủ yếu là:

1-2: quá trình nén hơi đoạn nhiệt với trạng thái 1 là hơi bão hòa khô;

2-3: quá trình ngưng tụ hơi môi chất ở áp suất cao và nhiệt độ cao, cung cấp nhiệt cho hộ tiêu thụ;

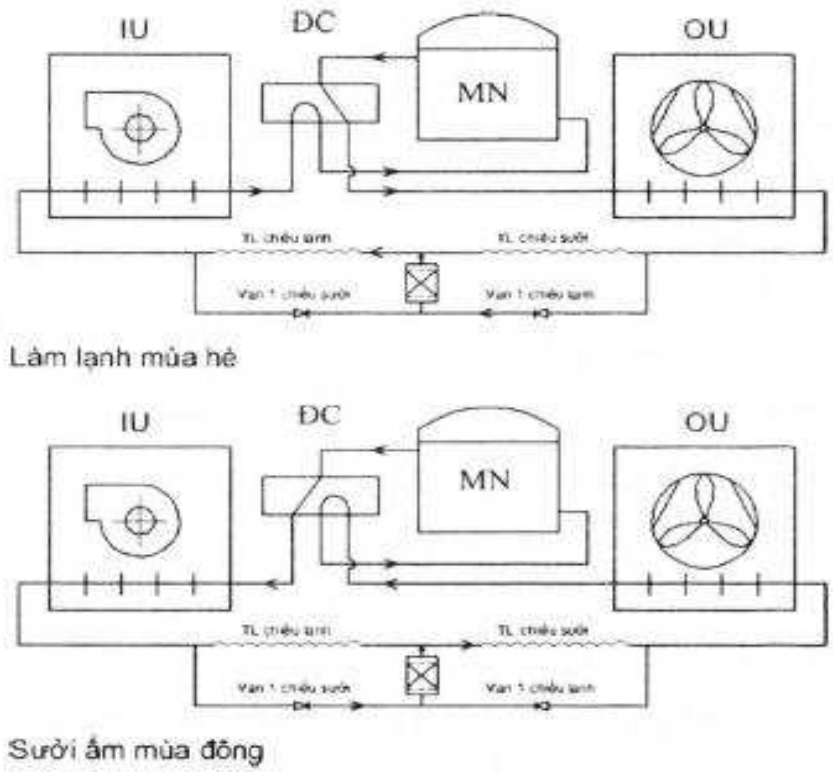
3-4: quá trình tiết lưu đẳng entanpy $h_3 = h_4$;

4-1 : quá trình bay hơi môi chất lỏng ờ nhiệt độ môi trường nguồn nhiệt

3. Phân loại bơm nhiệt trong hệ thống điều hòa không khí, cấp nhiệt

3.1. Bơm nhiệt (Điều hòa không khí hai chiều)

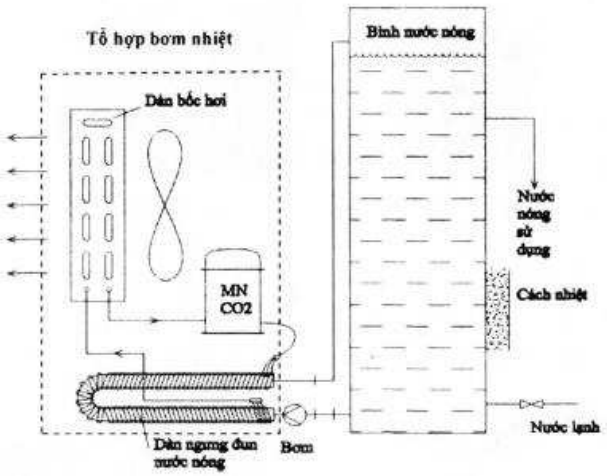
Mùa hè, van đảo chiều ở vị trí làm lạnh , hơi môi chất được máy nén nén vào dàn ngưng giải nhiệt gió, ngưng tụ thành lỏng, chảy qua van 1 chiều xuống bình chứa, sau đó qua phin sấy lọc bên phải, qua van tiết lưu để vào bình bốc hơi, ở đây lỏng bay hơi để làm lạnh nước để đưa đi làm lạnh phòng, biến thành hơi và lại được hút về máy nén, khép kín vòng tuần hoàn. Mùa đông, van đảo chiều ở vị trí sưởi ấm, hơi môi chất lạnh được máy nén nén vào bình ngưng (lúc trước là bình bốc hơi), cấp nhiệt cho nước (để đưa đi sưởi ấm phòng), hóa lỏng và chảy qua van một chiều về bình chứa, đi qua phin sấy lọc, van tiết lưu vào dàn bay hơi (lúc trước là dàn ngưng tụ) thu nhiệt từ không khí để biến thành hơi và được hút về máy nén, khép kín vòng tuần hoàn.



Hình 3.1. Sơ đồ nguyên lý đơn giản máy điều hòa 2 chiều với van đảo chiều

Mùa hè, hơi môi chất lạnh sinh ra từ dàn trong nhà được máy nén hút và nén lên áp suất cao đẩy qua van đảo chiều vào dàn ngoài OU, đi qua ống mao chiều lạnh vào dàn trong nhà, khép kín vòng tuần hoàn, thực hiện việc làm lạnh phòng. Vào mùa đông, van đảo chiều chuyển dòng hơi nóng có nhiệt độ cao và áp suất cao vào dàn trong nhà để thực hiện việc sưởi ấm phòng.

3.2. Bơm nhiệt đun nước nóng

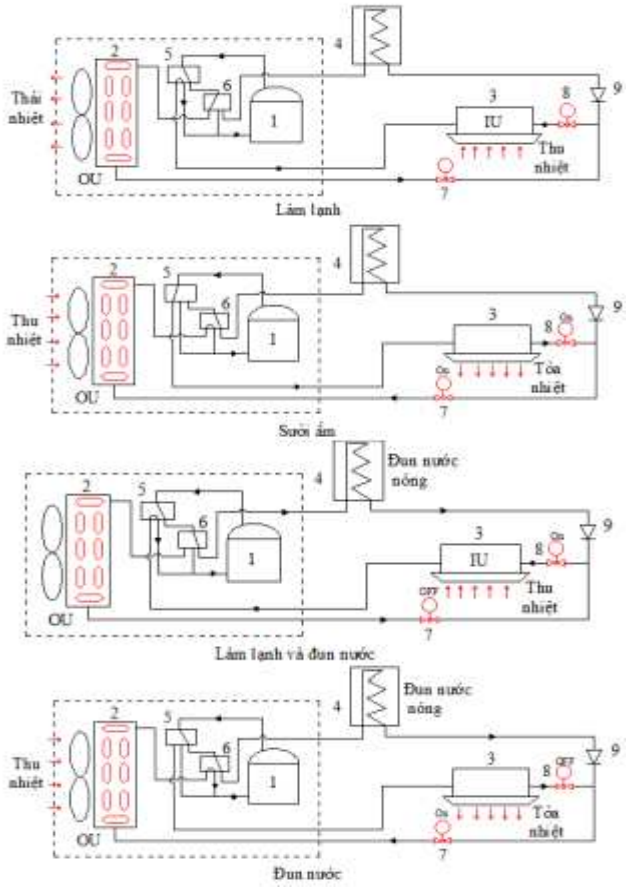


Hình 3.2. Sơ đồ đun nước nóng gia dụng đơn giản của Daikin

Nguyên lý hoạt động của bơm nhiệt giống như máy lạnh, các thiết bị trong hệ thống giống nhau. Nhưng chúng có mục đích sử dụng hoàn toàn khác nhau. Máy lạnh gắn với việc sử dụng nguồn lạnh ở thiết bị bay hơi còn bơm nhiệt lấy nhiệt thải ra ở dàn ngưng để phục vụ cho việc đun nước nóng.

Theo ứng dụng có thể phân ra loại nhỏ dùng cho gia đình, loại trung bình dùng cho các cơ sở thương nghiệp, nhà trẻ, trường học, bệnh viện, nhà tắm công cộng, biệt thự lớn, ký túc xá sinh viên…

3.3. Bơm nhiệt đa năng



1. Máy nén; 2. Dàn để ngoài nhà; 3. Dàn để trong nhà; 4. Máy gia nhiệt nước nóng; 5, 6. Van đảo chiều; 7,8. Van tiết lưu; 9. Van 1 chiều.

Hình 3.3. Sơ đồ nguyên lý bơm nhiệt đa năng

Bơm nhiệt nhiều chức năng có đặc điểm là được trang bị 2 van đổi dòng để thực hiện các chức năng khác nhau như đun nước nóng, làm lạnh phòng, làm lạnh và đun nước nóng đồng thời (chế độ hồi nhiệt) và sưởi ấm phòng.

Hiện nay, hệ bơm nhiệt đa chức năng (heat recovery) đang được các hãng sản xuất và ứng dụng phổ biến cho các công trình quy mô trung bình, tận dụng nhiệt thừa thải ra từ dàn nóng hệ thống điều hòa không khí để gia nhiệt nước nóng sử dụng.

4. Tính toán với công trình Nhà khách Vũng Tàu

4.1. Dữ liệu tính toán

Căn cứ vào thực tế của công trình ta có:

+ Tầng 5-12 mỗi tầng gồm 22 phòng nghỉ tổng công suất lạnh là 72kW , tầng 13 có 8 phòng nghỉ có tổng công suất lạnh là 55kW nên tổng công suất lạnh tính toán là 631 kW, công suất lạnh từng phòng nghỉ trung bình từ 2,8-3,6 kW.

+ Tổng nhu cầu dùng nước nóng là 70m^3/ngày, tải nhiệt của nước là 3256kWh/ ngày. Theo tính toán nhu cầu sử dụng thực tế là 11 giờ/ ngày đêm. Do vậy cần 4 Heatpumps công suất nhiệt mỗi máy là 75kW, bể nước nóng mái chọn 16m^3, bơm tuần hoàn có Q=12m^3/h,

H=25m. N=2kW.

4.2. Tính toán lựa chọn thiết bị

Chọn 04 bơm nhiệt mã CAHV-P500YB-HPB của Mitsubishi Electric có:

+ Công suất nhiệt 75kW

+ Công suất điện 16,6kW

+ Chỉ số COP=4,52

Dựa vào công suất lạnh 631kW ta chọn:

+ Tổ hợp RXVQ26AHYMV của Daikin có công suất lạnh là 72,8kW cho tầng 5-12, điện năng tiêu thụ 17,2kW, COP= 4,23.

+ Tổ hợp RXVQ22AHYMV của Daikin có công suất lạnh là 60,8kW cho tầng 13, điện năng tiêu thụ 13,7kW, COP= 4,43.

4.3. Tính toán điện năng tiêu thụ

Với hệ thống điều hoà vì điều kiện công trình khách sạn ta tính toán trong 24 giờ. Lúc này số tiền điện trong ngày lấy theo giá trung bình 2666 VNĐ/kWh là:

$$M_1 = 2666 \times 24 \times 137,6 = 8,8 \text{ triệu}$$

Với hệ thống bơm nhiệt ta tính toán trong 11 giờ. Lúc này số tiền điện trong ngày lấy theo giá trung bình 2666 VNĐ/kWh là:

$$M_2 = 2666 \times 11 \times 16,6 \times 4 = 1,95 \text{ triệu}$$

Nếu thay bơm nhiệt bằng các bình nóng lạnh công suất 2,5kW cấp cho 184 phòng nghỉ, tính toán trong 11 giờ. Lúc này số tiền điện trong ngày lấy theo giá trung bình 2666 VNĐ/kWh là:

$$M_2 = 2666 \times 11 \times 184 \times 2,5 = 13,5 \text{ triệu}$$

Như vậy với phương án 1 kết hợp hệ thống điều hoà trung tâm với bơm nhiệt Heatpumps thì tổng số tiền điện trong ngày là:

$$M_{12} = 8,8 + 1,95 = 10,75 \text{ triệu}$$

Phương án 2 kết hợp hệ thống điều hoà trung tâm với các bình nóng lạnh từng phòng thì tổng số tiền điện trong ngày là:

$$M_{12} = 8,8 + 13,5 = 22,3 \text{ triệu}$$

5. Kết luận

Nhìn vào kết quả ta thấy chi phí tiêu thụ điện năng khi kết hợp hệ thống điều hoà trung tâm với bơm nhiệt sẽ hiệu quả hơn, tuy nhiên vốn đầu tư ban đầu có thể lớn hơn so với bình đun điện.

Xét về tác động môi trường thì hệ thống bơm nhiệt giúp tiết kiệm điện năng, giảm tải được cho hệ thống điện chung. Ta thấy công suất điện cho hệ thống bơm nhiệt khoảng 66,4kW trong khi của hệ thống bình đun điện là 137,6kW tức giảm được 48% điện năng tiêu thụ so với bình đun điện

Mặt khác chi phí tiêu thụ điện khi có bơm nhiệt sẽ giảm 48% so với bình đun điện.

Tài liệu tham khảo

1. Trần Ngọc Chấn (2002), *Điều hòa không khí*, NXB Xây dựng, Hà Nội.

2. Hoàng Thị Hiền, Bùi Sỹ Lý (2004), *Thông gió*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.

3. Nguyễn Đức Lợi (2014), *Bơm nhiệt*, Nhà xuất bản Giáo dục, Việt Nam.

4. QCVN 09:2017/BXD, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về các công trình xây dựng sử dụng năng lượng hiệu quả.
5. TCVN 5687:2024, Thông gió điều hòa không khí - Tiêu chuẩn thiết kế.

Evaluation of the energy efficiency of heat pumps in central air conditioning systems

Abstract: *The article evaluates the effectiveness of heat pumps combined with central air conditioning systems, thereby providing power consumption results, comparing and evaluating the electricity saving ability of the options*

Keywords: heat pumps; electricity consumption; central air conditioning systems.

Xây dựng phân phối xác suất của khoảng cách vì thép trong kết cấu chống đỡ ban đầu đường hầm được thi công bằng phương pháp NATM

Phạm Thanh Tùng[1], PGS.TS. Bùi Đức Năng[1], TS. Trần Anh Bảo[1]

[1]Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện kỹ thuật quân sự

[*] Email: pttung2605@lqdtu.edu.v;, Tel: 0987388258

Tóm tắt

Phương pháp đào hầm mới của Áo (New Austrian Tunneling Method -NATM) được ứng dụng rộng rãi và hiệu quả trong thi công công trình ngầm ở Việt Nam. Việc tính toán thiết kế các bộ phận của kết cấu chống đỡ ban đầu (bê tông phun, neo, vì thép) theo lý thuyết độ tin cậy cần phải có thông tin về phân phối xác suất của các tham số liên quan. Trong bài báo trình bày quá trình thu thập, xử lý và phân tích thống kê bộ số liệu để có phân phối xác suất của khoảng cách vì thép trong kết cấu chống đỡ ban đầu. Từ các số liệu thu thập được tại dự án hầm đường bộ Đèo Cả, sau khi xử lý để loại bỏ sai số thô, hai bộ số liệu về khoảng cách vì kèo thép chống đỡ đường hầm theo thiết kế là 150cm và 120cm được phân tích thống kê bằng phần mềm EasyFit 5.6. Ba kiểm định Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling và Chi-Squared về mức độ phù hợp của từng bộ số liệu theo các phân phối xác suất khác nhau được áp dụng. Kết quả cho thấy mức độ phù hợp nhất của phân phối lý thuyết đối với khoảng cách của vì kèo thép tại dự án được nghiên cứu được cho dưới dạng hàm mật độ xác suất (Probability Density Function - PDF) là phân phối Giá trị cực trị tổng quát (Generalized Extreme Value - GEV) đối với khoảng cách 150cm và phân phối Wakeby đối với khoảng cách 120cm.

Từ khóa: *kết cấu chống ban đầu, hàm mật độ xác suất, độ tin cậy, NATM.*

1. Giới thiệu

Trong phát minh của mình vào năm 1948, Rabcewicz đã đưa ra những nguyên tắc cơ bản của NATM [[1],[2]]. Nguyên tắc cơ bản đó là: sử dụng một kết cấu chống đỡ sơ bộ (thực hiện ngay sau khi đào) có tính linh hoạt cao để đạt được trạng thái cân bằng mới thay thế cho trạng thái cân bằng cũ đã bị phá vỡ do việc đào hầm và kết cấu chống này được kiểm soát bằng các đo đạc quan trắc hiện trường. Sau khi đã đạt được trạng thái cân bằng mới, lớp vỏ bên trong (lớp vỏ cuối cùng thường là bê tông đổ tại chỗ) sẽ được thi công lắp dựng.

Phương pháp NATM còn được gọi một cách khác là phương pháp thi công tuần tự, với kết cấu chống đỡ ban đầu tùy thuộc điều kiện địa chất để sử dụng các yếu tố như bê tông phun, neo đá, hoặc vì thép, lưới thép trong điều kiện cần thiết. Trong trường hợp các khối đất đá có tính ổn định thấp, biên độ dịch chuyển lớn, các kỹ sư thiết kế thường chỉ định sử dụng vì thép như một yếu tố kết hợp với bê tông phun, neo thép và lưới thép. Có thể phân loại các loại vì thép hay sử dụng như khung chống vòm kín, nửa vòm, đa giác, khung chống hình hòm, khung chống kín…với các tác dụng chính như [[2]]:

- Gia cố, giữ ổn định gương hầm chống lại sự dịch chuyển đất đá do quá trình đào.
- Chống đỡ gương hầm để thực hiện quá trình phun bê tông và thực hiện quá trình đào bước tiếp theo
- Kết hợp với với bê tông phun tạo thành vòm bê tông cốt thép, tăng khả năng chịu cắt cho kết cấu chống ban đầu.

Trong quá trình thi công, khi bê tông chưa đạt được cường độ cần thiết thì vì thép sẽ chịu trách nhiệm chính chống lại quá trình mang tải áp lực đất đá gây ra. Sau đó, cường độ và khả năng chịu tải của bê tông tăng dần và đạt được độ cứng hoàn toàn, dẫn đến bê tông sẽ là thành phần chịu tải chính vì lúc này coi kết cấu chống như một kết cấu bê tông cốt thép hoàn chỉnh với độ cứng của thép sẽ nhỏ hơn độ cứng của bê tông rất nhiều [[2]].

Hiện nay, tại Việt Nam các tiêu chuẩn TCVN 4527:1988 [[3]],TCVN 4528:1988 [[4]] đang được áp dụng trong việc thiết kế các đường hầm. Ngoài ra, các nhà thầu tư vấn thiết kế cũng đề xuất các tiêu chuẩn thiết kế đường hầm của Nhật Bản 2006 [[5]], tiêu chuẩn Châu Âu 2004 [[6]] để ứng dụng vào các công trình. Trong các tiêu chuẩn này, việc thiết kế vì thép chống đều xem khoảng cách giữa các vì thép là tất định, và thường sử dụng các hệ số an toàn dựa trên kinh nghiệm của các công trình tương tự.

Tuy nhiên, trong thực tế, có rất nhiều yếu tố chủ quan như khả năng, kinh nghiệm của kỹ sư thiết kế, trình độ thi công, phương pháp đánh giá đo đạc, quan trắc hoặc các yếu tố khách quan như thay đổi của địa chất, nước ngầm, nhiệt độ…đều là những yếu tố không chắc chắn có thể dẫn tới những thay đổi đáng kể về khoảng cách, chiều dày vì thép chống. Một hướng tiếp cận khác trong thiết kế vì thép là sử dụng phân tích độ tin cậy của kết cấu chống ban đầu. Một trong những việc quan trọng để thiết kế bằng phương pháp độ tin cậy là lựa chọn được hàm phân phối mật độ xác suất phù hợp cho các biến ngẫu nhiên trong quá trình thiết kế. Trong quá trình đánh giá hàm phối phối mật độ xác suất phù hợp, việc quan trọng là thu thập được những bộ dữ liệu phù hợp, số lượng mẫu đủ lớn và dữ liệu có độ tin cậy cao, cũng như trong quá trình đánh giá cần có những phương pháp phân loại, xử lý các dữ liệu thô nhằm tăng cường độ tin cậy của phép phân tích.

Với mục đích đề xuất một hàm phân phối xác suất khoảng cách vì thép phù hợp, bài báo trình bày phương pháp phân tích, đánh giá tập số liệu về khoảng cách của các vì thép trong kết cấu chống ban đầu của một đoạn hầm đã được thi công tại Việt Nam. Sau đó, bằng cách sử dụng ba phương pháp kiểm định nhằm đánh giá độ phù hợp của các hàm mật độ xác suất đã được đề xuất.

2. Phương pháp và số liệu thống kê

2.1. Các phương pháp kiểm định giả thuyết thống kê

Đối với một số bài toán thống kê, việc đưa ra những giả thiết về đại lượng ngẫu nhiên trong đó có phân phối đã biết như phân phối chuẩn, phân phối logarit, …Nhưng trong thực tế, không thể chắc chắn được tính đúng đắn của những phân phối đó và dẫn đến việc phải giải quyết những bài toán này bằng các phép kiểm định nhằm đảm bảo tính đúng đắn của phân phối. Để kiểm tra sự phù hợp của hàm phân bố xác suất với sự phân bố xác suất quan sát từ mẫu thí nghiệm, trong bài báo sử dụng ba phương pháp kiểm định sau:

- Kiểm định Chi-Squared
- Kiểm định Kolmogorov-Smirnov
- Kiểm định Anderson-Darling

Mỗi phương pháp kiểm định có đánh giá khác nhau và sẽ có được những ưu nhược điểm riêng nhằm đánh giá dữ liệu thống kê một cách khách quan hơn [[7]-[9]].

a) Kiểm định Chi-Squared

Kiểm định χ^2 do Pearson đề xuất năm 1900, mục đích so sánh dữ liệu được thu thập với hàm phân phối đề xuất [[10],[11]]. Định nghĩa tiêu chuẩn kiểm định χ^2 như sau:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - p_i n)^2}{p_i n} \tag{1}$$

Trong biểu thức trên, n là kích thước (số lượng) mẫu, p_i là xác suất tại điểm thứ i, n_i

là tần số mẫu và $p_i n$ là tần số lý thuyết.

Tần số mẫu được khuyến nghị được chia bằng nhau và không quá bé (≥5). Người ta đã chứng minh được rằng khi n→∞ thì phân phối sẽ xấp xỉ tới phân phối $\chi^2\left(k-r-1\right)$ với *r* là tham số chưa biết cần phải ước lượng.

b) Kiểm định Kolmogorov-Smirnov

Kiểm định Kolmogorov-Smirnov áp dụng được đối với phân phối liên tục song các tham số của quy luật phân phối lý thuyết của biến ngẫu nhiên giải định đã biết trước chứ không xác định dựa vào các số liệu mẫu [[11]-[14]]. Giả sử biến ngẫu nhiên *X* được giải thiết phân phối theo một quy luật lý thuyết liên tục nào đó với hàm phân phối xác suất $F_x(x)$. Từ tập mẫu kích thước *n* đã được sắp xếp theo gia trị theo thứ tự tăng dần, xây dựng hàm phân phối thực nghiệm $F_n^*(x_i)$ tại mỗi giá trị x_i của mẫu theo ước lượng:

$$F_n^*\left(x_i\right)=\begin{cases}0, & x<x_1\\ m/n, & x_m\le x\le x_{m+1}\\ 1, & x\ge x_n\end{cases} \tag{2}$$

Lúc đó, tiêu chuẩn kiểm định giả thuyết được chọn là:

$$D_n=\max_{x_i}\left\{\left|F_x\left(x_i\right)-F_n^*\left(x_i\right)\right|\right\} \tag{3}$$

c) Kiểm định Anderson-Darling

Kiểm định này là một phương pháp khác để xác định mức độ phù hợp của hàm mật độ xác suất giả định đối với một tập mẫu đã xác định kích thước *n* [[16],[17]]. Kiểm định này gán trọng số cao hơn cho các chuỗi so với các kiểm định khác, do đó nó có độ chính xác cao hơn. Đối với biến *x* và phân phối giả định $F^0(.)$, biến ngẫu nhiên $nF_n(x)$ là phân phối nhị thức có xác suất $F^0(x)$. Giá trị kỳ vọng của $nF_n(x)$ là $nF^0(x)$, phương sai của nó là $nF^0(x)[1-F^0(x)]$ và kiểm định Anderson-Darling được định nghĩa như sau:

$$A_n^2=n\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left[F_n(x)-F^0(x)\right]^2}{\sqrt{F^0(x)[1-F^0(x)]}}dF^0(x) \tag{4}$$

Phương trình trên cũng có thể được viết là:

$$A_n^2=-n-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(2j-1)[\log u_{(j)}+\log(1-u_{(n-j+1)})] \tag{5}$$

Trong phương trình trên, $u_j=F^0(x_{(j)})$ và $x_{(1)}< x_{(2)}<\ldots< x_{(n)}$ là dãy có thứ tự mẫu.

3.2. Investigation of stress with different boundary conditions

Trong bài báo này, công trình được khảo sát là hầm đường bộ qua Đèo Cả nằm trong dự án Xây dựng hầm đường bộ qua Đèo Cả. Dự án nằm trên Quốc lộ 1A, nối từ tỉnh Phú Yên sang tỉnh Khánh Hòa, được khởi công xây dựng năm 2012 và đưa vào khai thác vào năm 2017 [[15]].

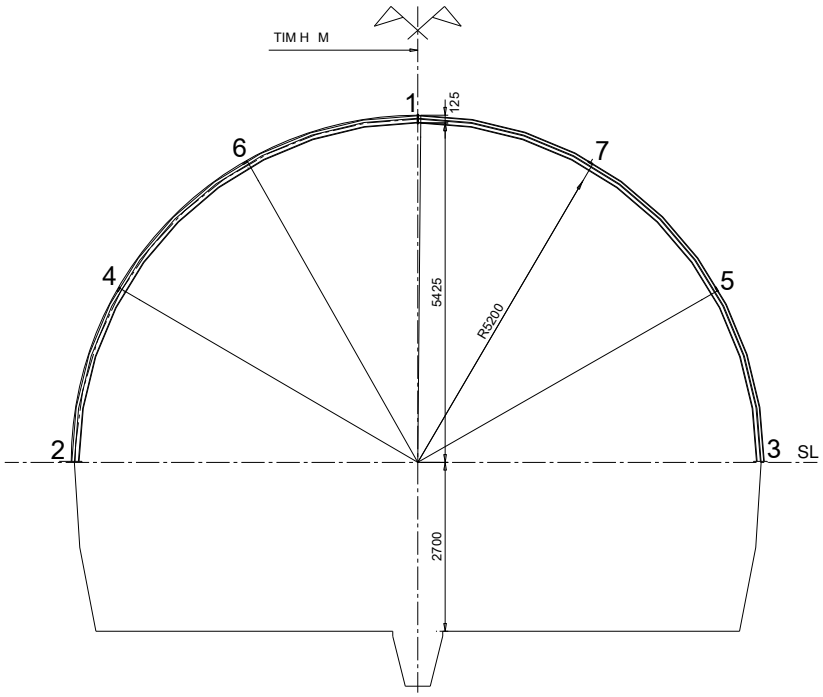
Chủ đầu tư là công ty cổ phần đầu tư Đèo Cả, tư vấn thiết kế là công ty TNHH Nippon Koei (NK) và công ty TNHH Nippon Koei Việt Nam International (NKV). Liên danh các công ty Lũng Lô – VINAVICO – Quản Trung là nhà thầu chính thi công hạng mục hầm phía Bắc

hầm Đèo Cả thuộc Gói thầu 1A-2 có lý trình từ Km3+815 - Km5+900, chiều dài 2,085m. Công trình hầm được thi công bằng công nghệ NATM, dựa theo các tiêu chuẩn thiết kế đường hầm của Nhật Bản [[5]]. Các số liệu về tọa độ khoảng cách vì thép được thu thập từ biên bản nghiệm thu hoàn thành khung chống thép của dự án.

Mặt cắt điển hình kết cấu chống ban đầu được phân tích ở đây là CII, CII-L có các thông số kỹ thuật trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của kết cấu chống đỡ CII và CII-L

TT	Tên hạng mục	Kết cấu chống đỡ CII-L	Kết cấu chống đỡ CII
1	Neo đá	SN D25, L = 4000mm	SN D25, L = 3000mm
2	Bê tông phun	chiều dày = 150mm	chiều dày = 100mm
3	Lưới thép	D6 x 150 x150 mm	D6 x 150 x150 mm
4	Vì thép	H 150 x150	H 125 x125
5	Khoảng cách vì thép	120cm	150cm



Hình 1. Tọa độ các điểm đo trên mặt cắt ngang điển hình.

Sau khi khoan nổ, làm sạch bề mặt gương đào, một lớp bê tông phủ sẽ nhanh chóng được phun nhằm phủ kín bề mặt. Sau đó, người ta sẽ thi công lắp đặt vì thép kết hợp lưới thép nhằm gia tăng sự ổn định của kết cấu chống đỡ.

Các vì thép tương ứng với kết cấu chống đỡ CII và CII-L được lắp đặt tương ứng với chiều dài phân đoạn đào 150cm và 120cm. Để thực hiện công tác kiểm tra vị trí các vì thép được lắp đặt, người ta sẽ tiến hành xác định tọa độ tại 7 điểm đo trên mỗi vì thép cũng như bán kính trung bình của vì thép. Trong nghiên cứu, để xác định khoảng cách giữa 2 vì thép liên tiếp, ta lựa chọn vị trí đo tại điểm đỉnh vòm và thống kê tọa độ của chúng. Áp dụng công thức tính khoảng cách giữa 2 điểm trong hệ tọa độ không gian:

$$AB = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \qquad (6)$$

Hai bộ số liệu khoảng cách tương ứng với khoảng cách 150cm biểu diễn tại Bảng 2 và 120cm biểu diễn tại Bảng 3.

Bảng 2. Thống kê khoảng cách vì thép với khoảng cách thiết kế là 150cm

TT	Khoảng cách thực tế (cm)	TT	Khoảng cách thực tế (cm)	TT	Khoảng cách thực tế (cm)	TT	Khoảng cách thực tế (cm)	TT	Khoảng cách thực tế (cm)
1	148,44	15	148,994	29	151,528	43	150,985	57	149,232
2	152,553	16	149,398	30	147,427	44	149,874	58	148,014
3	148,605	17	153,024	31	148,865	45	149,962	59	150,183
4	150,926	18	154,182	32	151,22	46	153,336	60	151,991
5	148,791	19	150,803	33	149,154	47	146,691	61	148,723
6	152,842	20	150,638	34	149,693	48	153,535	62	151,002
7	150,632	21	151,874	35	151,734	49	148,99	63	148,134
8	148,656	22	151,023	36	148,446	50	148,663	64	152,097
9	148,929	23	147,605	37	151,587	51	151,891	65	149,757
10	152,264	24	149,3	38	151,242	52	147,856	66	151,618
11	147,495	25	152,652	39	147,205	53	149,185	67	152,202
12	152,213	26	150,872	40	151,889	54	148,548	68	148,207
13	149,098	27	147,24	41	146,259	55	150,405	69	149,464
14	150,523	28	152,456	42	148,731	56	153,385	70	150,765

Bảng 3. Thống kê khoảng cách vì thép với khoảng cách thiết kế là 120cm

TT	Khoảng cách thực tế (cm)	TT	Khoảng cách thực tế (cm)	TT	Khoảng cách thực tế (cm)	TT	Khoảng cách thực tế (cm)
1	120,853	18	116,549	35	118,844	52	117,734
2	118,064	19	122,217	36	122,004	53	120,077
3	119,646	20	118,756	37	122,952	54	119,555
4	119,878	21	119,125	38	119,618	55	118,615
5	125,286	22	119,418	39	121,669	56	123,678
6	118,716	23	122,922	40	119,266	57	115,334
7	125,184	24	120,049	41	119,098	58	124,894
8	117,244	25	119,793	42	119,397	59	118,634
9	116,732	26	119,633	43	117,107	60	120,475
10	122,693	27	120,718	44	116,268	61	119,538
11	126,145	28	119,195	45	121,023	62	121,038
12	119,364	29	118,207	46	122,7	63	116,733
13	119,335	30	119,794	47	123,164	64	120,737
14	120,47	31	119,833	48	119,84	65	122,463
15	118,999	32	120,172	49	117,018	66	116,986
16	115,08	33	124,572	50	117,529		
17	128,724	34	119,886	51	123,861		

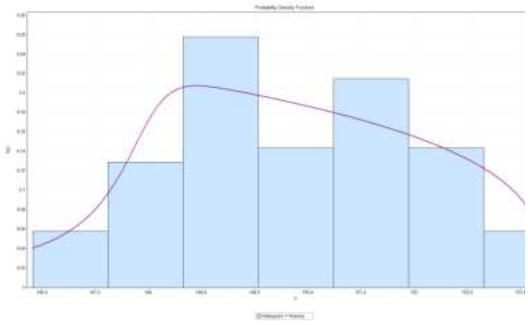
3. Kết quả và thảo luận

Sau khi thống kê, xử lý tập dữ liệu thô, đối với mỗi bộ số liệu sử dụng chương trình

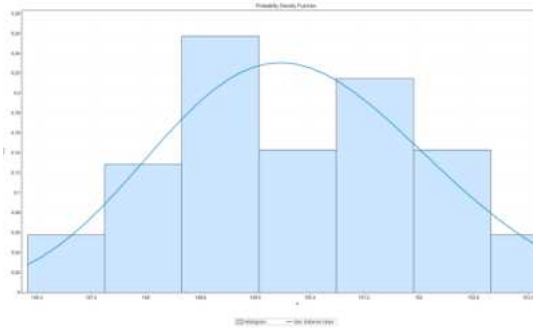
Easy Fit 5.6 thông qua 03 phương pháp kiểm định đã nêu đánh giá mức độ phù hợp của các phân phối đã được xác định. Đối với các vì thép có khoảng cách thiết kế là 150cm, biểu diễn kiểm định thống kê và xếp hạng các hàm phân phối tại Bảng 4.

Bảng 4. Kiểm định thống kê và xếp hạng đối với vì thép có thiết kế 150cm

TT	Phân phối	Kolmogorov-Smirnov		Anderson-Darling		Chi-Squared	
		Thống kê	Thứ hạng	Thống kê	Thứ hạng	Thống kê	Thứ hạng
1	Beta	0,06599	2	0,7678	9	3,6039	2
2	Burr	0,10437	11	0,75988	8	5,1435	10
3	Burr (4P)	0,33481	16	14,222	16	129,96	15
4	Cauchy	0,11432	12	1,9333	12	8,8121	12
5	Exponential	0,62242	18	31,327	18	3282,6	17
6	Exponential (2P)	0,27054	14	9,8144	14	34,516	13
7	Gamma	0,09146	7	0,56058	3	4,0318	6
8	Gamma (3P)	0,08459	5	0,56313	4	3,9109	4
9	**Gen. Extreme Value**	0,07786	3	**0,41729**	**1**	**3,5667**	**1**
10	Lognormal	0,09214	8	0,58298	7	4,0752	8
11	Lognormal (3P)	0,08714	6	0,57151	6	3,9505	5
12	Normal	0,09263	9	0,56548	5	4,0653	7
13	Pareto	0,27333	15	9,9933	15	35,541	14
14	Rayleigh	0,52529	17	26,174	17	1657,6	16
15	Rayleigh (2P)	0,0991	10	0,80403	10	5,0621	9
16	**Wakeby**	**0,05174**	**1**	4,0861	13	N/A	
17	Weibull	0,12416	13	1,3328	11	7,4172	11
18	Weibull (3P)	0,08016	4	0,46926	2	3,6388	3



a) Hàm mật độ xác suất Wakeby



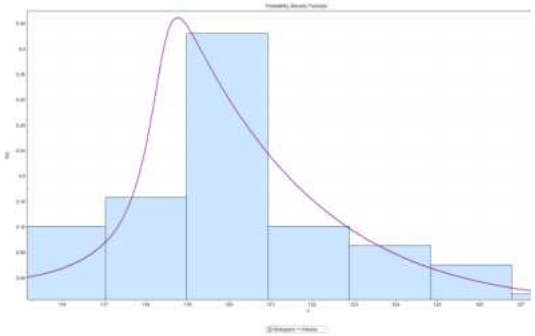
b) Hàm mật độ xác suất GEV

Hình 2. a) Đồ thị biểu diễn hàm mật độ xác suất hàm Wakeby xếp hạng thứ nhất đối với kiểm định Kolmogorov-Smirnov; b) Đồ thị biểu diễn hàm mật độ xác suất GEV xếp hạng thứ nhất đối với kiểm định Anderson-Darling và Chi-Squared

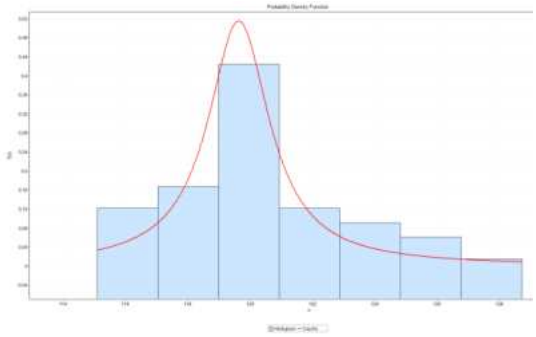
Đối với các vì thép có khoảng cách thiết kế là 120cm, biểu diễn kiểm định thống kê và xếp hạng các hàm phân phối tại Bảng 5.

Bảng 5. Kiểm định thống kê và xếp hạng đối với vì thép có thiết kế 120cm

TT	Phân phối	Kolmogorov-Smirnov		Anderson-Darling		Chi-Squared	
		Thống kê	Thứ hạng	Thống kê	Thứ hạng	Thống kê	Thứ hạng
1	Beta	0,0918	5	0,56896	6	8,918	6
2	Burr	0,07855	2	0,43354	2	6,9935	3
3	Burr (4P)	0,33214	16	17,807	16	N/A	
4	**Cauchy**	0,093	6	1,0372	11	**4,7298**	**1**
5	Exponential	0,61621	18	29,031	18	2484,7	17
6	Exponential (2P)	0,28868	14	7,582	14	45,926	13
7	Gamma	0,13284	11	1,0048	10	10,655	11
8	Gamma (3P)	0,09169	4	0,56412	5	8,9185	7
9	Gen. Extreme Value	0,09358	7	0,53949	3	8,7574	5
10	Lognormal	0,1314	10	0,97208	9	10,64	10
11	Lognormal (3P)	0,08918	3	0,54204	4	8,6903	4
12	Normal	0,1358	12	1,0599	12	10,984	12
13	Pareto	0,29289	15	9,4505	15	47,971	14
14	Rayleigh	0,51339	17	23,78	17	1246,6	16
15	Rayleigh (2P)	0,12243	9	0,82845	8	10,519	9
16	**Wakeby**	**0,07703**	**1**	**0,43252**	**1**	**6,7814**	**2**
17	Weibull	0,17499	13	3,2701	13	59,016	15
18	Weibull (3P)	0,10025	8	0,70967	7	10,032	8



1) Hàm mật độ xác suất Wakeby



2) Hàm mật độ xác suất Cauchy

Hình 3. a) Đồ thị biểu diễn hàm mật độ xác suất hàm Wakeby xếp hạng thứ nhất đối với kiểm định Kolmogorov-Smirnov và Anderson-Darling; b) Đồ thị biểu diễn hàm mật độ xác suất hàm Cauchy xếp hạng thứ nhất đối với kiểm định Chi-Squared

Quan sát tổng thứ hạng từ 03 phép kiểm định trên cho thấy:

a) Đối với khoảng cách vì thép có thiết kế 150cm, mặc dù hàm phân phối Wakeby có thứ hạng đứng đầu đối với phép kiểm định Kolmogorov-Smirnov nhưng chỉ có thứ hạng 13 đối với kiểm định Anderson-Darling và không được xếp hạng đối với phép kiểm định Chi-Squared, trong khi hàm phân phối GEV có xếp hạng đứng đầu đối với 2 phép kiểm định Anderson-Darling, Chi-Squared và đứng thứ 3 đối với phép kiểm định Kolmogorov-Smirnov, vì vậy đề xuất phân phối GEV cho khoảng cách vì thép theo thiết kế 150cm.

b) Đối với khoảng cách vì thép có thiết kế 120cm, mặc dù hàm phân phối Cauchy đứng đầu ở phép kiểm định Chi-Squared nhưng chỉ đứng thứ 6 ở phép kiểm định Kolmogorov-Smirnov và thứ 11 ở phép kiểm định Anderson-Darling, trong khi hàm phân phối Wakeby đứng đầu ở 2 phép kiểm định Kolmogorov-Smirnov và Anderson-Darling, đồng thời đứng thứ 2 ở phép kiểm định Chi-Squared, vì vậy đề xuất hàm phân phối Wakeby phù hợp đối với khoảng cách thiết kế 120cm.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu trên, từ biên bản nghiệm thu hoàn thành khung chống thép đã thu thập được tập dữ liệu lần lượt là 70 số liệu và 66 số liệu tương ứng với thiết kế khoảng cách vì thép là 150cm và 120cm . Sau khi xử lý các số liệu thô, sử dụng ba phương pháp kiểm định để xác định hàm phân phối phù hợp thu được kết quả như sau:

- Hàm phân phối GEV là hàm phân phối phù hợp nhất đối với thiết kế khoảng cách vì thép 150cm.

- Hàm phân phối Wakeby là hàm phầm phối phù hợp nhất đối với thiết kế khoảng cách vì thép 120cm.

Phép phân tích giúp xác định được hàm phân phối phù hợp với biến ngẫu nhiên khoảng cách vì thép. Tuy nhiên, để đánh giá thêm mức độ ảnh hưởng của điều kiện thi công đến hàm phân phối phù hợp của khoảng cách vì thép, cần thực hiện thêm nhiều phép phân tích hơn nữa.

Tài liệu tham khảo

[1] Rabcewicz, L. (1948). *Patentschrift. Österreichisches Patent Nr. 165573 [Patent specification, Austrian patent no. 165573]*. In German.

[2] Đỗ Như Tráng, Vũ Thị Thùy Giang (2019). *Các công nghệ xây dựng hầm tiên tiến*. Nhà xuất bản khoa học tự nhiên và công nghệ, tr. 15.

[3] Bộ Giao thông Vận tải (1988). TCVN 4527:1988. *Hầm đường sắt và hầm ô tô – Tiêu chuẩn thiết kế*. Hà Nội, Việt Nam.

[4] Bộ Giao thông Vận tải (1988). TCVN 4527:1988. *Hầm đường sắt và hầm ô tô – Hầm đường sắt và hầm đường ô tô – Quy phạm thi công, nghiệm thu*. Hà Nội, Việt Nam.

[5] Japan Society of Civil Engineers (2006). *Japanese Standard Specifications for Tunneling*. JSCE, Tokyo, Japan.

[6] European Committee for Standardization (CEN) (2004). *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. EN 1997-1:2004. Brussels: CEN.

[7] Sanchidrian, J, O. A. (2014). Size distribution functions for rock fragments. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,* 71, 381-394. DOI:10.1016/j.ijrmms. 2014.08.007

[8] Milford, R. (1987). Annual maximum wind speeds from parent distribution functions. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 25, pp. 163-178. https://doi.org/10.1016/0167-6105(87)90014-6

[9] Ghamishon, R., & Malekian,A. (2011). Determination of the most suitable statistical distribution functions for regional floods (Case study of southwest Kerman Province). *Proceedings of Sixth National Watershed Sciences and Engineering Conference and forth national congress on soil erosion and sediment, Tarbiat-Modares University*.

[10] Pearson, Karl (1900). On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical Magazine*, Series 5, 50 (302): 157–

175. doi:10.1080/14786440009463897

[11] Bùi Đức Năng, Phan Chí Hiếu (2020), *Độ tin cậy kết cấu công trình.* Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, tr. 68-69,71.

[12] Kolmogorov A. (1933). "Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione". *G. Ist. Ital. Attuari*. 4: 83–91

[13] Smirnov N. (1939). “Sur Lesécarts De La Courbe De Distribution Empirique.” *Matematicheskii Sbornik*, 48(1), 3–26. doi:10.1787/888932596384.

[14] Smirnov N. (1948). "Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions". *Annals of Mathematical Statistics*. 19 (2): 279-281. doi:10.1214/aoms/1177730256.

[15] Công Ty Cổ phần đầu tư Đèo Cả (2015). Báo cáo thiết kế chi tiết hầm phía Bắc Hầm Đèo Cả, tập 1, tr 6,7.

[16] Anderson, T, A. (1952). Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes. *Ann. Math. Statist*, 23, pp. 193-212.

[17] Darbandi, S., Mahmudi, S., & Ebrahimi, S., & Shoeybi-Nobarian, M. R. (2012). Introduction and application of Anderson-Darling in river engineering of East Azerbaijan Province. *Fifth National Conference on Watersheds and management of soil and water resources*.

Establishing probability density function for spacing of steel set in temporary tunnel support system using the NATM method

Abstract: *The New Austrian Tunnelling Method (NATM) is being common and effectively deployed in the underground constructions today. The reliability-based design requires an accurate assessment of the random distribution of temporary support structural members. In this paper, a study of the temporary support structure of the Deo Ca tunnel project, a road tunnel constructed using the NATM method, is conducted. Statistical analysis was conducted using EasyFit 5.6 software, three tests, Chi-Squared, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, are used to check the suitability of the corresponding probability density function (PDF). From the data obtained through monitoring, tunnel acceptance and after the analysis process, the results indicate that the best-fitting theoretical distributions for the steel frame spacings are the Generalized Extreme Value (GEV) distribution for the 150 cm spacing and the Wakeby distribution for the 120 cm spacing, respectively, represented in terms of their Probability Density Functions (PDFs).*

Keywords: temporary support, probability density function, reliability, NATM.

Nghiên cứu tính toán kết cấu dầm gia cường bằng bản thép ốp chống sụp đổ cục bộ

Phùng Quang Trung[1], Lê Hải Dương[2]

[1]Hệ 2, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2]Viện kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: pqtrung1506@gmail.com; Tel: 0967911922

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu các giải pháp gia cường kết cấu của dầm bê tông cốt thép và đề xuất phương pháp tính kết cấu dầm gia cường bằng bản thép ốp chống sụp đổ cục bộ nhằm đảm bảo nóc tầng hầm dưới các nhà cao tầng không bị sập khi chịu tác dụng của tải trọng do đống sụp đổ của kết cấu các tầng phía trên.

Từ khóa: *tải trọng va chạm; sụp đổ; gia cường kết cấu dầm.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, kết cấu sàn nóc tầng hầm của các nhà cao tầng được thiết kế với các loại tải trọng thông thường, chưa kể đến các loại tải trọng đặc biệt như: sóng xung kích do vụ nổ bom đạn hoặc khí ga, sụp đổ của kết cấu phía trên, … Chính vì vậy, khi sử dụng tầng hầm dưới nhà cao tầng làm hầm phòng không nhân dân trong thời chiến phải kể đến các loại tải trọng đặc biệt này. Đây là loại tải trọng có cường độ lớn hơn nhiều so với hoạt tải thiết kế ban đầu, tác dụng ngắn hạn. Hiện tượng vượt tải có thể gây hư hỏng kết cấu, sụp đổ từng phần, mất an toàn, gây sự cố nghiêm trọng. Với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, có nhiều giải pháp cải tạo để nâng cao khả năng chịu lực của kết cấu bê tông cốt thép hiện hữu. Tuy nhiên, việc chọn giải pháp phù hợp cho từng loại kết cấu, từng điều kiện làm việc, từng loại tải trọng, ... phụ thuộc vào nhất nhiều yếu tố. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phương pháp gia cường kết cấu dầm bằng bản thép ốp chịu tác dụng tải trọng sụp đổ cục bộ, là một trong các giải pháp nhằm kháng sập cho kết cấu nóc tầng hầm dưới các nhà cao tầng khi chịu tác dụng tải trọng sụp đổ từ các tầng phía trên.

2. Tải trọng sụp đổ tác dụng lên kết cấu nóc tầng hầm

Trong phạm vi bài báo, xét trường hợp công trình có số tầng đủ để bom đạn không xuyên thủng hết các tầng để tác dụng trực tiếp lên kết cấu nóc tầng hầm. Ngoài tải trọng thông thường theo thiết kế, kết cấu nóc hầm chịu tác dụng thêm tải trọng đặc biệt là tải trọng do sụp đổ từ kết cấu các tầng phía trên.

2.1. Tải trọng do trọng lượng của đống đổ vỡ

Khi các tầng phía trên tầng hầm bị phá hủy hoàn toàn, ước tính có khoảng 75% trọng lượng tường trong, sàn các tầng, mái, và 50% tường biên ngoài rơi xuống trần tầng hầm. Còn lại 25% tường trong, sàn các tầng, mái, và 50% tường biên ngoài là rơi ra ngoài. Tải trọng do trọng lượng đống đổ vỡ tính như sau:

$$q = \frac{0{,}5G_{TN} + 0{,}75(G_s + G_{TT})}{F} \quad \text{(kN/m2)} \qquad (1)$$

Trong đó:

G_{TN} - Trọng lượng tường ngoài của toà nhà, (kN);

G_{TT} - Trọng lượng tường trong của nhà, (kN);

G_s - Trọng lượng các sàn của các tầng nhà, (kN);

F - Diện tích tầng một lấy theo trục của tường ngoài, (m^2).

Đối với nhà có kết cấu khung BTCT hoặc thép có thể lấy q = 15 kN/m^2, không phụ thuộc vào số tầng của toà nhà.

2.2. Tải trọng do va chạm của các mảnh vỡ

Các mảnh vỡ, cấu kiện của kết cấu phía trên khi rơi xuống trần tầng hầm với vận tốc v_0 có thể xuyên vào trần tầng hầm.

Chiều sâu xuyên tính theo công thức:

$$h_x = K_x . \frac{P}{1,35F} . v_0 \qquad (m) \tag{2}$$

Trong đó:

K_x - Hệ số xuyên của vật liệu trần tầng hầm;

P - Trọng lượng của mảnh sụp, (kN);

F - Diện tích tiết diện ngang của mảnh, (m^2);

v_0 - Tốc độ chạm của mảnh lên trần tầng ngầm, (m/s);

$$v_0 = \sqrt{2gH} \tag{3}$$

g – Gia tốc trọng trường;

H - Chiều cao rơi của mảnh (m).

Áp lực xuyên được tính theo công thức:

$$S = \frac{P}{g} \cdot \frac{v_0^2}{2h_x} = 5.10^{-4} \cdot \frac{Pv_0^2}{h_x} \qquad (kN) \tag{4}$$

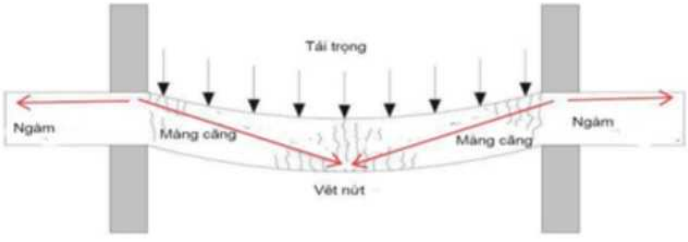
Thời gian tác dụng của áp lực xuyên :

$$t_x = \frac{h_x}{0,5v_0} \qquad (s) \tag{5}$$

Áp lực xuyên là tải trọng tác dụng dạng xung tức thời.

3. Một số giải pháp gia cường kết cấu dầm bê tông cốt thép.

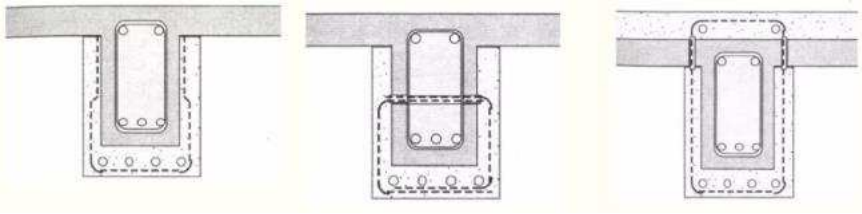
Việc gia cường kết cấu dầm không phải thực hiện khi kết cấu đã có hiện tượng hư hỏng, suy giảm khả năng chịu lực, mà việc gia cường tiến hành khi kết cấu vẫn làm việc trong trạng thái bình thường theo thiết kế ban đầu, nhưng cần gia cường để tăng khả năng chịu lực của kết cấu dưới tác dụng gia tăng tải trọng sụp đổ kết cấu từ các tầng trên.



Hình 1.Trạng thái nguy hiểm của dầm BTCT khi quá tải

Hiện nay, có một số giải pháp gia cường kết cấu dầm BTCT như sau:

- Gia cường bằng phương pháp tăng tiết diện: Bản chất của phương pháp này là mở rộng tiết diện của cấu kiện dầm hiện có bằng cách đổ thêm một lớp bê tông bao phủ mặt ngoài. Coi kết cấu sau khi gia cường làm việc như một kết cấu toàn khối duy nhất. Phạm vi bê tông bao phủ có thể kín toàn bộ bốn mặt của dầm, hoặc ba mặt của dầm, hoặc chỉ một mặt ở phương cần gia cường. Phương pháp này đòi hỏi phải xử lý bề mặt bám dính tốt giữa lớp bê tông mới và bê tông cũ, cần đủ thời gian để bê tông mới đạt cường độ thiết kế, ảnh hưởng đến không gian thổng thủy khi sử dụng.



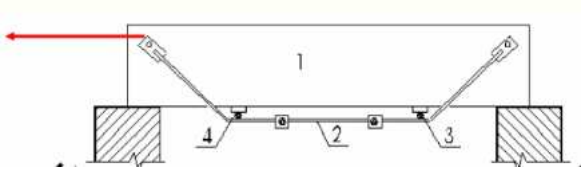
Hình 2.Gia cường dầm bọc ngoài bằng bê tông

- Gia cường bằng phương pháp dán màng FRP: Bản chất của phương pháp là tăng khả năng làm việc chịu cắt và chịu uốn của dầm BTCT nhờ lớp vật liệu FRP dán bên ngoài bề mặt kết cấu cũ. Nếu lựa chọn chủng loại vật liệu cường độ cao, thi công đảm bảo kỹ thuật, có thể tăng khả năng làm việc của kết cấu lên đến 30%, thời gian thi công được rút ngắn. Tuy nhiên, giá thành của vật liệu rất cao, độ bền liên kết giữa FRP và bề mặt bê tông khó kiểm soát, dễ bị bong tách khi chịu tác dụng tải trọng động và tác dụng nhiệt.



Hình 3.Gia cường dầm bằng dán màng FRP

- Gia cường bằng phương pháp căng cáp ứng lực trước: Bản chất của phương pháp là sử dụng cáp dự ứng lược tạo ra ứng suất trước tác dụng ngược với tác động của tải trọng. Biện pháp này hiệu quả hơn hẳn trong việc tăng khả năng chịu lực, giảm về rộng khe nứt và độ võng kết cấu. Tuy nhiên, việc bố trí đầu neo cáp cũng như bố trí đường cáp trong kết cấu cũ cực kỳ phức tạp.



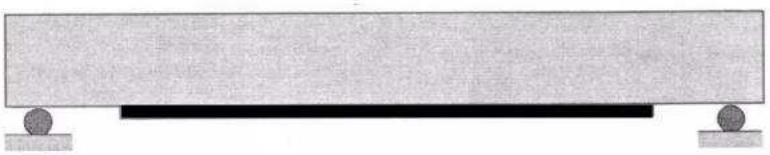
Hình 4. Nguyên lý gia cường dầm bằng cáp dự ứng lực

- Gia cường bằng gối tựa bổ sung: Bản chất của phương pháp bổ sung dối tựa nhằm giảm nhịp tính toán của cấu kiện. Có thể dùng cây chống đứng đỡ dáy dầm, truyền tải trọng xuống sàn đáy tầng hầm, có thể dùng cay chống xiên từ cột lên đáy dầm. Phương pháp này dễ

thi công, hiệu quả cao trong việc tăng khả năng chịu lực, giảm độ võng. Tuy nhiên, không gian sử dụng bị ảnh hưởng nghiêm trọng.

4. Gia cường bằng ốp bản thép.

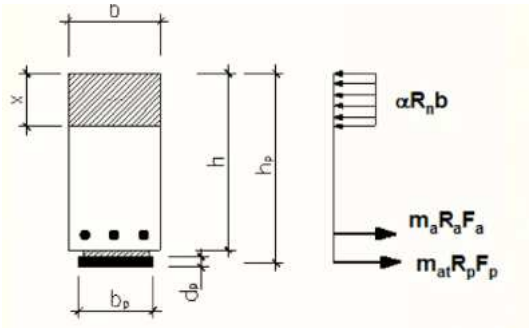
Đây là giải pháp hiệu quả trong việc gia cường dầm BTCT nhằm tăng khả năng chịu uốn và chịu cắt, ít ảnh hưởng đến hình dạng và kích thước của kết cấu gia cường.



Hình 5.Dán bản thép gia cố dầm BTCT

Trình tự các bước tính toán, thiết kế bản thép gia cường:

- Xác định khả năng chịu lực hiện trạng của tiết diện;
- Xác định diện tích thép bản gia cường và chọn kích thước bản thép;
- Kiểm tra khả năng chịu lực của tiết diện sau gia cường.



Hình 6. Mặt cắt tiết diện gia cường

Mô men kháng uốn của tiết diện dầm BTCT trước khi gia cường:

$$M_u = m_a R_a F_a \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \text{ với } x = \frac{R_a F_a}{\alpha R_n b} \quad (6)$$

Nếu $M_u \geq M_u^{tt}$ Thì không cần phải tính gia cường

Nếu $M_u < M_u^{tt}$ Thì cần phải tính gia cường.

Diện tích thép bản gia cường:

$$F_p = \frac{1}{m_{at} R_p} \cdot \frac{M_u^{tt} - M_u}{0,9 h_0} \quad (7)$$

Chọn kích thước bản thép sao cho không lớn hơn chiều rộng b của tiết diện dầm.

5. Bài toán

Tính toán tiết diện bản thép ốp gia cường dầm sàn nóc tầng hầm chịu tác dụng va chạm do dầm sàn tầng trên rơi xuống trong quá trình sụp đổ của các tầng trên bị phá hoại do bom đạn. Các thông số như sau:

- Kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép, bê tông cấp độ bền B25;
- Tiết diện dầm: 60 cm x 50 cm;
- Chiều dài dầm: 8,8 m;
- Cốt thép chịu lực: 8ϕ20;

- Chiều cao tầng: 3,9 m.

Số liệu tính toán như sau:

- Trọng lượng cấu kiện rơi (tính dầm gãy làm hai phần): P = 3,3 (Tấn);

- Tốc độ va chạm: $v_0 = \sqrt{20H} = 8,75$ (m/s);

- Chiều sâu xuyên vào cấu kiện dầm sàn nóc tầng hầm:

$$H_x = K_x . \frac{P}{1,35F} . v_0 = 0,057 \text{ (m)};$$

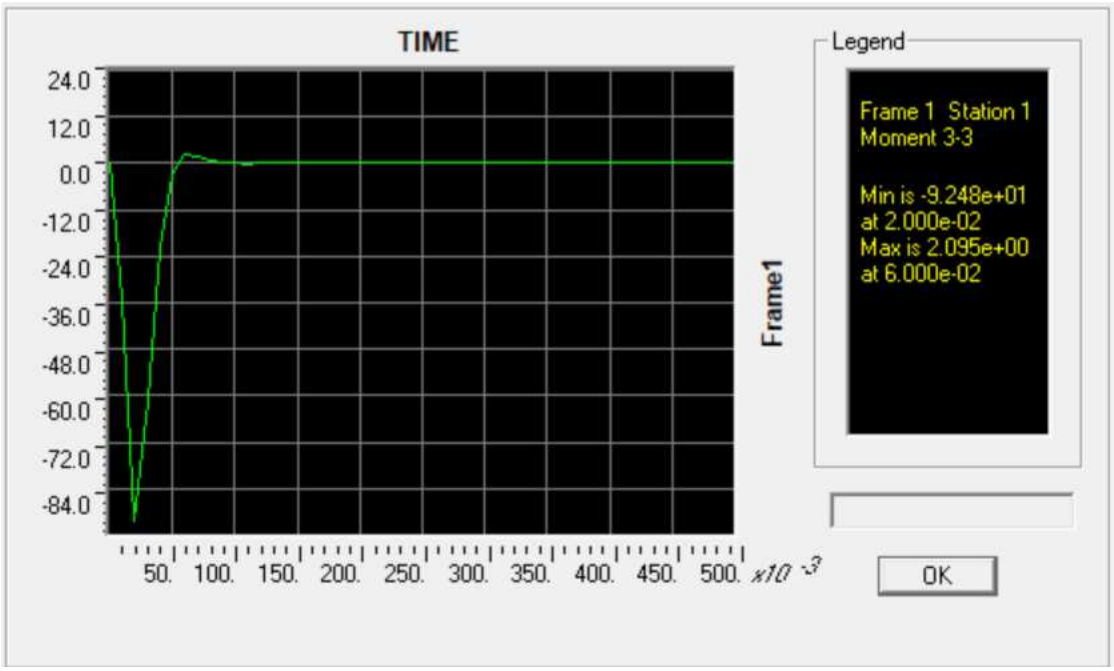
- Thời gian xuyên:

$$t_x = \frac{h_x}{0,5v_o} = 0,013 \text{ (s)};$$

- Xung va chạm:

$$S = 0,05 \frac{Pv_0^2}{h_x} = 221,42 \text{ (Tấn)}$$

Bỏ qua ảnh hưởng của sàn nóc tầng hầm, coi dầm làm việc độc lập, sử dụng phần mềm SAP2000 phân tích nội lực với mô hình dầm đơn giản hai đầu ngàm chịu tác dụng tải trọng động do xung va chạm. Kết quả được biểu đồ mô men lớn nhất trên dầm như sau:



Hình 7.Biểu đồ mô men của dầm nóc tầng hầm

- Mô men kháng uốn của tiết diện:

$$M_u = m_a R_a F_a \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) = 28,32 \text{ (T.m)}$$

- Mô men tính toán: $M_u^{tt} = 92,48$ (T.m). $M_u < M_u^{tt}$ nên cần phải tính gia cường.

- Diện tích bản thép gia cường:

$$F_p = \frac{1}{m_{at} R_p} . \frac{M_u^{tt} - M_u}{0,9h_0} = 82,43 \text{ (cm}^2\text{)}$$

Chọn tiết diện bản thép gia cường: 58 mm x 1,5 mm. Bố trí theo miền chịu lực, đảm bảo chiều dài liên kết.

6. Kết luận

Việc lựa chọn phương pháp gia cường kết cấu dầm BTCT sao cho phù hợp với đặc tính tải trọng tác dụng, biện pháp thi công, nhu cầu sử dụng là cần thiết trên cơ sở đảm bảo an toàn của kết cấu làm việc trong điều kiện bất lợi nhất, chống sụp đổ từ kết cấu các tầng phía trên nóc tầng hầm .

Tùy từng điều kiện bài toán cụ thể, tính toán được tiết diện bản thép gia cường và chi tiết liên kết giữa bản thép và kết cấu bê tông.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Trí Tá, Vũ Đình Lợi, Đặng Văn Đích (2008), Giáo trình công sự tập I, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
2. Đặng Văn Đích, Vũ Đình Lợi, (2000), Giáo trình công sự tập II, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
3. Vũ Đình Lợi (2005), Giáo trình Công sự (dùng cho học viên cao học chuyên ngành xây dựng CTQP), Học viện Kỹ thuật Quân sự.
4. Lê Văn Kiểm (2004), Hư hỏng sửa chữa gia cường công trình, Nhà xuất bản ĐHQG TP. Hồ Chí Minh.
5. Nguyễn Xuân Bích (2005), Sữa chữa và gia cố kết cấu BTCT, NXB Khoa học và kỹ thuật.
6. BS EN 1992-1-2-2004, Eurocode 2 - Design of concrete structures

Research on structural calculation of beams strengthened with steel plates to prevent local collapse

Abstract: *This paper presents the research results on strengthening solutions for reinforced concrete beam structures and proposes a structural calculation method for beams strengthened with steel plates to prevent local collapse. The objective is to ensure that the basement ceilings of high-rise buildings do not collapse under the impact of loads caused by the progressive collapse of the upper floors.*

Keywords: impact load; collapse; beam structure strengthening.

Nghiên cứu hiệu quả gia cường khả năng kháng cắt của tấm CFRP cho dầm bê tông cốt thép

Trần Hoài Nam[1], Phạm Thanh Bình[2], Vũ Ngọc Quang[2]

[1]Hệ quản lý học viên đào tạo sau đại học – Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2]Bộ môn XD Nhà & CTCN – Viện Kỹ thuật CTĐB – Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: namhvktqs88@gmail.com

Tóm tắt

Phương pháp gia cường tăng khả năng kháng cắt của kết cấu dầm bê tông cốt thép sử dụng vật liệu tấm CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) dán ngoài trở nên phổ biến, với những ưu điểm về tính chất cơ lý, hiệu quả kỹ thuật và công tác thi công. Bài báo trình bày nguyên tắc tính toán, quy trình thiết kế tăng cường khả năng kháng cắt cho kết cấu dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng tấm CFRP dán ngoài nhằm đảm bảo khả năng chịu lực và nhu cầu sử dụng khai thác theo TC ACI 440 2R - 17. Đồng thời tiến hành khảo sát tính toán ảnh hưởng của bề rộng, khoảng cách, số lượng, số lớp tấm CFRP đến hiệu quả gia cường đưa ra lựa chọn phương pháp tối ưu và thực hành thử nghiệm số để đánh giá hiệu quả gia cường của nó.

Từ khóa: *dầm bê tông cốt thép; gia cường; tấm sợi composite; khả năng chịu cắt.*

1. Giới thiệu

Việt Nam có khí hậu nhiệt đới gió mùa, với độ ẩm cao, mưa nhiều và đặc biệt là môi trường biển có tính ăn mòn cao. FRP với khả năng chống ăn mòn tốt là một lựa chọn phù hợp cho các công trình dân dụng, ven biển, cầu cảng và các công trình ngầm làm giảm thiểu nguy cơ hư hại do ăn mòn, kéo dài tuổi thọ công trình, đặc biệt là các hạ tầng giao thông quan trọng như cầu và đường hầm.

Bên cạnh đó, nhiều công trình tại Việt Nam đã cũ và xuống cấp, đặc biệt là các công trình xây dựng từ thời kỳ trước đổi mới. Các kết cấu cũ không đáp ứng được nhu cầu tải trọng ngày càng lớn. Đồng thời, các kết cấu này cần phải được cải tạo để đáp ứng những tiêu chuẩn mới ngày càng chặt chẽ, đòi hỏi tính an toàn cao hơn như khả năng chịu lực tốt trong điều kiện địa chấn mặc dù Viêt Nam không phải là quốc gia có nguy cơ động đất cao, nhưng vẫn có một số khu vực miền Trung và miền Bắc tiềm ẩn nguy cơ. Sử dụng FRP để gia cường có thể tăng khả năng chịu lực, cải thiện độ bền mà không cần phải phá bỏ hoặc xây mới toàn bộ để tiết kiệm chi phí và thời gian so với việc xây mới, trong khi vẫn đảm bảo an toàn và hiệu suất sử dụng. FRP với độ bền kéo cao, có thể giúp tăng cường khả năng chống chịu động đất cho các công trình trong các khu vực có nguy cơ địa chấn, giảm thiểu rủi ro thiệt hại.

Hiện nay, đối với gia cường kết cấu bằng FRP, thường sử dụng các dạng FRP sợi carbon (CFRP), aramid (AFRP), thủy tinh (GFRP). Trên Hình 1 giới thiệu các dạng vật liệu composite dùng gia cường kết cấu bê tông cốt thép và Hình 2 giới thiệu hình ảnh sử dụng tấm sợi CFRP trong việc gia cường kháng uốn và kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép.



Hình 1. Các dạng vật liệu composite sử dụng trong gia cường kết cấu BTCT



Hình 2. Hình ảnh gia cường dầm BTCT bằng vật liệu CFRP [11].

Để đánh giá hiệu quả của việc gia cường qua các thông số như vật liệu, khả năng chịu lực trước khi được gia cường cần được phân tích kỹ lưỡng đặc biệt hiệu quả sau khi được gia cường đối với cấu kiện, mức độ gia cường (số lớp, phương pháp, loại vật liệu gia cường) đến dạng phá hoại và sức chịu tải giới hạn của kết cấu. Vì vậy, việc gia cường được dán bên ngoài bề mặt cấu kiện, đóng vai trò bổ sung khả năng chịu lực cắt và chống lại sự hình thành hoặc mở rộng các vết nứt xiên, từ đó gia tăng khả năng chịu cắt của dầm. Điều này giúp giảm ứng suất cắt trong dầm, cải thiện khả năng chịu tải và độ bền tổng thể của cấu kiện. Việc áp dụng vật liệu FRP tại nước ta hiện nay khá rộng rãi, tuy nhiên hệ thống tiêu chuẩn hiện nay của Việt Nam thì còn hạn chế. Quá trình tính toán chủ yếu dựa trên các tiêu chuẩn nước ngoài như tiêu chuẩn ACI 440.2R-17 (Hoa Kỳ), fib 14 (Ủy ban bê tông châu Âu), TR55 (Anh), ISIS (Canada), JSCE (Nhật Bản) [8-12]. Các nghiên cứu về ứng xử gia cường đối với kết cấu bê tông cốt thép và hiệu quả gia cường của vật liệu FRP nói chung và CFRP nói riêng đã được nghiên cứu ở trong và ngoài nước một số nghiên cứu điển hình [2-7]. Các kết quả thu được đều chứng minh được hiệu quả gia cường của vật liệu này đối với khả năng kháng uốn, kháng cắt, khả năng chịu nén, chịu xoắn…đối với kết cấu bê tông cốt thép. Hiệu quả gia cường phụ thuộc rất nhiều vào đặc trưng cơ học của vật liệu FRP (có giá trị khác nhau đối với từng loại sợi CFRP, AFRP, GFRP đối với từng nhà sản xuất vật liệu), phương án và quá trình thi công và quy cách gia cường.

Nội dung bài báo trình bày vấn đề thiết kế gia cường kháng cắt theo tiêu chuẩn ACI 440.2R-17 [8], tiến hành thử nghiệm tính toán sự làm việc của tấm CFRP khi được gia cường cho cấu kiện dầm bê tông cốt thép đồng thời khảo sát sự ảnh hưởng của các yếu tố như số lớp

dán, phương pháp dán, bề rộng tấm CFRP, khoảng cách ảnh hưởng đến khả năng chịu lực cấu kiện khi được gia cường. Từ đó đề xuất phương án tối ưu đối với từng trường hợp.

2. Tính toán theo Tiêu chuẩn ACI 440.2R-17

2.1. Đặc trưng cơ lý của vật liệu FRP

Vật liệu FRP được tạo thành bởi sự kết hợp của vật liệu sợi với vật liệu nền có cường độ và độ cứng phụ thuộc vào vật liệu hợp thành, đặc trưng vật liệu của FRP phụ thuộc vào thành phần cốt sợi, tỷ lệ thể tích sợi, đường kính sợi, hướng phân bố các sợi, phương pháp chế tạo và các đặc tính cơ lý của chất dẻo nền. Trong xây dựng, sợi phân bố đẳng hướng của trong vật liệu FRP được sử dụng rộng rãi và đem lại hiệu quả cao. Các vật liệu FRP vô hướng, cường độ và độ cứng lớn nhất đạt được khi composite (FRP) chịu kéo theo hướng phân bố sợi, bé nhất theo hướng vuông góc với sợi. Hiện nay sợi carbon, sợi aramid và sợi thủy tinh với cấu trúc nền là epoxy được sử dụng rộng rãi. Sợi carbon, sợi aramid và sợi thủy tinh cũng có nhược điểm riêng của từng loại. Sợi aramid độ bền thấp, trong môi trường nhiệt độ cao thì làm việc kém. Trong khi đó sợi carbon có mô đun đàn hồi cao nên được sử dụng phổ biến trong các kết cấu xây dựng. Dưới đây là đặc điểm của từng loại cốt sợi và của vật liệu nền epoxy theo [1].

Bảng 1. Một số đặc trưng cơ lý của vật liệu sợi

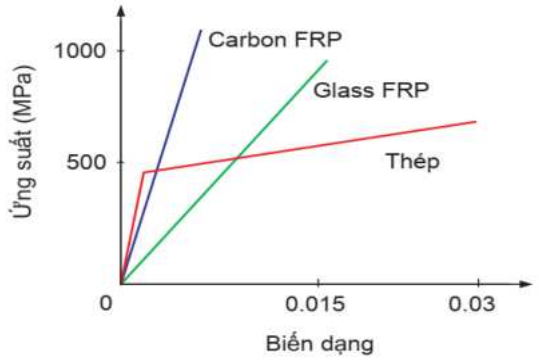
Loại sợi	Tên sợi	Dung trọng (g/cm^3)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Cường độ chịu kéo (MPa)	Biến dạng cực hạn (%)	Hệ số dãn nở nhiệt ($x1^{06}/^0C$)	Hệ số Poisson
Thủy tinh	E-Glass	2,54	73,50	3500	4,80	-0,52	0,22
	G-Glass	2,48	88,20	4375	5,00	-0,30	0,35
Aramid	Kevlar49	1,46	133,0	3675	2,80	0,21	0,35
	Technora	1,40	70,70	3045	4,60	0,63	0,35
Carbon	T-300	1,76	234,5	3710	1,40	0,062	0,20
	AS-4	1,79	252	4130	1,65	0,062	0,20
	IM-7	1,77	304,5	5390	1,81	0,10	0,20

Bảng 2. Một số đặc trưng cơ lý của vật liệu sợi

Loại Epoxy	Sikadur 300 (MPa)	Tyfo S epoxy (MPa)
Cường độ chịu kéo	54,4	71,4
Mô đun đàn hồi	1700	3135

Độ dãn dài cực hạn	3%	5%
Cường độ chịu uốn	78,2	121,7

CFRP có tính chất cơ học vượt trội đặc biệt là độ bền cao khả năng chống chịu môi trường và khối lượng nhẹ giúp nó trở thành một trong những vật liệu composite được sử dụng phổ biến nhất trong ứng dụng các ngành công nghiệp hiện đại nói chung và lĩnh vực xây dựng nói riêng trong gia cường cấu kiện BTCT. Hình 3 thể hiện biểu đồ ứng suất - biến dạng của các vật liệu cốt sợi.



Hình 3. Ứng suất - biến dạng của vật liệu cốt sợi carbon và sợi thủy tinh

2.2. Phương pháp gia cường bằng tấm CFRP

+ **Phương án dán toàn bộ**: CFRP được dán hoàn toàn quanh dầm, giúp tăng đáng kể khả năng chịu cắt và cung cấp thêm khả năng chống xoắn.

+ **Phương án dán không hoàn toàn**: Khi việc dán toàn bộ là không khả thi (như trong trường hợp dầm có sàn liền kề), CFRP có thể được dán vào hai mặt đối diện của dầm để tăng cường chịu cắt.

2.3. Thiết kế gia cường kháng cắt tính toán theo tiêu chuẩn ACI 440.2R-17

Khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép sau khi được gia cường tấm CFRP (V_n) được xác định bằng:

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (1)$$

Trong đó: V_c - khả năng chịu cắt của tiết diện bê tông;

V_s - khả năng chịu cắt của cốt thép đai;

V_f - khả năng chịu cắt của vật liệu CFRP.

Theo tiêu chuẩn ACI 440.2R -17 khả năng chịu cắt của kết cấu BTCT sau khi được gia cường bằng tấm CFRP ϕV_n phải lớn hơn so với lực cắt yêu cầu đối với dầm V_u:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2)$$

Trong đó: V_u **-** lực cắt lớn nhất;

ϕ **-** hệ số giảm độ bền khi tính toán chịu cắt lấy bằng 0,75.

Điều kiện áp dụng cường kháng cắt cho kết cấu dầm BTCT bằng cách sử dụng tấm CFRP là tổng khả năng chịu cắt của cốt thép đai V_s và tấm CFRP V_f thỏa mãn:

$$V_s + V_f \le 0,83\sqrt{f_c^{'}}b_w d \quad (3)$$

Hoặc $$\frac{V_u}{\phi} - V_c \le 0,83\sqrt{f_c^{'}}b_w d \quad (4)$$

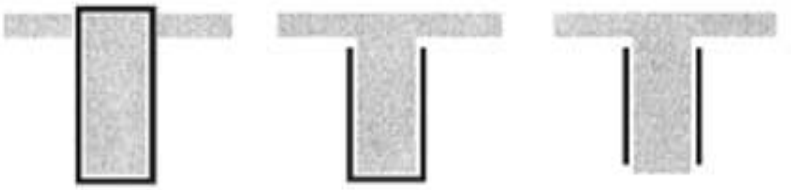
Trong đó: b_w - bề rộng của dầm BTCT;

d - chiều cao làm việc của tiết diện;

$f_c^{'}$ - cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông.

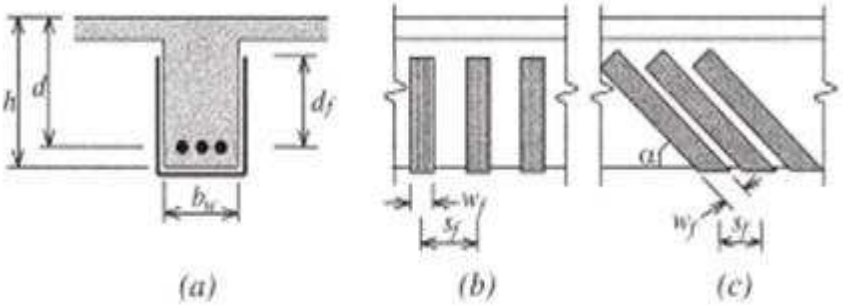
Sơ đồ dán tấm FRP gia cường: 3 sơ đồ dán tấm CFRP gia cường kháng cắt thường được áp dụng trong thực tế được minh họa trên Hình 4 Tấm CFRP gia cường có thể được dán theo dạng tấm liên tục hoặc ở dạng phân bố theo chiều dài như Hình 5. Trong trường hợp dán theo phân bố, khoảng cách lớn giữa các dải CFRP cần thỏa mãn điều kiện sau:

$$s_{f,\max} \le \frac{d}{4} + w_f \quad (5)$$



Dán kín *Dán 3 mặt* *Dán 2 mặt*

Hình 4. Sơ đồ dán tấm CFRP điển hình khi gia cường kháng cắt



a) Dán liên tục; *b,c) Dán phân bố*

Hình 5. Phương án dán tấm CFRP theo chiều dài

Ảnh hưởng của sơ đồ dán được tính đến thông qua hệ số suy giảm cường độ phụ thêm của tấm như trong Bảng 1 phụ thuộc vào sơ đồ dán tấm CFRP.

Bảng 3: Hệ số suy giảm cường độ phụ thêm của tấm FRP khi tính toán gia cường kháng cắt [8]

Sơ đồ dán gia cường	Hệ số ψ_f
Dán kín 4 mặt	$\psi_f = 0,95$
Dán 2 hoặc 3 mặt	$\psi_f = 0,85$

Do đó, khả năng chịu cắt của tiết diện sau khi gia cường được xác định theo công thức:

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (6)$$

- Khả năng chịu cắt của bê tông:

$$V_c = 0,17\sqrt{f_c'} b_w d \quad (7)$$

- Khả năng chịu cắt của cốt thép đai:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (8)$$

Trong đó: A_v - Diện tích cốt thép đai chịu cắt;

f_y - Giới hạn chảy của cốt thép;

s - Khoảng cách giữa các cốt thép đai;

d - Chiều cao làm việc của cốt đai.

- Khả năng chịu cắt của tấm FRP:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (9)$$

$$A_{vf} = 2nt_f w_f \quad (10)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (11)$$

Trong đó: A_{fv} - Diện tích mặt cắt ngang của cốt gia cường tấm CFRP;

f_{fe} - Ứng suất kéo hiệu quả tấm CFRP tại thời điểm phá hoại;

α - Góc nghiêng tấm CFRP so với trục dọc của cấu kiện;

d_{fv} - Chiều cao làm việc tấm CFRP;

s_f - Khoảng cách giữa các tấm hoặc dải CFRP;

n - Số lượng lớp CFRP;

t_f - Chiều dày của một lớp CFRP;

w_f - Chiều rộng tấm CFRP;

E_f - Mô đun đàn hồi của vật liệu CFRP;

ε_{fe} - Biến dạng hữu hiệu của tấm CFRP.

Biến dạng hữu hiệu của tấm CFRP ε_{fe} phụ thuộc vào sơ đồ dán tấm trên kết cấu được gia cường và được xác định như sau:

- Trường hợp tấm CFRP dán tiết diện (4 mặt):

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \le 0,75\varepsilon_{fu} \quad (12)$$

với ε_{fu} là biến dạng phá hoại cuối cùng của vật liệu CFRP.

- Trường hợp dán 2 mặt hoặc 3:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \le 0,004 \quad (13)$$

Với k_v hệ số giảm khả năng bám dính phụ thuộc vào cường độ bê tông, sơ đồ dán và chiều dày của tấm CFRP:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900\varepsilon_{fu}} \le 0,75 \quad (14)$$

L_e là chiều dài mà trên đó ứng suất bám dính được duy trì, được xác định theo công thức sau đây:

$$L_e = \frac{23300}{\left(nt_f E_f\right)^{0,58}} \quad (15)$$

k_1 và k_2 là các hệ số điều chỉnh độ giảm sự bám dính kể đến ảnh hưởng của cường độ bê tông và sơ đồ dán:

$$k_1 = \left(\frac{f_c^{'}}{27}\right)^{2/3} \quad (16)$$

+ Khi dán 3 mặt dạng chữ U:

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad (17)$$

+ Khi dán 2 mặt:

$$k_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} \quad (18)$$

2.4. Quy trình thiết kế gia cường kháng cắt cho kết cấu bê tông cốt thép

Trên cơ sở nguyên tắc tính toán theo tiêu chuẩn ACI 440.2R-17 đã được trình bày ở trên, có thể tổng hợp các bước thiết kế gia cường khả năng chịu cắt cho dầm bê tông cốt thép bằng tấm CFRP như sau:

Bước 1: Kiểm tra điều kiện áp dụng gia cường kháng cắt bằng tấm CFRP;

$$\frac{V_u}{\phi} - V_c \le 0,83\sqrt{f_c^{'}} b_w d \quad \textit{(công thức 4)}$$

$$s_{f,\max} \le \frac{d}{4} + w_f \quad \textit{(công thức 5)}$$

Bước 2: Xác định các đặc trưng cơ học tính toán của vật liệu CFRP;

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^{*} \quad \textit{(công thức 19)}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^{*} \quad \textit{(công thức 20)}$$

Bước 3: Xác định biến dạng tỷ đối hiệu quả trong tấm CFRP;

$$L_e = \frac{23300}{\left(nt_f E_f\right)^{0,58}} \quad \textit{(công thức 15)}$$

$$k_1 = \left(\frac{f_c^{'}}{27}\right)^{2/3} \quad \textit{(công thức 16)}$$

+ Khi dán 3 mặt dạng chữ U:

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad \textit{(công thức 17)}$$

+ Khi dán 2 mặt:

$$k_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} \quad \textit{(công thức 18)}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900\varepsilon_{fu}} \le 0,75 \quad \textit{(công thức 14)}$$

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \quad \textit{(công thức 13)}$$

Bước 4: Tính toán khả năng tham gia chịu cắt của tấm CFRP;

$$A_{vf} = 2nt_f \mathrm{w}_f \quad \textit{(công thức 10)}$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad \textit{(công thức 11)}$$

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_{fv}}{s_f} \quad \textit{(công thức 9)}$$

Bước 5: Tính toán khả năng tham gia chịu cắt của tiết diện dầm sau khi được gia cường tấm CFRP;

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad \textit{(công thức 6)}$$

$$\phi V_n \ge V_u \quad \textit{(công thức 2)}$$

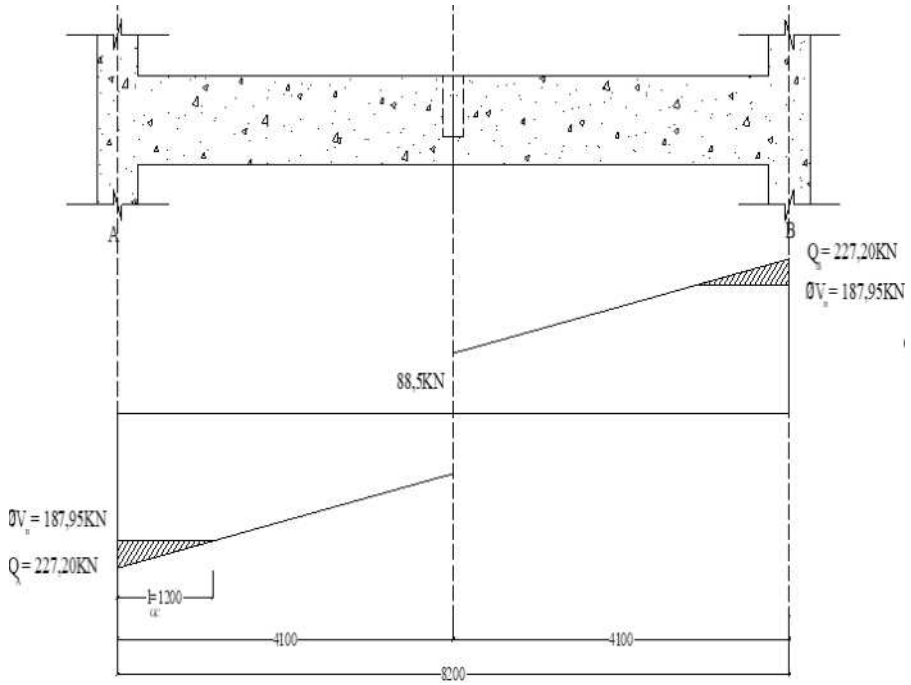
$$\Delta = \frac{\phi V_n^{'} - V_u}{V_u} \% \quad \textit{(công thức 21)}$$

Bước 6: Đưa ra kết luận phương án gia cường.

3. Bài toán thiết kế gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép

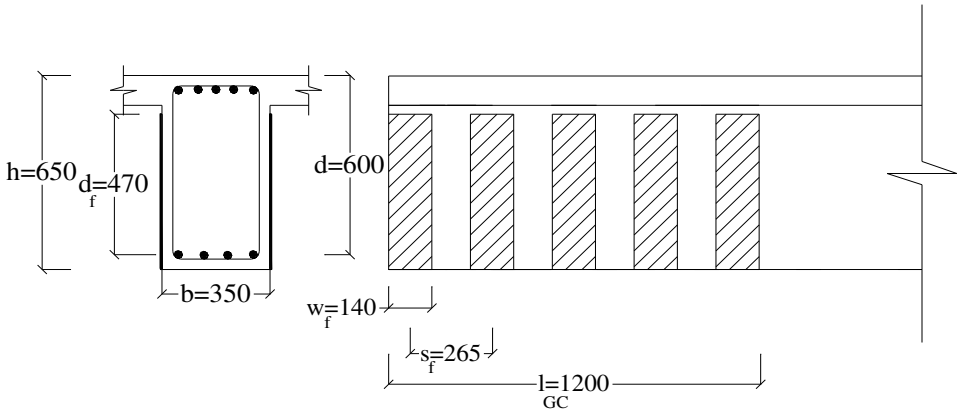
3.1. Đặt vấn đề

Dầm có tiết diện ngang 650× 350mm, chiều dài nhịp 8200mm. Cường độ bê tông hiện trạng của dầm $f_c^{'} = 25N/mm^2$*.Cốt thép đai dùng loại thép CB 240-T với* $R_{sw} = 170Mpa$ *ở vị trí đầu dầm l/4=2,05m là* $\phi 8a200$ *và giữa dầm* $\phi 8a400$*. Dựa trên số liệu khảo sát hiện trạng, tính toán được khả năng chịu cắt của bê tông, của cốt thép đai lần lượt là* $V_c = 169,5KN, V_s = 81,1KN$*. Do đó, cường độ chịu cắt thiết kế của dầm hiện có là* $\phi(V_c + V_s) = 0,75 \times (169,5 + 81,1) = 187,95\,KN$*. Do thay đổi công năng làm việc của các sàn tầng trong công trình, lực cắt lớn nhất xuất hiện tại tiết diện đầu dầm bị tăng lên, có giá trị* $V_u = 227,20KN$*. (xem biểu đồ lực cắt). Yêu cầu thiết kế gia cường kháng cắt cho dầm bằng vật liệu CFRP.*

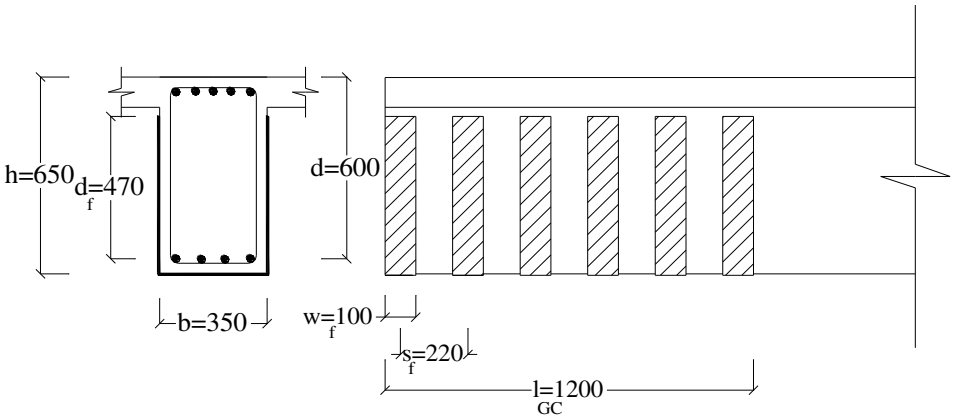


Hình 6. Sơ đồ lực cắt trong dầm

Thử nghiệm tính toán khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép được gia cường tấm CFRP. Giải pháp dán tấm CFRP được thực hiện dán 2 mặt và 3 mặt (xem Hình 7 và Hình 8).



Hình 7. Sơ đồ dán 2 mặt tấm CFRP gia cường dầm BTCT



Hình 8. Sơ đồ dán 3 mặt tấm CFRP gia cường dầm BTCT

Bảng 4: Thông số vật liệu và hình học [8]

Thông số hình học và cường độ		Thông số tấm CFRP gia cường	
bxh	350x650mm	Chiều dày t_f	0,165mm
d	600mm	f_{fu}^*	3790N/mm^2
$f_c^'$	25N/mm^2	ε_{fu}^*	0,017
V_c	169,50KN	E_f	227530N/mm^2
V_s	81,10KN	Quy cách gia cường	
$\phi(V_c+V_s)$	187,95KN	d_f	470mm
V_u	227,20KN	l_{GC}	1200m

Bước 1: Kiểm tra điều kiện áp dụng gia cường kháng cắt bằng tấm CFRP:

Áp dụng công thức (4), (5) ta `có:

$$\frac{V_u}{\phi}-V_c \le 0,83\sqrt{f_c^'}b_w d$$

$$\frac{V_u}{\phi}-V_c=\frac{227,20}{0,75}-169,5=133,43KN<0,83\sqrt{f_c^'}b_w d=0,83\sqrt{25}\times 350\times 600=871500N=871,5KN$$

Trong trường hợp dán theo dải, khoảng cách lớn nhất giữa các dải cần đảm bảo:

Dán 2 mặt: $s_{f,max}\le \frac{d}{4}+w_f \Leftrightarrow s_{f,max}=265mm\le \frac{d}{4}+w_f=290mm$ (thỏa mãn)

Dán 3 mặt (chữ U): $s_{f,max}\le \frac{d}{4}+w_f \Leftrightarrow s_{f,max}=220mm\le \frac{d}{4}+w_f=250mm$ (thỏa mãn)

$\Rightarrow$ Điều kiện áp dụng được thỏa mãn.

Bước 2: Xác định các đặc trưng cơ học tính toán của vật liệu CFRP:

Xác định các đặc trưng theo công thức (19), (20):

Hệ số chiết giảm độ bền do tác động của môi trường $C_E = 0,95$

$$f_{fu}=C_E f_{fu}^*=0,95\times 3790=3600N/mm^2$$

$$\varepsilon_{fu}=C_E\varepsilon_{fu}^*=0,95\times 0,017=0,016$$

Bước 3: Xác định biến dạng hữu hiệu trong tấm CFRP:

Xác định các thông số theo công thức (15), (16), (17), (18), (14) và (13):

Chiều dài dính bám L_e :

$$L_e=\frac{23300}{\left(nt_f E_f\right)^{0,58}}=\frac{23300}{(1\times 0,165\times 227,53\times 10^3)^{0,58}}=51,8\ mm$$

Hệ số suy giảm bám dính, với sơ đồ dán 2 mặt:

$$k_1=\left(\frac{f_c^'}{27}\right)^{2/3}=\left(\frac{25}{27}\right)^{2/3}=0,95$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} = \frac{470 - 2 \times 51,8}{470} = 0,78$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900\varepsilon_{fu}} = \frac{0,95 \times 0,78 \times 51,8}{11900 \times 0,016} = 0,2 \le 0,75$$

Hệ số suy giảm bám dính, với sơ đồ dán 3 mặt (chữ U):

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} = \frac{470 - 51,8}{470} = 0,89$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900\varepsilon_{fu}} = \frac{0,95 \times 0,89 \times 51,8}{11900 \times 0,016} = 0,228 \le 0,75$$

Biến dạng hữu hiệu của tấm CFRP:

Dán 2 mặt: $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} = 0,2 \times 0,016 = 0,0032 \le 0,004$

Dán 3 mặt dạng chữ U: $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} = 0,228 \times 0,016 = 0,0037 \le 0,004$

Bước 4: Tính toán khả năng tham gia chịu cắt của tấm CFRP:

Diện tích tấm CFRP chịu cắt được tính toán theo công thức (10):

Dán 2 mặt: $A_{fv} = 2nt_f w_f = 2 \times 1 \times 0,165 \times 140 = 48,51\ mm^2$

Dán 3 mặt (chữ U): $A_{fv} = 2nt_f w_f = 2 \times 1 \times 0,165 \times 100 = 34,65 mm^2$

Ứng suất hiệu quả trong tấm CFRP được xác định theo công thức (11):

Dán 2 mặt: $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 227,53 \times 0,0032 = 0,733\ KN / mm^2$

Dán 3 mặt (chữ U): $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 227,53 \times 0,0037 = 0,837\ KN / mm^2$

Khả năng chịu cắt của tấm CFRP được tính toán theo công thức (9):

Dán 2 mặt: $V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_{fv}}{s_f} = \frac{48,51 \times 0,733 \times 1 \times 470}{265} = 63,09 KN$

Dán 3 mặt (chữ U): $V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_{fv}}{s_f} = \frac{34,65 \times 0,837 \times 1 \times 470}{220} = 61,95\ KN$

Bước 5: Tính toán khả năng tham gia chịu cắt của tiết diện dầm sau khi gia cường tấm CFRP:

Áp dụng theo công thức (6), (2), (21) ta có:

Dán 2 mặt:

$$\phi V_n^{'} = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) = 0,75 \times (169,5 + 81,10 + 0,85 \times 63,09) = 228,17\ KN > V_u = 227,20 KN$$

Dán 3 mặt (chữ U):

$$\phi V_n^{'} = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) = 0,75 \times (169,5 + 81,10 + 0,85 \times 61,95) = 227,44\ KN > V_u = 227,20 KN$$

Việc gia cường chịu cắt cho dầm BTCT được đảm bảo. Cường độ chịu cắt của dầm được gia cường tăng lên so với lực cắt yêu cầu:

Dán 2 mặt: $\Delta = \frac{\phi V_n^{'} - \phi V_n}{\phi V_n} \% = \frac{228,17 - 227,20}{227,20} \% = 0,43\%$

Dán 3 mặt (chữ U): $\Delta = \frac{\phi V_n^{'} - \phi V_n}{\phi V_n} \% = \frac{227,44 - 227,20}{227,20} \% = 0,11\%$

3.2. Khảo sát ảnh hưởng của bề rộng, khoảng cách, số lượng, số lớp tấm CFRP đến hiệu quả gia cường khả năng chịu cắt cho dầm bê tông cốt thép.

Mục đích: Khảo sát trên cùng số lớp và trên cùng phương án dán tấm CFRP đưa ra lựa chọn phương án tối ưu nhất về vật liệu vẫn đảm bảo khả năng chịu cắt sau khi được gia cường.

Bảng 5. Khảo sát ảnh hưởng của bề rộng, khoảng cách, số lượng, số lớp tấm đến khả năng chịu cắt dầm BTCT

	Phương án dán		mm)	w_f mm)	s_f mm)	$s_{f,max}$	A_{fv} (mm^2)	V_f (KN)	$\phi V_n^{'}$ (KN)	Δ
	Dán 2 mặt		00	83	50	4,65	6 5,14	2 29,47		
			20	16	70	1,58	6 6,34	2 30,24	,34	
			40	65	90	8,51	6 3,09	2 28,17	**,43**	
	Dán 3 mặt dạng chữ U		0	85	40	1,19	6 6,30	2 30,22	,33	
			00	20	50	4,65	6 1,95	2 27,44	**,11**	
			30	68	80	5,05	6 6,23	2 30,17	,31	
	Dán 2 mặt		0	24	30	5,44	8 5,30	2 42,33	,66	
			20	70	70	3,16	1 06,15	2 55.62	2,51	
	Dán 3 mặt dạng chữ U		0	24	30	5,44	9 7,35	2 50,01	0,03	
			20	70	70	3,16	1 21,14	2 65,18	6,72	

Kết quả khảo sát trong bảng 3 cho thấy:

Trong trường hợp 1: Khi số lớp dán là 1, với phương pháp dán 2 mặt ta lựa chọn phương án với bề rộng tấm 140 mm và số lượng tấm bằng 5 đảm bảo tối ưu với khả năng chịu cắt $\phi V_n^{'} = 228,17KN \geq V_u = 227,20KN$ và $\Delta = 0,43$.

Với phương pháp dán 3 mặt ta lựa chọn phương án với bề rộng tấm 100 mm và số lượng tấm bằng 6 đảm bảo tối ưu với khả năng chịu cắt $\phi V_n^{'} = 227,44KN \geq V_u = 227,20KN$ và $\Delta = 0,11$.

Trong trường hợp 2: Khi số lớp dán là 2, với phương án dán 2 mặt ta lựa chọn phương án với bề rộng tấm 80 mm và số lượng tấm bằng 6 đảm bảo tối ưu với khả năng chịu cắt

$\phi V_n^{'} = 242,33KN \geq V_u = 227,20KN$ và $\Delta = 6,66$.

Với phương pháp dán 3 mặt ta lựa chọn phương án với bề rộng tấm 80 mm và số lượng tấm bằng 6 đảm bảo tối ưu với khả năng chịu cắt $\phi V_n^{'} = 250,01KN \geq V_u = 227,20KN$ và $\Delta = 10,03$

Trong hai trường hợp ta lựa trường hợp 1 với dán 1 lớp đảm bảo tối ưu hơn so với dán 2 lớp do $\Delta = 0,43$ | $\Delta = 6,66$ (Dán 2 mặt) và $\Delta = 0,11$ | $\Delta = 10,03$ (Dán 3 mặt).

4. Kết luận

Phương pháp gia cường bằng tấm CFRP dán ngoài làm tăng khả năng chịu cắt cho kết cấu dầm bê tông cốt thép. Tiến hành khảo sát thực nghiệm tính toán sự ảnh hưởng các yếu tố như cùng số lớp dán, cùng phương án dán lựa chọn phương án tốt nhất trong từng trường hợp đảm bảo tối ưu về vật liệu mà vẫn đảm bảo về khả năng chịu cắt của cấu kiện sau khi được gia cường. Kết quả tính toán trong hai trường hợp ta lựa trường hợp 1 với dán 1 lớp đảm bảo tối ưu hơn so với dán 2 lớp do $\Delta = 0,43$ | $\Delta = 6,66$ (Dán 2 mặt) và $\Delta = 0,11$ | $\Delta = 10,03$ (Dán 3 mặt) vì lực cắt $\phi V_n^{'}$ gần nhất với V_u đảm bảo khả năng chịu lực.

Tài liệu tham khảo

1. PGS.TS. Nguyễn Trung Hiếu, PGS.TS Lý Trần Cường, (2020). Giáo trình gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi composite. NXBXD.
2. Lâm, C. V., Lan, N. (2016). Đánh giá hiệu quả của các biện pháp gia cường sức kháng cắt đối với cầu bê tông cốt thép thường bằng phần mềm Abaqus và thực nghiệm. Tạp chí Giao thông vận tải, (3/2016): 53–56.
3. Hà Mạnh Hùng và Nguyễn Trung Hiếu Hiệu quả gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi Carbon. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE 2021.15 (IV): 102-111.
4. Alzoubi, F., Zhengliang, L. (2007). Overview shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites. Journal of Applied Sciences, 7(8):1093-1106.
5. Chen, J.-F., Teng, J. G. (2003). Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. Construction and Building Materials, 17(1):27.
6. Imran A. Bukhari (2013). Shear Strengthening of Short Span Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets. Research article - civil engineering.

7. J. Jayaprakash (2008). Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bidirectional CFRP strips. Science Direct.
8. ACI 440.2R-17(2017). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Reported by ACI Committee 440, American Concrete Institute.
9. FIP Bulletin No 14 (2001). Externally Bonded FRP Reinforcement for RC structures. Technical Report, Bulletin 14, International Federation for Structural Concrete.
10. ISIS (2008). FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Design Manual 4, Version 2. The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS Network).
11. JSCE (2001). Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet. Concrete Engineering Series 41, Japan Society of Civil Engineering.
12. TR55 (2000). Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. Concrete Society Technical Report 55, The Concrete Society, Crowthorne, UK.

Research on the effectiveness of enhancing the cutting resistance of CFRP plates for reinforced concrete beams

Abstract: *The method of strengthening reinforced concrete beam structures to enhance shear resistance using externally bonded CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) plates has become popular due to its advantages in mechanical properties, technical effectiveness, and construction efficiency. This paper presents the calculation principles and design procedure for enhancing the shear resistance of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded CFRP plates, aiming to ensure load-bearing capacity and serviceability according to ACI 440.2R-17. Furthermore, it investigates the impact of the width, spacing, quantity, and number of layers of CFRP plates on the strengthening effectiveness, proposing an optimal method and conducting numerical experiments to evaluate its strengthening performance.*

Keywords: Reinforced concrete beam; strengthening; composite fiber plate; shear capacity.

Nghiên cứu mô phỏng trạng thái ứng suất và chuyển vị của tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường TRC chịu tải trọng sóng nổ.

Vũ Đình Thanh[1], Nguyễn Thị Thu Nga[2], Nguyễn Xuân Bàng[2]

[1]Hệ quản lý học viên đào tạo sau đại học – Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2]Bộ môn XD Nhà & CTCN – Viện Kỹ thuật CTĐB – Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: Vdthanh1310@gmail.com; Tel: 0866.832.078

Tóm tắt

Bài báo này trình bày các kết quả mô phỏng về ứng suất và chuyển vị của tấm bê tông san hô cốt sợi thủy tinh FRP gia cường cốt lưới dệt (TRC). Các tấm được làm từ bê tông san hô cấp độ bền B22,5 (tương đương mác 350) và được gia cường bên trong bằng các thanh polymer cốt sợi thủy tinh (FRP). Lớp gia cường TRC cấu tạo bởi lưới dệt Sigratex Grid 350 đặt trong lớp bê tông hạt mịn mác 600, đóng vai trò là lớp gia cường cho kết cấu khi chịu tải trọng sóng nổ. Trong khi bê tông san hô, cốt sợi FRP và TRC đã được quan tâm nghiên cứu riêng lẻ, thì việc kết hợp sử dụng TRC để gia cường cho tấm bê tông san hô cốt FRP là một hướng nghiên cứu mới mẻ. Sự kết hợp này giúp giải quyết hiệu quả vấn đề chống ăn mòn, tối ưu việc sử dụng cốt liệu tại chỗ ở các khu vực ven biển và hải đảo, đồng thời nâng cao khả năng chịu lực của kết cấu dưới tác động của tải trọng nổ. Kết quả mô phỏng cho thấy lớp gia cường TRC làm giảm đáng kể sự tập trung ứng suất và độ chuyển vị tại trung tâm tấm, đồng thời thu hẹp phạm vi vùng hư hại do tác động của sóng nổ. Những phát hiện này mang lại giá trị khoa học và thực tiễn cho công tác thiết kế và xây dựng kết cấu ở khu vực ven biển, hải đảo phục vụ phát triển kinh tế và bảo đảm quốc phòng.

Từ khóa: *Bê tông san hô; cốt sợi polymer (FRP); bê tông cốt lưới dệt (TRC); tải trọng sóng nổ; mô phỏng số.*

1. Đặt vấn đề

Bê tông san hô (Coral Concrete) đã và đang thu hút sự quan tâm của cộng đồng nghiên cứu, đặc biệt trong lĩnh vực xây dựng công trình biển và hải đảo. Việc tận dụng cốt liệu san hô từ nguồn san hô chết không chỉ góp phần bảo vệ tài nguyên thiên nhiên mà còn giúp giảm chi phí vận chuyển vật liệu đến các khu vực xa đất liền, nơi việc cung cấp vật liệu xây dựng truyền thống gặp nhiều khó khăn. Tuy nhiên, bê tông san hô có đặc điểm cấu trúc rỗng hơn so với bê tông thông thường, dẫn đến cường độ chịu nén thấp hơn và khả năng chống ăn mòn kém hơn. Do đó, để mở rộng ứng dụng của bê tông san hô trong thực tế, cần có các giải pháp gia cường hiệu quả nhằm nâng cao tính cơ học và độ bền của loại vật liệu này [1].

Một trong những phương pháp gia cường tiềm năng là sử dụng hệ bê tông cốt lưới dệt (Textile Reinforced Concrete - TRC). Đây là một công nghệ gia cường tiên tiến, trong đó lưới sợi carbon hoặc sợi thủy tinh được kết hợp với bê tông hạt mịn cường độ cao để tạo ra một hệ vật liệu có khả năng chịu kéo vượt trội. Hệ TRC không chỉ giúp kiểm soát và hạn chế sự phát triển của vết nứt mà còn giúp tăng cường độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng khi chịu tác động động lực học như tải trọng nổ hoặc va đập mạnh. Đặc biệt, trong điều kiện tải trọng nổ trên không, bê tông truyền thống có xu hướng bị phá hủy giòn, trong khi hệ TRC có thể phân tán ứng suất, làm chậm quá trình lan truyền vết nứt và giảm thiểu mức độ hư hại tổng thể [2,3]. Ngoài ra, TRC còn giúp hạn chế sự phân mảnh của bê tông sau nổ, từ đó giảm nguy cơ sát thương do các mảnh vỡ văng ra, một yếu tố quan trọng trong thiết kế kết cấu chịu tải trọng động [2,3].

Bên cạnh đó, thanh cốt sợi FRP (Fiber Reinforced Polymer) đã được chứng minh là một vật liệu gia cường hiệu quả nhờ các đặc tính nổi bật như cường độ kéo cao, trọng lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn tốt và độ bền dài hạn vượt trội. Trong điều kiện môi trường biển, nơi cốt thép

thông thường dễ bị xâm thực và ăn mòn do ion clo, việc thay thế cốt thép bằng thanh cốt sợi FRP, đặc biệt là cốt sợi thủy tinh polymer (GFRP), được xem là một giải pháp tối ưu, giúp tăng tuổi thọ công trình và giảm chi phí bảo trì [4,5,6].

Sự kết hợp giữa bê tông san hô, cốt sợi FRP và hệ TRC có thể tạo ra một loại vật liệu xây dựng có trọng lượng nhẹ, độ bền cao và đặc biệt phù hợp với môi trường biển khắc nghiệt. Hệ FRP giúp nâng cao khả năng chịu kéo của kết cấu, trong khi TRC đóng vai trò như một lớp gia cường bổ sung, giúp kiểm soát nứt, phân tán ứng suất và giảm thiểu hư hại khi chịu tải trọng động. Những đặc tính này mở ra tiềm năng lớn trong việc ứng dụng loại vật liệu mới này vào các công trình hạ tầng ven biển, công trình phòng thủ quân sự và các kết cấu có yêu cầu khắt khe về độ bền [4].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc nâng cao khả năng chịu tải trọng nổ của kết cấu bê tông bằng cách sử dụng các vật liệu tiên tiến như bê tông siêu tính năng (Ultra-High Performance Concrete - UHPC) [7], bê tông cốt sợi (Fiber Reinforced Concrete - FRC) [8], hoặc hệ gia cường composite như FRP và TRC [2,3,9]. Những nghiên cứu này đã khẳng định rằng hệ FRP có thể thay thế hiệu quả cốt thép truyền thống, giúp giảm thiểu nguy cơ ăn mòn trong môi trường biển, trong khi TRC đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát vết nứt và phân tán ứng suất.

Các nghiên cứu trước đây cũng đã chỉ ra rằng UHPC có độ bền cơ học cao và khả năng hấp thụ năng lượng tốt, giúp giảm đáng kể hư hại khi chịu tác động xung kích. Tuy nhiên, do chi phí sản xuất cao và trọng lượng lớn, việc ứng dụng UHPC trong thực tế vẫn còn nhiều hạn chế [7]. Trong khi đó, nghiên cứu về tấm bê tông cốt thép gia cường TRC đã chứng minh rằng hệ TRC giúp cải thiện đáng kể độ bền uốn và khả năng chịu tải trọng nổ của kết cấu bê tông. Ngoài việc hạn chế sự phát triển vết nứt, TRC còn giúp giảm thiểu mức độ phân mảnh của bê tông sau nổ, từ đó làm giảm nguy cơ gây sát thương do các mảnh vỡ văng ra [9].

Tuy nhiên, hiện nay vẫn còn rất ít nghiên cứu tập trung vào ứng xử của tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường TRC khi chịu tải trọng sóng nổ. Đặc biệt, nghiên cứu mô phỏng số đối với kết cấu này vẫn còn nhiều hạn chế, do các yếu tố phức tạp liên quan đến tương tác giữa lớp bê tông san hô, thanh cốt FRP và lớp TRC. Nghiên cứu mô phỏng số trước đây về dầm bê tông cốt thép gia cường TRC [10] đã chỉ ra rằng, nếu liên kết giữa lớp TRC và bê tông nền được xử lý tốt, lớp TRC có thể giúp nâng cao đáng kể khả năng chịu lực của kết cấu, hạn chế sự hình thành vết nứt và giúp kết cấu làm việc bền vững hơn dưới tác động động lực học.

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá hiệu quả của lớp gia cường TRC đối với khả năng chịu tải trọng sóng nổ của tấm bê tông san hô cốt FRP thông qua phương pháp mô phỏng số. Cụ thể, mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS sẽ được sử dụng để phân tích ứng xử cơ học của tấm bê tông san hô trong hai trường hợp: có và không có lớp gia cường TRC. Thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng về ứng suất và chuyển vị, nghiên cứu sẽ làm rõ mức độ cải thiện của hệ TRC trong việc tăng cường khả năng chịu tải và kiểm soát hư hại do tác động của sóng nổ. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc thiết kế và ứng dụng kết cấu bê tông san hô gia cường trong các công trình phòng thủ quân sự, hạ tầng ven biển và các khu vực có nguy cơ chịu tải trọng sóng nổ.

2. Mô phỏng tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường TRC chịu tải trọng sóng nổ

2.1. Xây dựng mô hình nghiên cứu

Phản ứng động lực học và cơ chế hư hại của kết cấu bê tông cốt thép dưới tác động của tải trọng nổ có sự khác biệt rõ rệt so với khi chịu tải trọng tĩnh. Đây là một quá trình phức tạp,

chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như mức độ hư hại của kết cấu, sự lan truyền sóng, đặc tính vật liệu và các yếu tố khác.

Khi nghiên cứu tác động cơ học của sóng nổ, gần đúng có thể giả thiết lượng nổ được kích nổ tức thời. Ngoài ra, khi nổ trong không khí, vì áp suất của không khí rất bé so với áp suất của sản phẩm nổ lúc bắt đầu văng, nên có thể bỏ qua áp suất khí quyển. Ở những khoảng cách gần (nhỏ hơn khoảng 10 - 15 lần bán kính lượng nổ) cũng có thể bỏ qua cả mật độ của môi trường bao quanh. Ngược lại trên những khoảng cách lớn, mật độ không khí có một ý nghĩa lớn bởi vì càng xa tâm nổ mật độ sản phẩm nổ càng giảm [11].

Áp dụng định luật bảo toàn năng lượng, tốc độ chuyển động của các hạt sản phẩm nổ khi văng được xác định theo công thức:

$$u_0 = \sqrt{2.Q_0}, (m/s) \qquad (1.1)$$

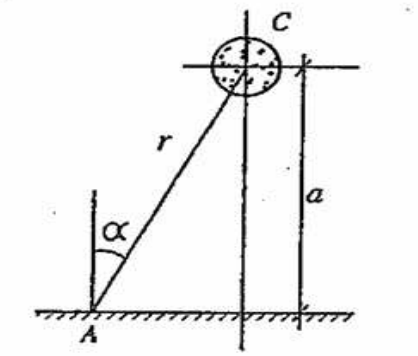
với: Q_0 - là nhiệt lượng riêng của chất nổ (J/kg);

u_0 - là tốc độ đặt theo hướng pháp tuyến với bề mặt lượng nổ (m/s).

Khi lượng khí chuyển động với tốc độ u_0 gặp chướng ngại dưới một góc nào đó sẽ tạo lên một áp suất tác dụng lên bề mặt chướng ngại. Trị số áp suất đó có thể được xác định bằng công thức rút ra từ định lý bảo toàn xung lượng:

$$p = p_{\max}.\left(1-\frac{t}{\tau}\right)^{\nu-1} \qquad (1.2)$$

Trong đó: $p_{\max}$ là áp suất lớn nhất tại điểm xét trên bề mặt chướng ngại: $p_{\max} = p_0.\left(\frac{r_0}{r}\right)^{\nu-1}.\cos^2\alpha$ (1.3)



Hình 1: Sơ đồ bố trí lượng nổ tương ứng với chướng ngại

α là góc giữa pháp tuyến bề mặt chướng ngại và bán kính nối điểm đang xét tới tâm nổ ban đầu (*Hình 1*);

r_0 là bán kính lượng nổ, với lượng nổ phẳng, bán kính bằng ½ chiều dày lượng nổ (m)

r là khoảng cách từ tâm đối xứng đầu tiên đến điểm cần xác định mật độ (m)

p_0 là áp suất của sản phẩm nổ (N/m^2)

τ là khoảng thời gian tác động của tải trọng lên điểm nghiên cứu (s)

t là thời gian tác động tính từ thời điểm hạt đầu tiên của sản phẩm nổ gặp điểm đang xét (s)

ν là chỉ số bậc của dòng 1 chiều (với lượng nổ phẳng lấy giá trị bằng 1).

Mô hình JWL (Jones-Wilkins-Lee) là một trong những mô hình phổ biến để mô phỏng hành vi nổ của các vật liệu nổ. Mô hình này được phát triển nhằm mô tả sự tương tác giữa năng lượng nổ và áp suất sinh ra trong quá trình nổ. JWL dựa trên phương trình trạng thái của vật liệu nổ, trong đó áp suất (P) được xác định theo mối quan hệ với thể tích (V) và năng lượng từ sản phẩm nổ. Phương trình trạng thái JWL thường có dạng:

$$P = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1.4)$$

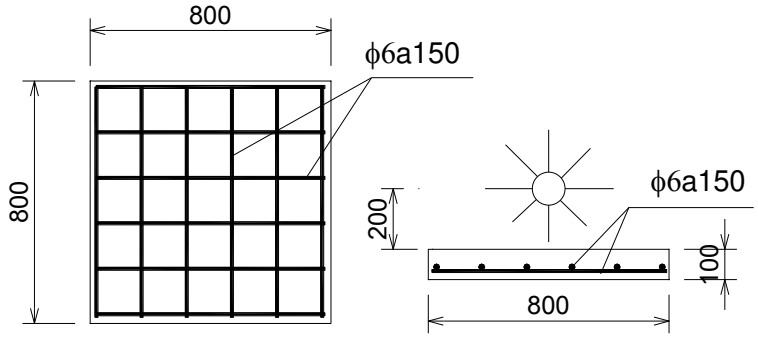
Trong đó: P là áp suất sinh ra; A,B là các tham số mô hình phụ thuộc vào loại vật liệu nổ.

V là thể tích hiện tại; ω là hệ số Grüneisen.

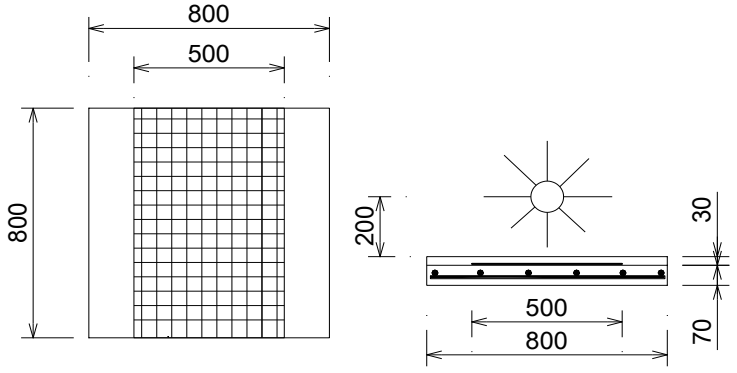
Phương trình trạng thái JWL thường được ứng dụng trong mô hình hóa vật liệu nổ, giúp mô tả mối quan hệ giữa áp suất, thể tích và năng lượng của các sản phẩm nổ. Nó có tính chất thực nghiệm và cho phép hiệu chỉnh linh hoạt từ dữ liệu thí nghiệm ở cả giai đoạn mở rộng ban đầu và giai đoạn mở rộng vùng sóng nổ. A, B và R_1, R_2, ω về nguyên tắc là các hằng số cần được xác định thông qua các phương pháp thí nghiệm và phân tích dữ liệu. Phần mềm Abaqus hỗ trợ mô hình JWL (Jones-Wilkins-Lee) một cách trực tiếp và dễ dàng bằng cách khai báo các tham số JWL trong phần định nghĩa vật liệu.

Nghiên cứu mô phỏng thí nghiệm nổ trên mô hình tấm bê tông cốt thép chịu tải trọng nổ ở khoảng cách gần. Sơ đồ thí nghiệm và hình dạng hình học của tấm bê tông cốt FRP được thể hiện trong *Hình 2*. Tấm bê tông này có kích thước dài × rộng × dày = 80×80×10cm, cốt FRP gia cường theo hai phương vuông góc, với đường kính thanh cốt là 6 mm, khoảng cách mắt lưới là 150×150 mm. Với tấm gia cường, kích thước phần bê tông cốt FRP là dài × rộng × dày= 80×80×7cm Lớp gia cường TRC có kích thước dài × rộng × dày = 80×80×3cm, trong đó, lưới dệt sợi cacbon TRC được dán chính giữa tấm, kích thước lưới 50×80cm nằm trong lớp bê tông hạt mịn (*Hình 3*).

Trong thí nghiệm, các khối thuốc nổ trinitrotoluene (TNT) có khối lượng khối lượng 50g và khoảng cách từ tâm nổ đến bề mặt tấm phía trên là 20cm. Mẫu tấm được kê trên 4 gối đỡ đặt phía dưới các cạnh của tấm, chiều rộng gối 15 cm.



Hình 2. Tấm bê tông san hô cốt FRP chịu tải trọng nổ



Hình 3. Tấm bê tông san hố cốt FRP gia cường TRC chịu tải trọng nổ

2.2. Mô hình vật liệu

2.2.1. Vật liệu bê tông

Bê tông có cường độ chịu nén tương đương cấp bền nén B22,5 (M350), ρ = 2,55 g/cm^3, f_c = 39,5 MPa, f_t = 4,1 MPa, E = 29,54 Gpa, được chế tạo với cấp phối dựa theo kết quả nghiên cứu của TS Nguyễn Xuân Bàng và cộng sự [12], thông số vật liệu xem trong Bảng 1. Để mô hình hóa vật liệu BTSH chịu tác dụng của tải trọng sóng nổ, mô hình phá hủy dẻo đối với bê tông Concrete plastic damage (CDP) được sử dụng. Các thông số của bê tông san hô theo mô hình CDP của bê tông có cấp bền nén B20 đã được Milad Hafezolghorani và cộng sự nghiên cứu [13].

2.2.2. Vật liệu gia cường TRC

Lớp gia cường TRC được cấu tạo từ bê tông hạt mịn Sika Grout 214-11, lưới sợi dệt carbon Sigratex Grid 350. Các tính chất cơ học chi tiết của các loại vật liệu được trình bày trong *Bảng 1*, [9, 15]. Sợi carbon được khai báo theo mô hình phá hủy vật liệu giòn HJC của Holmquist Johnson and Cook với đặc điểm chịu kéo, không chịu nén và tuyến tính.

Bảng 1. Các thông số vật liệu cho hai loại bê tông và sợi dệt

Vật liệu	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E (MPa)	ν	γ (kg/m^3)
Bê tông san hô B22,5 (M350)	39,5	4,1	29540	0,20	2320
Bê tông cốt liệu mịn Sikagrout 214-11	74,6	15,2	32600	0,18	2400
Lưới dệt Sigratex Grid 350	-	623	31940	0,22	1740

2.2.3. Vật liệu cốt chịu lực FRP

Cốt FRP làm từ thủy tinh, cán dạng thanh phi 6 có gờ. Mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính được sử dụng cho thanh FRP theo thực tế làm việc của loại vật liệu này. Để mô phỏng sự làm việc của cốt FRP, mô hình phá hủy bóc tách của FRP dựa trên mô hình của Lorenzis và Tegola, được tính toán từ tỷ số tải trọng phá hủy bóc tách giữa động và tĩnh được sử dụng. Các thông số được thể hiện trong *Bảng 2*, [14].

Bảng 2. Tính chất cơ học của thanh sợi GFRP

Ký hiệu	**Thông số**	**GFRP**
p	Khối lượng riêng	1,80 g/cm³
E_a	Mô đun đàn hồi theo phương dọc	30,9 GPa
X_C	Cường độ chịu nén dọc	480 MPa
X_T	Cường độ chịu kéo dọc	983 MPa
Y_C	Cường độ chịu nén ngang	140 MPa
Y_T	Cường độ chịu kéo ngang	40 MPa
S_C	Cường độ chịu cắt	70 MPa
ν_s	Hệ số Poisson	0,2

2.3. Mô phỏng số

Thông qua mô phỏng số, ứng xử của tấm bê tông san hô gia cường chịu tải trọng sóng nổ được nghiên cứu. Một số giả thuyết được chấp nhận sau:

- Liên kết giữa lớp bê tông hạt mịn dán TRC với bê tông san hô cốt FRP là hoàn toàn, không có sự trượt tách giữa 2 lớp. Cấu kiện làm việc đàn hồi tuyến tính cho đến khi bị phá hủy

- Cốt sợi thủy tinh FRP coi như vật liệu đàn hồi lý tưởng và liên kết hoàn toàn với bê tông san hô

- Bê tông san hô cốt FRP làm việc theo mô hình đàn hồi

- Mô hình 3D được thực hiện bằng phần mềm ABAQUS, sử dụng phương pháp mô phỏng CEL để khai báo tải trọng nổ.

Theo đó, mô hình liên kết các vật liệu như sau:

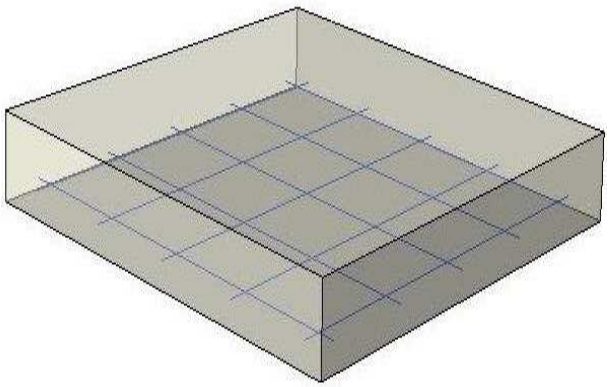
- Bê tông san hô & cốt FRP: Do cốt FRP được đổ cùng với bê tông san hô như cách thi công bê tông cốt thép truyền thống, sử dụng dạng liên kết Embedded Region Constraint với khai báo Master là Bê tông san hô, Slave là Cốt FRP. Điều này sẽ đảm bảo cốt FRP hoạt động như cốt thép trong bê tông truyền thống mà không có trượt giữa hai loại vật liệu. Tấm bê tông và cốt FRP áp dụng phương pháp tính Lagrangian.

- Tiếp xúc giữa bê tông san hô & bê tông hạt mịn: Khi lớp bê tông cường độ cao Sika Grout 214-11 được đổ lên trên lớp bê tông san hô đã se mặt, coi liên kết giữa 2 lớp là liên kết hoàn toàn (không có sự tách rời), sử dụng dạng liên kết Tie Constraint.

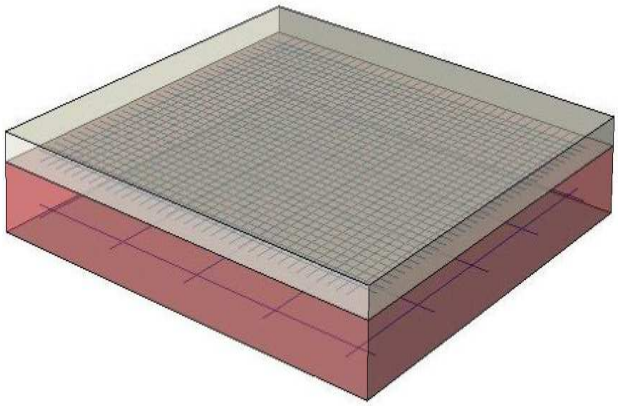
- Bê tông Sika Grout 214-11 & lưới dệt: Lưới dệt carbon được đặt giữa lớp bê tông 214-11, mô hình hóa sử dụng liên kết dạng Embedded Region Constraint (nhúng sợi dệt vào bê tông và không có trượt).

-Tải trọng nổ: Do nổ ở cự ly gần nên mô hình Conwep Blast Load không phù hợp để phân tích do đó phương pháp Couple Eulerian-Lagrangian được sử dụng để mô phỏng tác động của sản phẩm nổ lên kết cấu tấm. Đây là phương pháp được nhiều tác giả sử dụng để mô phỏng tác động của nổ [16]. Điều kiện biên của không khí được thiết lập là biên không phản xạ. Hạn chế các biến dạng, chuyển vị của các nút ở khu vực gối tựa. Biên không phản xạ được sử dụng trên các mặt của không khí.

Một mô hình 3D mô phỏng tấm bê tông san hô gia cường và không gia cường (Hình 4,5). Mô hình mô phỏng chứa 8000 phần tử bê tông san hô, cốt FRP được chia thành 390 phần tử, TRC là 2660 phân tử. Kích thước mỗi phần tử là 2x2x2 cm, đủ nhỏ để có được kết quả đáng tin cậy. Mô phỏng thuốc nổ cần 8000 phần tử, kích thước mỗi phần tử là 1,5x1,5x1,5mm.



Hình 4. Mô hình tấm bê tông san hô cốt FRP bằng phần mềm Abaqus

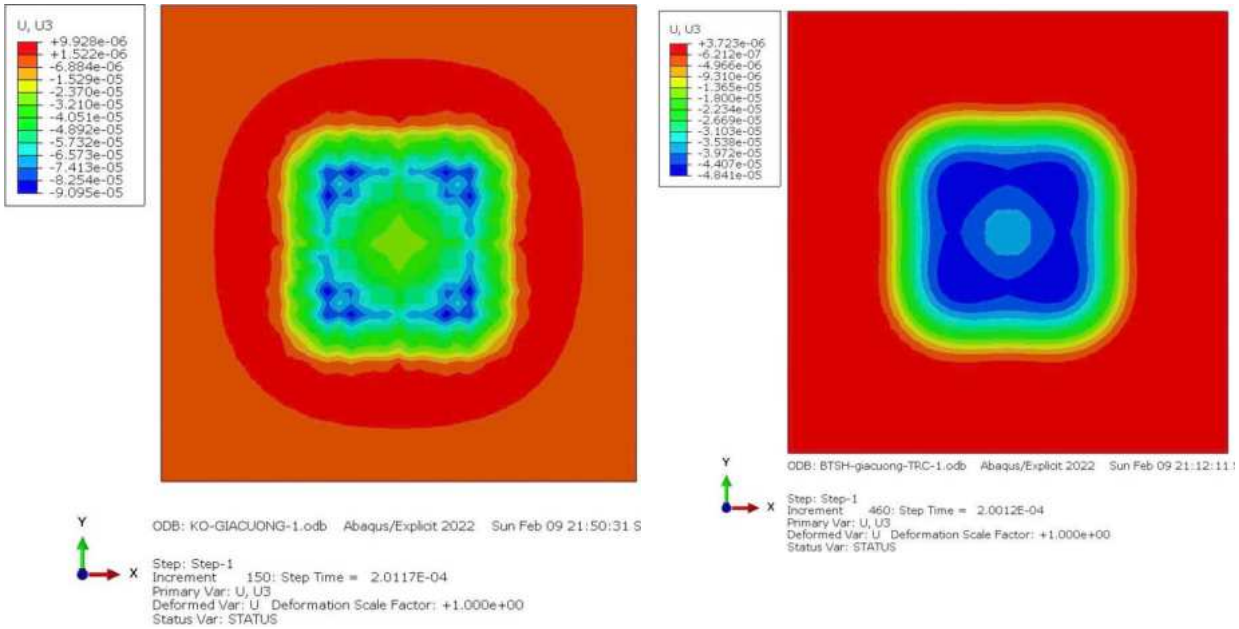


Hình 5. Mô hình tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường TRC bằng phần mềm Abaqus

2.4. Kết quả mô phỏng

Chuyển vị: Chuyển vị theo bước thời gian của tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường và không gia cường TRC chịu tác động của tải trọng sóng nổ được thể hiện trên hình 6a) và 6b). Biểu đồ so sánh chuyển vị của 2 tấm được thể hiện ở Hình 7.

Từ biểu đồ, ta nhận thấy chuyển vị lớn nhất của tấm BTSH có gia cường là 1,7mm trong khi đó chuyển vị của tấm không gia cường là 3,84mm. Điều này cho thấy rõ ràng khi gia cường TRC và UHPC, chuyển vị của tấm giảm đi hơn 50% so với không gia cường. Bên cạnh đó, quan sát biểu đồ chuyển vị theo thời gian của tấm không gia cường; ta thấy chuyển vị tăng lên nhưng không có sự phục hồi, điều này chứng tỏ tại tấm không gia cường xuất hiện các biến dạng dẻo lớn. Ngược lại, trên biểu đồ tấm có gia cường có sự phục hồi đáng kể so với chuyển vị lớn nhất (sau khi phục hồi chuyển vị là khoảng 1mm), điều này chứng tỏ sau khi gia cường đã giảm được đáng kể các biến dạng dẻo.



a) Tấm BTSH không gia cường; b) Tấm BTSH có gia cường TRC

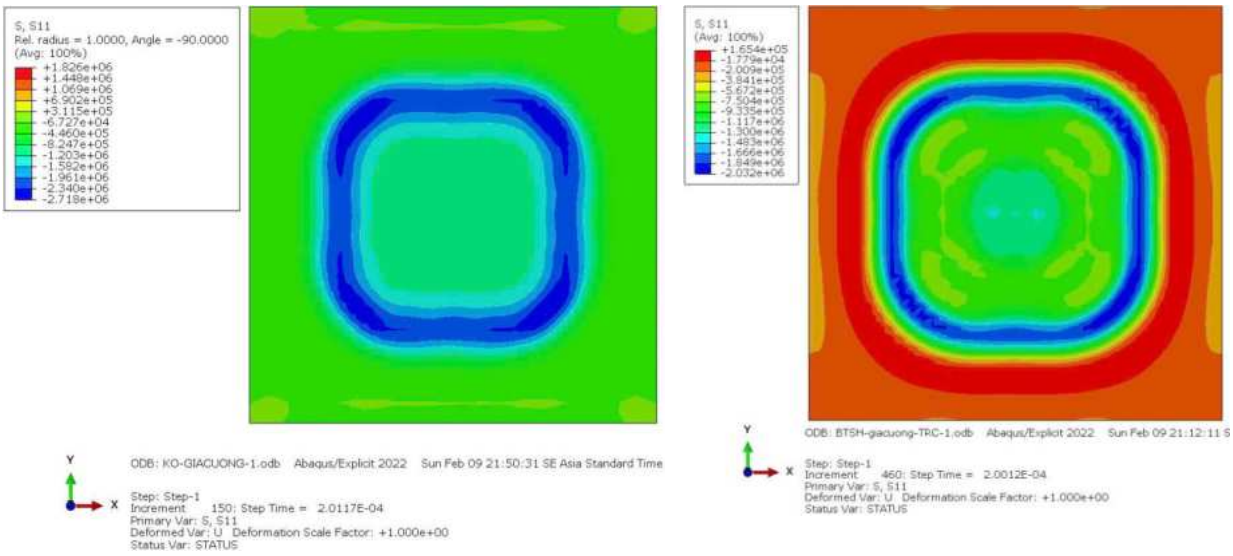
Hình 6. Chuyển vị tại tâm của tấm



Hình 7. So sánh chuyển vị tại tâm của 2 tấm Bê tông san hô cốt FRP gia cường và không gia cường TRC

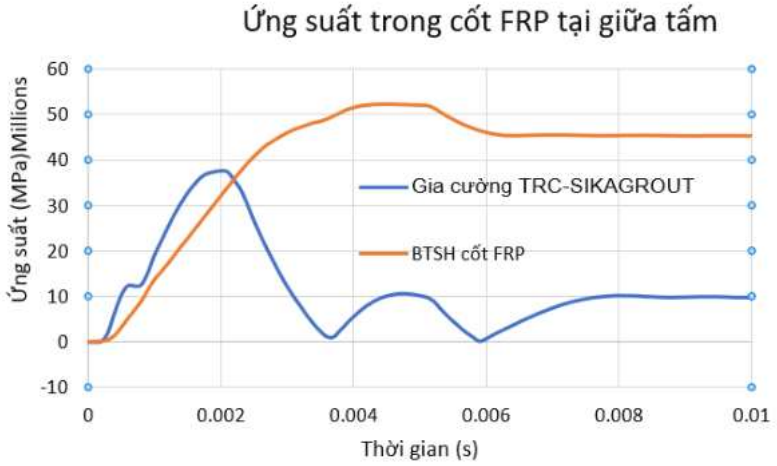
Ứng suất: Ứng suất tại điểm giữa của tấm BTSH cốt FRP gia cường và không gia cường TRC chịu tác động của tải trọng sóng nổ được thể hiện trên *hình 8a) và 8b)*. Biểu đồ so sánh ứng suất của 2 tấm được thể hiện ở *Hình 9*.

Từ biểu đồ, ta nhận thấy ứng suất lớn tại tâm của cốt FRP với tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường TRC xấp xỉ 38 GPa, trong khi tại tấm không gia cường là xấp xỉ 52 Gpa (ứng suất giảm khoảng 30%). Đồng thời biểu đồ ứng suất của tấm BTSH có gia cường có sự ổn định rõ ràng trong giai đoạn phục hồi hơn tấm không gia cường. Như vậy khi gia cường làm cho độ cứng của tấm khi chịu tác dụng của tải trọng nổ tăng lên đáng kể, từ đó hạn chế tác động của tải trọng sóng nổ lên kết cấu; gia tăng khả năng chịu tải và độ bền của công trình.



a) Tấm BTSH không gia cường; b) Tấm BTSH có gia cường TRC

Hình 8. Ứng suất của tấm dưới tác dụng sóng nổ



Hình 9. So sánh ứng suất trong cốt FRP tại điểm giữa 2 tấm Bê tông san hô cốt FRP gia cường và không gia cường TRC

3. Kết luận

Nghiên cứu đã đưa ra kết quả mô phỏng số trên tấm bê tông san hô cốt FRP gia cường và không gia cường TRC chịu tác dụng sóng nổ. Biểu đồ kết quả ứng suất và chuyển vị của hai

trường hợp cho thấy quá trình phát triển của chúng có sự tương đồng với hai giai đoạn đàn hồi tuyến tính và đàn dẻo tuyến tính. Tuy nhiên, giá trị chuyển vị của tấm BTSH cốt FRP gia cường TRC nhỏ hơn nhiều so với tấm không được gia cường. Đồng thời biểu đồ ứng suất của tấm BTSH gia cường và không gia cường cũng thể hiện sự tương đồng trong quá trình gia tăng tải trọng của sóng nổ, giá trị ứng suất của tấm gia cường giảm rõ rệt. Điều này khẳng định hiệu quả của việc sử dụng lớp TRC trong công tác gia cường cho kết cấu tấm BTSH cốt FRP.

Nghiên cứu hiện tại tập trung vào việc khảo sát một bài toán cụ thể với lượng nổ và khoảng cách cố định. Để tiếp theo, chúng tôi sẽ tiến hành so sánh kết quả mô phỏng với các kết quả thực nghiệm thu được tại hiện trường, đồng thời khảo sát các tham số như vật liệu, lượng nổ, và khoảng cách lượng nổ đến bề mặt kết cấu. Ngoài ra, trạng thái ứng suất, biến dạng và sự phát triển nứt trong tấm bê tông cũng sẽ được chú trọng trong các nghiên cứu tiếp theo. Những kết quả từ nghiên cứu này sẽ cung cấp cơ sở quan trọng cho việc cải thiện thiết kế và nâng cao hiệu suất của tấm bê tông cốt thép trong các ứng dụng thực tế.

4. Tài liệu tham khảo

[1] Kishore, K., Pandey, A., & Abed, A. S. (2023, May). Coral Concrete: Overview, Composition and its Behavior in Environment. In Materials Science Forum (Vol. 1085, pp. 55-65). Trans Tech Publications Ltd.

[2] Kim, Hyeong-Yeol et al. (2021). "Concrete slab-type elements strengthened with cast-in-place carbon textile reinforced concrete system." Materials 14.6 (2021): 1437.

[3] Kim, Hyeong-Yeol, Young-Jun You, and Gum-Sung Ryu (2021). "Reinforced concrete slabs strengthened with carbon textile grid and cementitious grout". Materials 14.17 (2021): 5046.

[4] Ceroni, F.; Bonati, A.; Galimberti, V.; Occhiuzzi, A (2018). Effects of environmental conditioning on the bond behavior of FRP and FRCM systems applied to concrete elements. J. Engin. Mech. 2018, 144, 04017144.

[5] Al-Zahrani, Mesfer M., et al (2023). "Punching shear capacity of GFRP bar-reinforced concrete slabs-on-ground". Engineering Structures 289 (2023): 116285.

[6] Madan, Chinnasamy Samy, et al (2022). "Comparison of the flexural behavior of high-volume fly AshBased concrete slab reinforced with GFRP bars and steel bars". Journal of Composites Science 6.6 (2022): 157.

[7] Lee, J-Y., et al. "Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete." Composites Part B: Engineering 39.2 (2008): 258-270.

[8] Davalos, Julio F., Yi Chen, and Indrajit Ray. "Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete." Cement and Concrete Composites 30.8 (2008): 722-730.

[9] Thi Thu Nga Nguyen, Ngoc Quang Vu, Viet Chinh Mai, Trung Kien Nguyen (2024). Experimental study on the flexural behavior of TRC – strengthened reinforced concrete beams. Institute of Construction Technology, Le Quy Don Technical University

[10] T. N. Hưng, N. T. T. Nga và V. T. Hùng (2023), "Nâng cao hiệu quả của bê tông cốt lưới dệt (TRC) đối với dầm bê tông cốt thép được gia cường: Nghiên cứu về sự phát triển vết nứt và liên kết vật liệu", Hội nghị khoa học quốc tế Kỷ niệm 60 năm thành lập Viện KHCN Xây dựng, tr. 135-142.

[11] Hồ Sĩ Giao và cộng sự (2010), " Nổ hóa học lý thuyết & thực tiễn", Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

[12] Nguyễn Xuân Bàng (2024), "Nghiên cứu thiết kế, chế tạo, thử nghiệm và ứng dụng bê tông cốt liệu cát, đá san hô và nước mặn cho một số kết cấu công trình tại quần đảo Trường Sa".
[13] Milad Hafezolghorani Esfahan, Milad Hafezolghorani Esfahan, Ramin Vaghei (2017), "Simplified Damage Plasticity Model for Concrete", Structural Engineering International.
[14] Xiangqing Kong, Xuejian Qi, Yihan Gu, Isah Abba Lawan, Yandong Qu (2018), "Numerical evaluation of blast resistance of RC slab strengthened with AFRP", Construction and Building Materials.
[15] Nguyen, T. T. N., Vu, N. Q., Vu, D. T., & Nguyen, T. K. (7, 2024), "Experimental study on the application of TRC to enhance the load-bearing capacity of reinforced concrete slabs". Journal of Science and Technique-Section on Special Construction Engineering,.
[16] Keshavarz Mirza Mohammadi, P., Khalilpour, S. H., & Sareh, P. (2023). Simulating the response of buried structures to external blast loads: methods, challenges, and advances. Engineering Reports, 5(6), e12607.

Numerical study on stress state and displacement of FRP-reinforced coral concrete slabs strengthened with TRC under explosive wave loading

Abstract: *This paper presents numerical simulation results on the stress state and displacement behavior of FRP-reinforced coral concrete slabs strengthened with textile-reinforced concrete (TRC). The slabs are made of B22.5-grade coral concrete (equivalent to M350) and are internally reinforced with glass fiber-reinforced polymer (FRP) bars. The TRC strengthening layer consists of Sigratex Grid 350 textile mesh embedded in fine-grained concrete with a compressive strength of M600, serving as an external reinforcement under explosive wave loading. While coral concrete, FRP reinforcement, and TRC have individually garnered research interest, the combined application of TRC-strengthening for FRP-reinforced coral concrete slabs represents a novel research direction. The combination effectively addresses corrosion resistance, optimizes the use of local aggregates in coastal and island regions, and enhances structural performance under explosive loading. The simulation results demonstrate that TRC strengthening significantly reduces stress concentration and central displacement of the slabs, while also mitigating the extent of damage zones caused by blast-induced loading. The findings offer both scientific and practical value for the design and construction of coastal and island infrastructure aimed at economic development and national defense.*

Keywords: Coral concrete; FRP reinforcement; textile-reinforced concrete (TRC); explosive wave loading; numerical simulation.

Tính toán áp lực sóng nổ tác dụng lên công trình trên mặt đất theo giáo trình công sự và tiêu chuẩn UFC – 340 -2

Duc Hieu Vu[1], Trung Kien Le[1], Huu Quoc Nguyen[1]

[1]*Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam*

Email: duchieu.vu@ldqtu.edu.vn

Tóm tắt

Nghiên cứu tính toán tải trọng nổ là bài toán phổ biến và được nghiên cứu nhiều trên thế giới. Kết quả tính toán tải trọng nổ là cơ sở cho các bài toán thiết kế và kiểm tra khả năng kháng nổ của công trình khi chịu tác dụng của các loại vật liệu nổ. Để tính toán tải trọng nổ, các kết quả từ thực nghiệm nổ được tiến hành và được chuẩn hóa dữ liệu tính toán theo 2 hướng: Xây dựng các công thức giải thích thực nghiệm theo phương pháp hồi quy dựa trên kết quả khảo sát (Công thức sadopxki, Mill...); Xây dựng cơ sở dữ liệu lớn làm cơ sở cho nội suy trực tiếp (UFC 3-340-2). Bài báo này tập trung vào xây dựng chương trình tự động tính toán, phân tích và so sánh phương pháp tính toán tải trọng nổ tác dụng lên công trình trên mặt đất theo phương pháp giáo trình công sự và phương pháp theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2.

Từ khóa: *Tải trọng nổ, sóng xung kích, sóng tới, sóng phản xạ, UFC 3-340-2*

1. Lời giới thiệu

Tính toán kết cấu công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ là một nhiệm vụ trọng tâm của ngành công trình quốc phòng. Đặc điểm của tải trọng nổ là loại tải trọng động, đặc biệt, tác dụng trong thời gian ngắn với cường độ lớn. Để tính toán các loại tải trọng trên, có hai trường phái phổ biến trên thế giới. Phương pháp thực nghiệm và phương pháp mô phỏng số. Phương phức thực nghiệm là sử dụng kết quả đo đạc trực tiếp trên thực nghiệm tại hiện trường. Dữ liệu có thể được số hóa và xây dựng thành quy trình nội suy tra cứu hoặc được đơn giản hóa, sử dụng phương pháp hồi quy để xây dựng được các công thức giải thích thực nghiệm. Bài báo này tập trung nghiên cứu, tính toán kết cấu tải trọng sóng nổ lan truyền trên mặt đất theo phương pháp của Shadopski (Nga) và phương pháp tra cứu dữ liệu (UFC 3-340-2)[1]–[3].

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Tính toán áp lực lên công trình nổ trên mặt đất theo phương pháp công sự

Trong trường hợp nổ gần, tải trọng sóng tới do vụ nổ sau khi lan truyền trong không khí sẽ tương tác với công trình. Tùy theo khoảng cách giữa công trình và vụ nổ, áp lực tính toán lên kết cấu sẽ được tính toán.

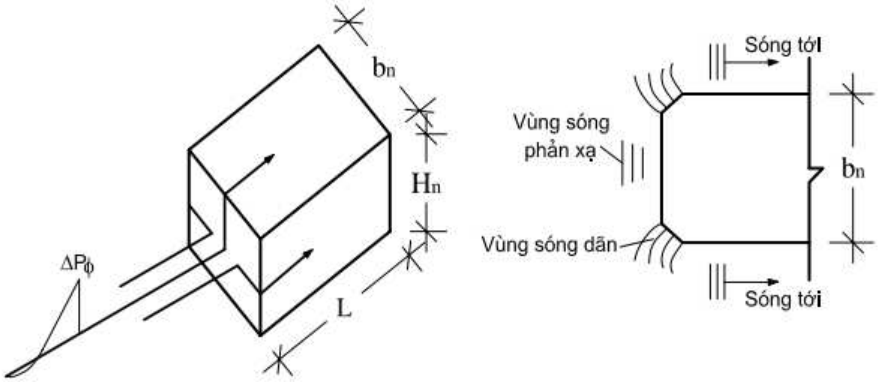
Với công trình đặt trên mặt đất, áp lực tác dụng bao gồm áp lực tải trọng động tác dụng lên tường trước, áp lực lên tường bên và áp lực lên tường sau. Tải trọng lần lượt ký hiệu là ΔP_1, ΔP_2, ΔP_3.

Trong điều kiện nổ gần [4], chỉ có công thức tính toán với áp lực sóng hạt nhân và coi tất cả các tải trọng tại các điểm trên mặt, tường, nóc bằng nhau và coi như chịu tác dụng của siêu áp sóng phản xạ phẳng.

Với trường hợp nổ xa [4], các công thức tính toán áp lực lên tường trước, tường bên và tường sau với công trình nổi trên mặt đất được với giải thiết mục tiêu trong khu xa và áp lực

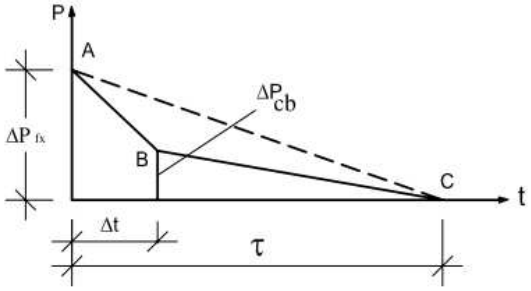
sóng tới vuông góc với mặt phản xạ. Áp lực tính toán là giá trị trung bình, đại diện cho toàn bộ mặt tương tác.

a. Xác định áp lực lên tường trước



Hình 1. Sơ đồ truyền lan của sóng lên mục tiêu nổi.

Do sự chênh lệch áp suất giữa tường trước, tường bên và nóc, các hạt không khí sẽ chuyển động về phía nóc và tường bên, làm xuất hiện sóng dãn, Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường trước theo hình dưới đây



Hình 2. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường trước

Giá trị cực đại áp lực sóng phản xạ tính toán theo công thức:

$$\Delta P_{fx} = 2\Delta P_{\Phi} + \frac{6\Delta P_{\Phi}^2}{\Delta P_{\Phi} + 7,2} \quad (1)$$

Biểu đồ gồm 2 đoạn đường thẳng:

- Đoạn AB biểu diễn biến thiên của áp lực khi hình thành qui luật chảy bao;
- Đường BC biểu diễn biến thiên của áp lực sau khi hình thành qui luật chảy bao.

Thời gian cần thiết để sóng chảy bao theo chiều rộng b_n và chiều cao H_n của chướng ngại xác định theo công thức:

$$\Delta t = \min\left(\frac{b_n}{2C}, \frac{H_n}{C}\right) \quad (2)$$

Trong đó C là tốc độ âm trong vùng khí nén m/s;

$$C = C_0 \sqrt{\frac{\left(\overline{\Delta P_\phi} + 1\right)\left(\overline{\Delta P_\phi} + 7\right)}{6\overline{\Delta P_\phi} + 7}} \tag{3}$$

C_0 là tốc độ âm trong không khí, $C_0 = 340$, m/s;

bn là chiều rộng của chướng ngại, m;

Hn là chiều cao của chướng ngại, m.

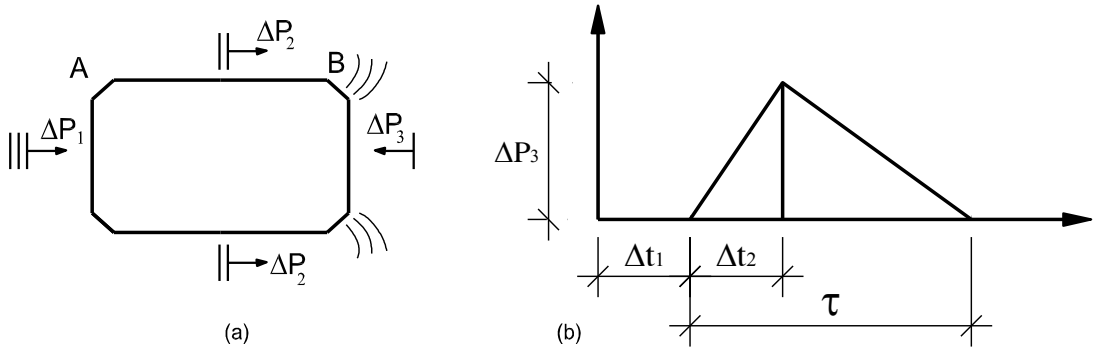
Hiện tượng chảy bao chỉ xuất hiện khi $\Delta t < \tau$. Trị số siêu áp bao xác định theo công thức:

$$\Delta P_{cb} = \Delta P_t + \left(1 + \varepsilon\right)\frac{2,5\Delta P_t^2}{\Delta P_t + 7},\ kG/cm^2 \tag{4}$$

b. Áp lực tác dụng lên tường bên và nóc

Đối với tường bên và nóc, sóng chỉ lướt qua, không xảy ra hiện tượng phản xạ, do đó áp lực tác dụng lên tường bên và nóc bằng áp lực sóng tới.

$$\Delta P_2 = \Delta P_{bm} \tag{5}$$



Hình 3. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường sau

Khi sóng xung kích di chuyển đến mép biên tường bên và tường sau (hoặc mép biên nóc và tường sau) sẽ xảy ra hiện tượng chảy vòng vào giữa tường sau và gây ra áp lực tác dụng lên tường sau. Áp lực này tăng từ 0 đến giá trị cực đại sau đó lại giảm xuống 0

Thời gian cần thiết để sóng xung kích di chuyển từ điểm A đến điểm B là:

$$\Delta t_1 = \frac{L}{D_\Phi}, \tag{6}$$

Thời gian áp lực tăng từ 0 đến max là:

$$\Delta t_2 = \frac{b}{2C} \tag{7}$$

Trị số áp lực lớn nhất tác dụng lên tường sau theo kết quả thực nghiệm bằng 2/3 áp lực sóng tới.

$$\Delta P_3 = \frac{2}{3}\Delta P_{\Phi(bm)} \quad (8)$$

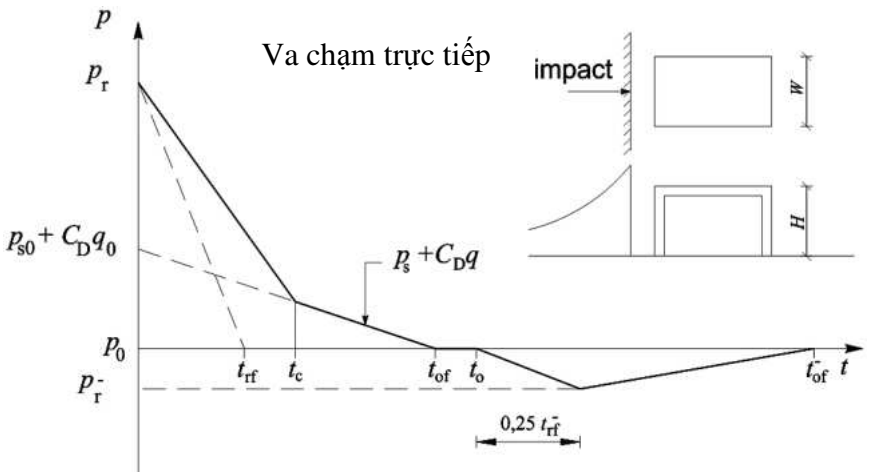
Nhận xét

Phương pháp tính toán theo công thức giải tích thực nghiệm trên có ưu điểm là đơn giản, dễ sử dụng. Tuy nhiên, các công thức chưa làm rõ giới hạn và phạm vi áp dụng, chưa tính toán được xung nổ cũng như đơn giản hóa với giải thiết áp lực phân bố đều trên các mặt nhận sóng. Mặt khác, chưa rõ cơ sở thực nghiệm khi lấy áp lực cự đại tác dụng lên tường sau là 2/3 giá trị áp lực sóng tới.

2.2. Tính toán áp lực lên công trình nổ trên mặt đất theo phương pháp UFC 3-340-2

2.2.1. Tải trọng tác động lên tường trước

Áp lực tác dụng lên tường trước có quy luật biến đổi về bản chất là giống với quy luật mà giáo trình công sự đã đề cập. Tuy nhiên, phương pháp UFC 3-340-2 cung cấp trực tiếp các giá trị thực nghiệm, cung cấp đủ cả các tham số của vận tốc truyền sóng, xung lượng cũng như các tham số của pha giãn. Áp suất cực đại tác dụng lên mặt trước của công trình vào thời điểm sóng nổ đến (t_A) sẽ là áp suất cực đại do phản xạ (P_r), là một hàm của áp suất sóng tới ban đầu. Áp suất này sau đó giảm trong khoảng thời gian [t_A, $t_A + t_c$] do sóng truyền qua phía trên và xung quanh công trình, với giá trị nhỏ hơn P_r (áp suất vượt quá đỉnh trên và xung quanh công trình sẽ là P_s). Áp suất vượt quá trên bề mặt phía trước của công trình tiếp tục giảm cho đến khi áp suất cân bằng với áp suất của không khí xung quanh.

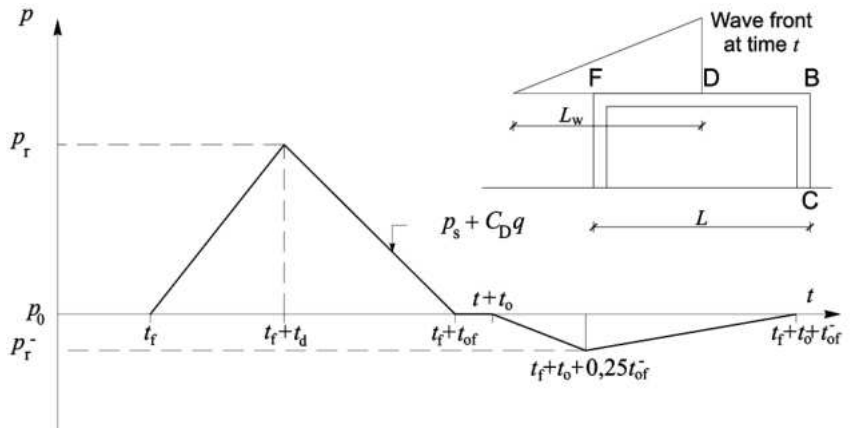


Hình 4. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường trước theo UFC 3-340-2

2.2.2. Tải trọng tác dụng lên nóc và tường bên

Giá trị áp lực trung bình tác dụng mái và các tường bên khi sóng tới bao trùm lên kết cấu công trình. Giá trị áp lực sẽ tác dụng tăng dần đến giá trị cực đại của áp lực sóng tới ban đầu, sau đó giảm xuống tới áp lực âm sóng giãn. Tải trọng của áp lực lên mái được tính theo mô hình dưới đây.

Sóng tới tại thời điểm t



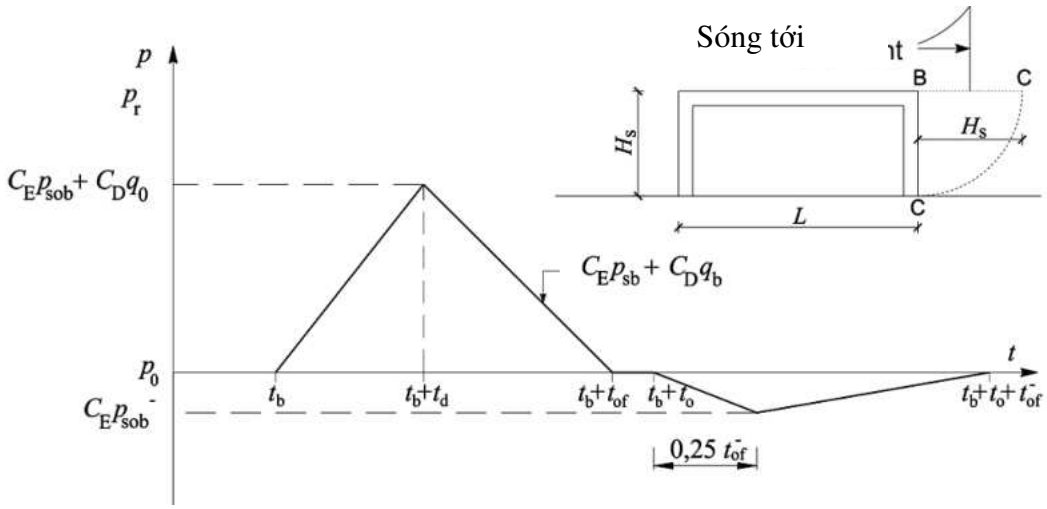
Hình 5. Biểu đồ áp lực tác dụng lên nóc và tường bên theo UFC 3-340-2

Trong đó t_f là thời gian sóng bắt đầu tác dụng vào phần mái. Áp lực sóng tăng dần cho đến giá trị cực đại P_r và giảm dần đến thời sau thời gian duy trì pha dương t_{of}. Áp suất đạt giá trị cực đại tại điểm D và giảm dần về 0 khi sóng lan truyền đến điểm D.

Áp lực cực đại P_r là tổng của áp lực trung bình và phần áp lực quy đổi bổ sung:

$$p_R = C_E.p_{sof} + C_D.q_0 \quad (9)$$

2.2.3. Tải trọng tác dụng lên tường sau



Hình 6. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường sau theo UFC 3-340-2

2.2.4. Các bước tính toán tải trọng tác dụng lên công trình

Ưu điểm của UFC 3 340 2 là cho phép tính toán chính xác tải trọng tác dụng lên các điểm bề mặt của công trình, không cần phân biệt khoảng cách nổ, ảnh hưởng của góc nổ, không cần giải thiết về áp lực trung bình như giáo trình công sự.

Để tính toán được tải trọng nổ tác dụng lên công sự, người sử dụng cần tính toán theo các bước như sau

Bước 1: Xác định trọng lượng của thuốc nổ, W (Kg), khoảng cách giữa khối thuốc nổ và công trình, R_G, chiều cao đặt lượng nổ thuốc nổ, Hc (đối với các vụ nổ trong không khí) và

kích thước của công trình.

Bước 2: Áp dụng hệ số an toàn 20 %.

Bước 3: Chọn một số điểm trên kết cấu (mặt trước, mái, tường bên và tường sau), xác định các tham số nổ cho mỗi điểm đã chọn. Đối với vụ nổ gần mặt đất:

a) Xác định khoảng cách nổ tương đương:

$$Z_G = \frac{R_G}{W^{\frac{1}{3}}} \tag{10}$$

b) Xác định các tham số ban đầu của vụ nổ bằng cách sử dụng Hình 21 tiêu chuẩn UFC 3-340-2 cho khoảng cách quy đổi đã tính toán Z_G và nội suy bảng tra dữ liệu từ phần lớp dplot sẽ xác định được các giá trị:

+ Giá trí áp lực sóng tới cực đại p_{s0};

+ Tốc độ mặt sóng U;

+ Xung lực ban đầu của pha nén đã được tỷ lệ hóa $i_s/W^{1/3}$;

+ Thời gian pha dương đã được tỷ lệ hóa $t_0/W^{1/3}$;

+ Thời gian sóng tới đến mục tiêu đã được tỷ lệ hóa $t_A/W^{1/3}$.

Các giá trị tỉ lệ hóa sau khi nhân với giá trị của $W^{1/3}$ ta có được giá trị thực tế các giá trị trên.

Bước 4: Xác định áp lực sóng phản xạ cực đại và xung phản xạ tại tường trước

a) Tính áp lực sóng phản xạ cực đại $p_{r\alpha}=C_{r\alpha} * p_{s0}$. Hệ số phản xạ $C_{r\alpha}$ cho giá trị sóng tới p_{s0} theo đồ thị Hình 2 ÷ 193 [6].

b) Tính giá trị xung phản xạ đã được tỷ lệ hóa $ir_\alpha/W^{1/3}$ từ Hình 2 ÷194 [3] cho p_{s0} và α. Nhân giá trị đã được điều chỉnh với giá trị của $W^{1/3}$ để có được giá trị tuyệt đối.

Bước 5: Xác định tải trọng tác dụng lên mặt trước

a) Xác định vận tốc âm thanh trong miền phản xạ cực đại C_r bằng cách sử dụng Hình 2 ÷ 192 [3] cho áp suất cực đại p_{s0}.

b) Tính toán thời gian t_c

$$t_c = \frac{4S}{(1+R)C_r}\ (ms) \tag{11}$$

Trong đó

S là giá trị nhỏ nhất của nửa chiều rộng và chiều cao tường trước;

G là giá trị lớn nhất của nửa chiều rộng và chiều cao tường trước R = S/G.

c) Tính toán thời gian của pha dương (pha nén) t_{of}

$$t_{of} = \frac{2i_s}{P_{so}}\ (ms) \tag{12}$$

d) Xác định áp suất động học cực đại q_0 từ Hình 2 ÷ 3 ứng với giá trị P_{so}.

e) Tính toán giá trị $P_{so} + C_D q_o$. Giá trị C_D nhận được từ mục 2.15 tiêu chuẩn UFC 3-

340-2

f) Tính thời gian t_{rf} của áp lực phản xạ thoe công thức

$$t_{rf} = \frac{2i_{r\alpha}}{P_{r\alpha}} \ (ms) \tag{13}$$

g) Xây dựng đồ thị đường cong áp lực -thời gian cho pha dương.

Bước 6: xác định các tham số của pha âm của tải trọng nổ vào tường trước

a) Đọc giá trị Z từ hình 2-15 ứng với giá trị ORead the value of Z from Fig. 5 for $P_{r\alpha}$ và $i_{r\alpha}/ W^{1/3}$

b) Xác định các giá trị $P_{r\alpha}^-$ và $i_{r\alpha}^-/W^{1/3}$ từ đồ thị Hình 2-15 tương ứng với giá trị Z theo bước tính toán 6a). Nhân giá trị nhận được với $W^{1/3}$ để thu được giá trị tuyệt đối.

c) Tính toán thời gian duy trì pha âm $t_{rf}^- = 2i_{r\alpha}^-/P_{r\alpha}$

d) Tính thời gian $0.25\ t_{rf}^-$

e) Vẽ biểu đồ thể hiện áp lực pha âm của sóng tới tác động lên tường trước

Bước 7: Xác định các tham số của tải trọng siêu áp pha dương tác dụng lên tường bên:

a) Xác định tỉ lệ chiều dài bước sóng với nhịp của mặt trước L_{wf}/ L

b) Tra cứu xác định các giá trị hệ số C_E, $t_d/W^{1/3}$, $t_{of}/W_{1/3}$ lần lượt theo đồ thị của hình 2 ÷ 196, 2 ÷ 197 và 2 ÷ 198 [3].

c) Xác định các giá trị P_R, t_r, t_o.

d) Xác định giá trị áp lực động q_o theo hình 2-3 cho tính toán P_R

e) Tính toán giá trị $P_R = C_E P_{sof} + C_D \cdot q_o$. Hệ số C_D nhận được từ mục 2-15

f) Thể hiện đồ thị áp lực thoe thời gian của tải trọng tác dụng lên tường bên

Bước 8: Xác định tải trọng pha âm (pha giãn)

a) Xác định giá trị C_E^- và giá trị $t_{of}^-/W^{1/3}$ cho giá trị L_{wf}/L theo bước tính toán 7a)

từ hình 2 ÷ 196 và 2 ÷ 198 [3].

b) Tính toán giá trị $P_r = C_E \cdot P_{sof}$ và thời gian t_{of}.

c) Tính toán thời gian pha giãn đạt cực đại $0.25t_{of}$

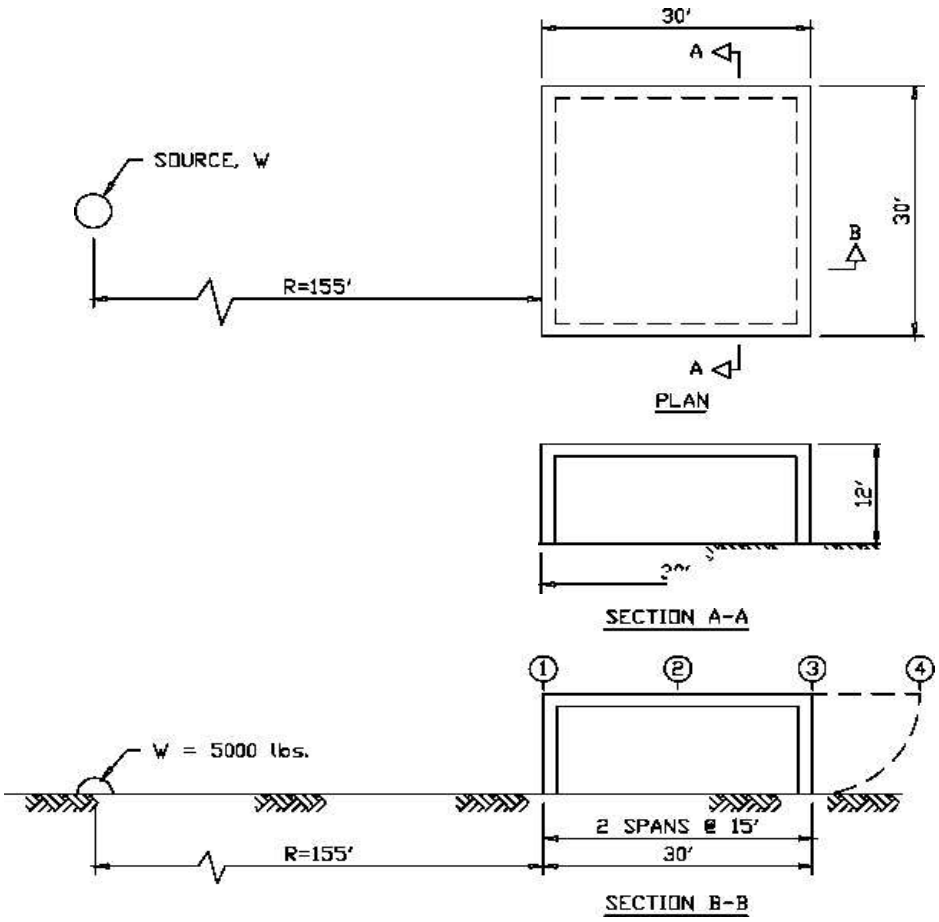
d) Xác định đường cong đồ thị hàm số áp lực thời gian của tải trọng sóng tới với pha âm tác đụng lên tường bên

Bước 9: Xác định các bước tính toán và các giá trị tính toán đồ thị mô tả tải trọng động theo thời gian của tải trọng nổ tác động lên nóc như với quy trình của tường bên.

Bước 10: Xác định tải trọng động tác động lên tường sau. Quy trình tính giống với tường trước với giả thiết tường sau được quay về vị trí phương ngang.

3. Tính toán tải trọng nổ và so sánh giữa các phương pháp

Xác định tải trọng và các tham số mô tả tải trọng động của tải trọng nổ trên mặt đất với công trình nổ trên mặt đất ứng với tường trước, tường bên và tường sau. Các điểm tính toán 1,2,3 như trên hình vẽ dưới đây:



Hình 7. Sơ đồ tính toán tải trọng

Khoảng cách từ lượng nổ tới mặt trước R = 150 ft

Công trình có kích thước cao 30x30x12 ft

Lượng nổ lần lược có giá trị W = [1000 750 500 250 100 50 25] lbs;

Sử dụng chương trình tự động tính toán tải trọng nổ với công trình nêu trên ta có kết quả như sau:

3.1. Tính toán theo phương pháp giáo trình công sự

Bảng 1. Tính toán áp lực tác dụng lên tường trước theo phương pháp GTCS

Tính toán tường trước								
p lực sóng tới và sóng		Giả sử $\Delta t/\tau$ <<1			Xuất hiện hiện tượng chảy bao			
$\Delta P\phi$ (kG/cm^2)	ΔP_{fx} (kG/cm2)	$\Delta^{-}P\phi$ (kG/cm^2)	C (m/s)	Δt (s)	τ (s)	ΔP_t (kG/cm^2)	ΔP_{cb} (kG/cm^2)	M
0.23	0.5	0.38	356.1825617	0.01	0.032	0.16	0.17	0.22
0.2	0.43	0.32	353.8661296	0.01	0.031	0.14	0.15	0.19
0.16	0.34	0.26	351.4759534	0.01	0.029	0.1	0.11	0.16
0.12	0.25	0.19	348.5817457	0.01	0.015	0.04	0.04	0.12
0.08	0.17	0.13	345.997615	0.01	0.013	0.02	0.02	0.09
0.06	0.12	0.09	344.2148564	0.01	0.012	0.01	0.01	0.06
0.05	0.1	0.08	343.7610164	0.01	0.011	0	0	0.05

Bảng 2. Tính toán áp lực tác dụng lên tường sau và tường bên theo phương pháp GTCS

Tính toán tường sau				Tính toán tường bên và nóc		
Áp lực tác dụng lên tường sau				Áp lực tác dụng lên tường bên và nóc		
ΔP_3 (kG/cm^2)	Dϕ (m/s)	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	ΔP_2 (kG/cm^2)	τ (s)	n
0.15	371.04	0.02	0.01	0.23	0.032	1
0.13	367.14	0.02	0.01	0.2	0.031	1
0.11	361.87	0.03	0.01	0.16	0.029	1
0.08	356.53	0.03	0.01	0.12	0.015	1
0.05	351.11	0.03	0.01	0.08	0.013	1
0.04	348.36	0.03	0.01	0.06	0.012	1
0.03	346.98	0.03	0.01	0.05	0.011	1

3.2 Tính toán theo phương pháp UFC 3-340-2

Bảng 3. Tính toán áp lực tác dụng lên tường trước theo phương pháp UFC 3-340-2

Xác định tải trọng tường trước									
P_{so} (psi)	C_r (ft/ms)	S (ft)	G (ft)	t_c (ms)	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_{max} (psi)	t_{rf} (ms)
5.16	1.2	12	15	22.22	24.55	0.63	1	5.79	34.44
4.41	1.19	12	15	22.41	23.91	0.46	1	4.87	33.25
3.57	1.17	12	15	22.79	22.77	0.31	1	3.88	31.68
2.53	1.16	12	15	22.99	20.48	0.16	1	2.69	28.29
1.67	1.14	12	15	23.39	17.02	0.1	1	1.77	23.62
1.24	1.13	12	15	23.6	14.52	0.1	1	1.34	20.03
0.93	1.13	12	15	23.6	12.24	0.1	1	1.03	16.88

Bảng 4. Tính toán áp lực tác dụng lên tường bên theo phương pháp UFC 3-340-2

Xác định tải trọng pha dương tác động lên tường bên											
P_{sof} (psi)	P_{sof} (kG/cm^2)	L (ft)	L_w/L (ft)	C_E	$t_d/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_d (ms)	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_R (psi)
4.41	0.31	15	2.15	0.69	1.32	14.03	3.87	41.12	0.22	-0.4	2.95
3.79	0.27	15	2.03	0.67	1.39	13.42	4.15	40.07	0.16	-0.4	2.48
3.09	0.22	15	1.88	0.65	1.64	13.83	4.68	39.47	0.1	-0.4	1.97
2.22	0.16	15	1.62	0.6	2.19	14.66	5.48	36.68	0.1	-0.4	1.29
1.47	0.1	15	1.31	0.54	2.8	13.81	6.11	30.14	0.1	-0.4	0.75
1.1	0.08	15	1.1	0.49	3.22	12.61	6.61	25.88	0.1	-0.4	0.5
0.82	0.06	15	0.92	0.43	3.55	11.03	7.23	22.47	0.1	-0.4	0.31

Tải trọng pha âm của nửa trên tường bên				
C_E^-	$t_{of}^-/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_{of}^- (ms)	P_r^- (psi)	$0.25t_{of}^-$ (ms)
0.27	10.89	115.72	1.19	28.93
0.27	10.89	105.14	1.02	26.29
0.27	10.98	92.609	0.83	23.15
0.27	11.18	74.843	0.6	18.71
0.26	11.48	56.624	0.38	14.16
0.25	11.72	45.882	0.28	11.47
0.24	11.98	37.225	0.2	9.31

Bảng 5. Tính toán áp lực tác dụng lên nóc theo phương pháp UFC 3-340-2

Tính toán tải trọng nóc (Pha dương)												Pha âm	
L_{wf}/L	P_{sof} (psi)	P_{sof} (kG/cm^2)	C_E	P_{so} (psi)	$t_d/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_d (ms)	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_R (psi)	C_E^-	$t_{of}^-/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)
2.15	5.16	0.36	0.69	3.56	1.26	13.39	3.69	39.21	0.3	-0.4	3.44	0.27	10.89
2.03	4.41	0.31	0.67	2.95	1.32	12.74	3.92	37.85	0.21	-0.4	2.87	0.27	10.89
1.88	3.57	0.25	0.65	2.32	1.55	13.07	4.4	37.11	0.13	-0.4	2.27	0.27	10.98
1.62	2.53	0.18	0.6	1.52	2.11	14.13	5.29	35.41	0.1	-0.4	1.48	0.27	11.18
1.31	1.67	0.12	0.54	0.9	2.8	13.81	6.11	30.14	0.1	-0.4	0.86	0.26	11.48
1.1	1.24	0.09	0.49	0.61	3.22	12.61	6.61	25.88	0.1	-0.4	0.57	0.25	11.72
0.92	0.93	0.07	0.43	0.4	3.55	11.03	7.23	22.47	0.1	-0.4	0.36	0.24	11.98

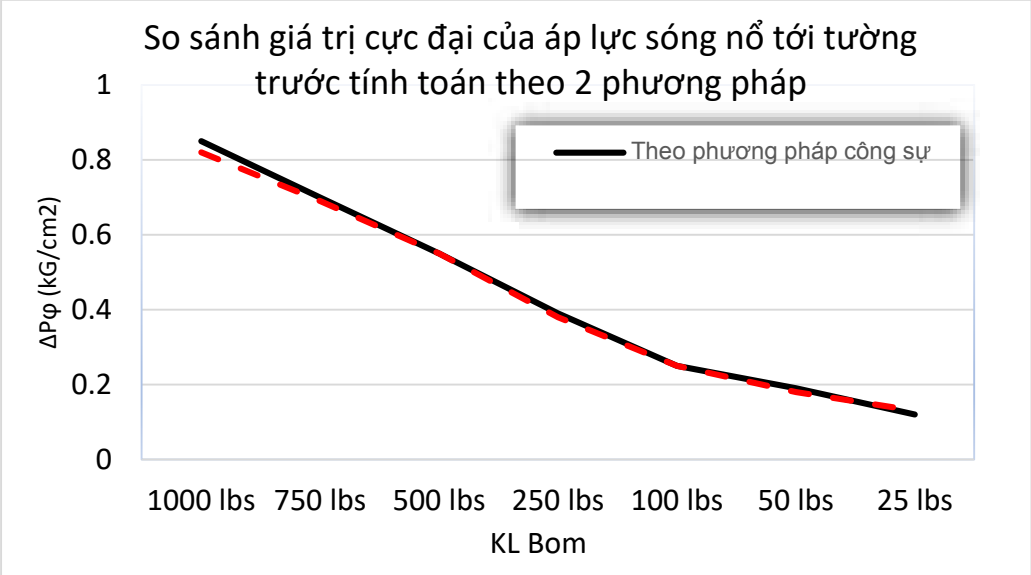
Bảng 6. Tính toán áp lực tác dụng lên nóc theo phương pháp UFC 3-340-2

Tính toán tải trọng tường sau (Pha dương)											
L_{wf}/L	P_{sof} (psi)	P_{sof} (kG/cm^2)	C_E	P_{so} (psi)	$t_d/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_d (ms)	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_R (psi)
1.12	3.84	0.27	0.49	1.88	2.35	24.97	5.34	56.75	0.1	-0.4	1.84
1.05	3.32	0.23	0.47	1.56	2.68	25.88	5.87	56.67	0.1	-0.4	1.52
0.97	2.72	0.19	0.45	1.22	3.09	26.06	6.54	55.16	0.1	-0.4	1.18
0.83	1.97	0.14	0.41	0.81	3.69	24.7	7.65	51.21	0.1	-0.4	0.77
0.67	1.32	0.09	0.35	0.46	3.82	18.84	8.67	42.76	0.1	-0.4	0.42
0.56	0.99	0.07	0.31	0.31	3.76	14.72	9.73	38.09	0.1	-0.4	0.27
0.47	0.74	0.05	0.27	0.2	3.64	11.31	10.98	34.12	0.1	-0.4	0.16

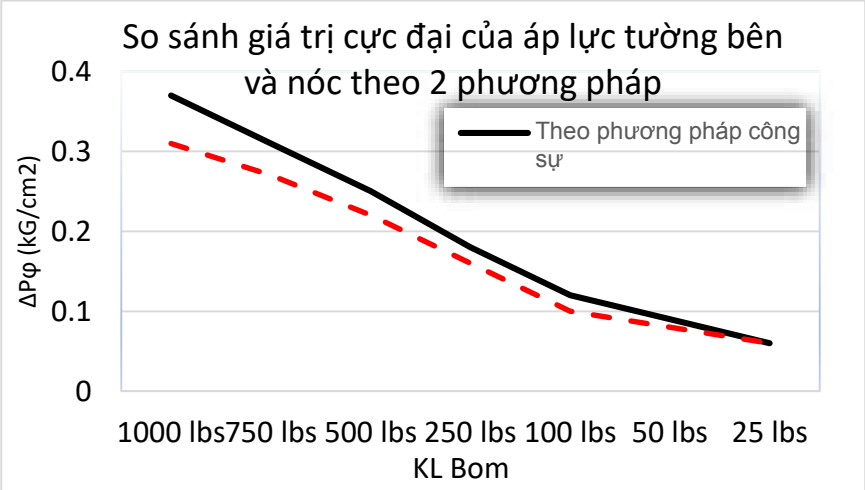
Tính toán tải trọng tường sau (Pha âm)				
C_E^-	$t_{of}^-/W^{1/3}$ (ms/lb$^{1/3}$)	t_{of}^- (ms)	P_r^- (psi)	$0.25t_{of}^-$ (ms)
0.25	11.7	124.33	0.96	31.08
0.25	11.79	113.83	0.83	28.46
0.25	11.91	100.45	0.68	25.11
0.24	12.14	81.27	0.47	20.32
0.22	12.46	61.46	0.29	15.37
0.2	12.74	49.88	0.2	12.47
0.17	13.02	40.46	0.13	10.12

3.2 So sánh kết quả tính toán

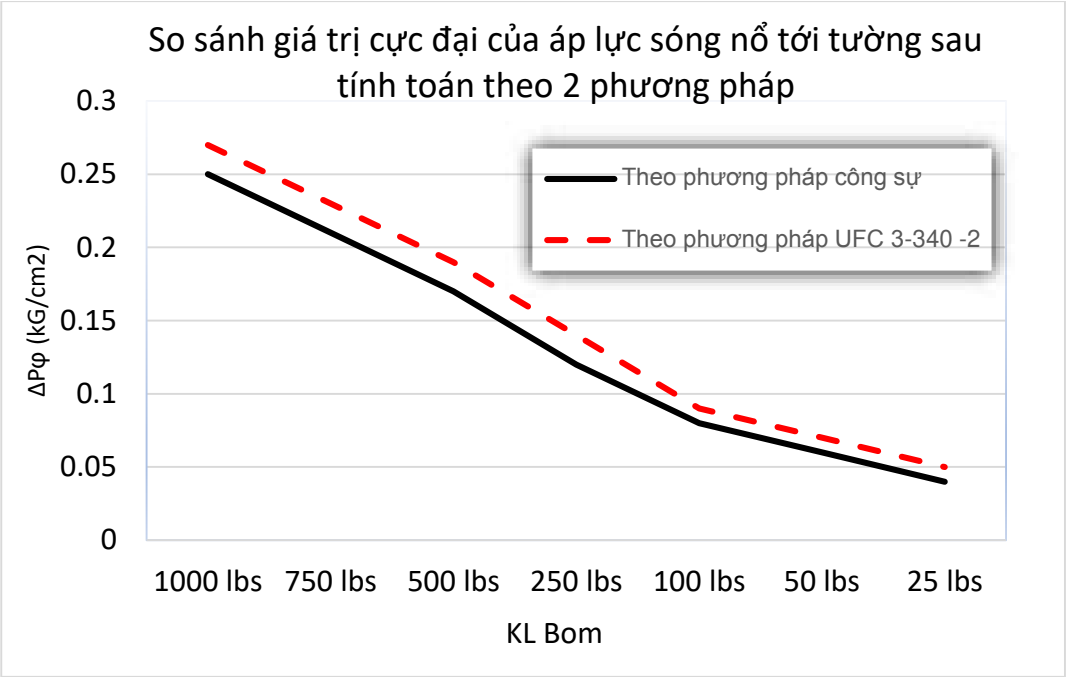
Ứng với mỗi giá trị đương lượng nổ của khối thuốc nổ, với hai phương pháp trên hoàn toàn có thể tự động tính và vẽ được đường đồ thị tải trọng của tải tải trọng tác dụng lên tường trước, tường bên, tường nóc và tường sau của công trình. Để so sánh kết quả tính của 2 phương pháp, nhóm tác giả so sánh giá trị tải trọng cực đại tác dụng lên tường trước, tường bên và tường sau của công trình.



Hình 8. So sánh tải trọng cực đại tới tường trước



Hình 9. So sánh tải trọng cực đại tới tường bên và tường nóc



Hình 8. So sánh tải trọng cực đại tới tường sau

3.2 Nhận xét

Sai lệch của cả hai phương pháp tính toán về giá trị cực đại không quá lớn (nhỏ hơn 10%). Phương pháp tính toán của theo giáo trình công sự với tường trước, tường bên và tường nóc có xu hướng cao và an toàn hơn phương pháp của UFC, mặc dù trong tính toán theo UFC đã cho hệ số an toàn là 20%. Tuy nhiên tính toán áp lực cực đại theo tường sau thì có sự sai lệch đáng kể. Giá trị áp lực cực đại tính toán theo tường sau tính theo UFC lại cao hơn so với tính toán theo giáo trình công sự.

4. Kết luận

Bài báo nêu tóm tắt về hai phương pháp tiếp cận cách tính toán khác nhau giữa giáo trình công sự và theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2. Dựa trên cơ sở lý thuyết và dữ liệu thực nghiệm, các tác giả đã phát triển thành bộ công cụ cho phép tự động tính toán tải trọng nổ theo cả 2 cách trên. Hướng tiếp cận của giáo trình công sự có sự tương đồng về bản chất, hình dạng các đường cong mô tả tải trọng sóng nổ tác động lên công trình nổi ở các vị trí tường trước, tường bên và tường sau. Giá trị thời gian chảy bao qua mặt trước của 2 phương pháp đều giống nhau. Kết quả tính toán cụ thể cho thấy độ tin cậy và đơn giản trong tính toán tải trọng theo công thức giải tích của giáo trình công sự. Trong khi đó tính toán theo phương pháp UFC 3-340-2 phức tạp và chi tiết hơn. Đặc biệt theo phương pháp UFC 3-340-2 có tính toán chi tiết các tham số của pha âm của vụ nổ - giá trị bị bỏ qua khi tính toán theo phương pháp công sự. Giá trị pha âm này sẽ không đáng kể với vụ nổ nhỏ, nhưng lại là pha giãn rất nguy hiểm với vụ nổ có đương lượng nổ lớn.

Trong tính toán kết cấu, để chi tiết và chính xác, khuyến nghị sử dụng dữ liệu thực nghiệm của UFC 3-340-2. Dữ liệu thực nghiệm trên được trình bày chi tiết và số hóa, hoàn toàn có thể tự động được trích xuất, nội suy và áp dụng tự động tính toán. Trong khi đó, để đơn

giản, tính nhanh và thiên về an toàn khuyến nghị sử dụng các công thức giải tích đơn giản của giáo trình công sự.

Tài liệu tham khảo

[1] P. F. Acosta, "Overview of UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," in *Structures Congress 2011*, 2011, pp. 1454–1469.

[2] M. A. Polcyn, K. D. Myers, B. ENGINEERING, and R. C. I. N. C. S. A. N. A. TX., *Use of SBEDS for Blast Resistant Design in Accordance with UFC 3-340-02*. Defense Technical Information Center, 2010.

[3] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, "UFC 3-340-02 UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) STRUCTURES TO RESIST THE EFFECTS OF ACCIDENTAL EXPLOSIONS," 2014.

[4] V. Đ. L. Nguyễn Trí Tá, Đặng Văn Đích, *Giáo trình Công sự tập 1*. Hà Nội: Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2008.

Calculation of blast loading affecting onto above-ground structures based on vietnamese defensive structures textbooks and UFC 3-340-02 standard

Abstract: *Researching blast loading calculation is a common and widely studied problem globally. The calculated results of blast loads serve as the basis for designing issues and checking the blast resistance of structures when affected by various explosives. To calculate blast loads, experimental explosion results are conducted and computational data is standardized in two ways: developing experimental interpretation formulas using regression methods based on survey results (Sadopxki, Mill formulas, etc.); building large databases as a basis for direct interpolation (UFC 3-340-02). This paper focuses on developing an automated program for calculating, analyzing, and comparing methods for calculating blast loads acting on above-ground structures based on the defensive structures textbooks and the UFC 3-340-02 standard.*

Keywords: Blast loading, shock wave, incident wave, reflected wave, UFC 3-340-2

Dự đoán mức độ đập vỡ đất đá theo dạng hàm phân phối Rosin-Rammler, Gate-Gaudin-Schumann và Swebrec

Vũ Tùng Lâm[1], Vũ Mạnh Tùng[2], Lê Sỹ Thượng[1]

[1]*Đại học kỹ thuật Lê Quý Đôn*

[2]*Cao đẳng cảnh sát nhân dân 1*

Email: lamvt@lqdtu.edu.vn; Tel: 0982.955.168

Tóm tắt

Mức độ đập vỡ đất đá (MĐĐVĐĐ) là một tham số đại diện cho chất lượng của một vụ nổ. Hiện nay, mức độ đập vỡ đất đá vẫn chủ yếu được xác định dựa trên phân tích sàng để tính ra cỡ hạt trung bình. Tuy nhiên, các mắt sàng có các khoảng trống kích thước tương đối rộng chưa bao phủ được toàn bộ dải cỡ hạt là một hạn chế của phương pháp này. Do đó, bài báo cung cấp một giải pháp trực tiếp xác định MĐĐVĐĐ cũng như cỡ hạt trung bình D_{tb} của các cục đá trong đống đá nổ mìn dựa trên ba dạng hàm phân phối nổi tiếng là Rosin-Rammler (RR), Gate-Gaudin-Schumann (GGS) và Swebrec. Kết quả của bài báo có thể được sử dụng để đánh giá nhanh chất lượng của một vụ nổ, làm cơ sở để tối ưu các tham số nổ. So với các phương pháp sử dụng học máy khác, phương pháp luận đưa ra trong bài báo có thể được tái sử dụng để thiết lập các hàm hồi quy tường minh nếu dạng hàm này được xác định trước.

Từ khóa: *Mức độ đập vỡ đất đá (MĐĐVĐĐ), cỡ hạt trung bình, hàm phân phối, Rosin-Rammler (RR), Gate-Gaudin-Schumann (GGS), Swebrec.*

1. Đặt vấn đề

Theo các chuyên gia công tác nổ [1, 2], năng lượng nổ hiệu dụng dùng để đập vỡ đất đá chỉ chiếm không đến 30%, đồng nghĩa với trên 70% năng lượng nổ là vô ích, tác động tiêu cực đến môi trường như gây ra bụi, chấn động…. Vì vậy, nghiên cứu những cách làm tăng hiệu quả phá vỡ đất đá và giảm tác động tiêu cực của nổ luôn là mục tiêu của những ngành, lĩnh vực sử dụng năng lượng nổ như khai thác mỏ, thủy lợi và xây dựng công trình ngầm.

Trong đó, việc sử dụng các phương pháp thống kê để nghiên cứu về nổ là một trong những phương pháp hiệu quả. Theo hướng này, các nhà khoa học chỉ xét đến trạng thái ban đầu và kết thúc của quá trình phá hủy mà không quan tâm đến bản chất tự nhiên của quá trình động lực học đập vụn [3]. Có thể coi trạng thái ban đầu là các mẫu thí nghiệm và chỉ tiêu thuốc nổ, trạng thái cuối là MĐĐVĐĐ, được đại diện bởi phân phối cỡ hạt hoặc kích thước cỡ hạt trung bình (D_{tb}). Đây là một tiêu chí quan trọng để đánh giá chất lượng của một vụ nổ [3, 4].

Trên thế giới, nhiều tác giả đã nghiên cứu về MĐĐVĐĐ bằng cách xây dựng các hàm phân phối cỡ hạt đống đá sau nổ theo các dạng hàm Rosin-Rammler (RR), hàm Gate-Gaudin-Schumann (GGS), hàm Swebrec [5-7]. Nói chung, các nghiên cứu này đều chỉ ra rằng các hàm RR, GGS gặp khó khăn khi mô tả sự giãn nở và co lại ở những vùng khác nhau trong phân phối cỡ hạt trong thực tế. Trái lại, hàm Swebrec có độ chính xác cao hơn trong việc mô tả toàn bộ dải kích thước hạt từ quy mô nhỏ đến quy mô công nghiệp, từ cỡ hạt lớn đến hạt mịn. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu này, các tác giả chưa đưa ra phương pháp tìm hàm phân phối dựa trên số liệu có sẵn và quan hệ của nó với D_{tb}, gây khó khăn cho độc giả muốn tìm hiểu sâu hơn.

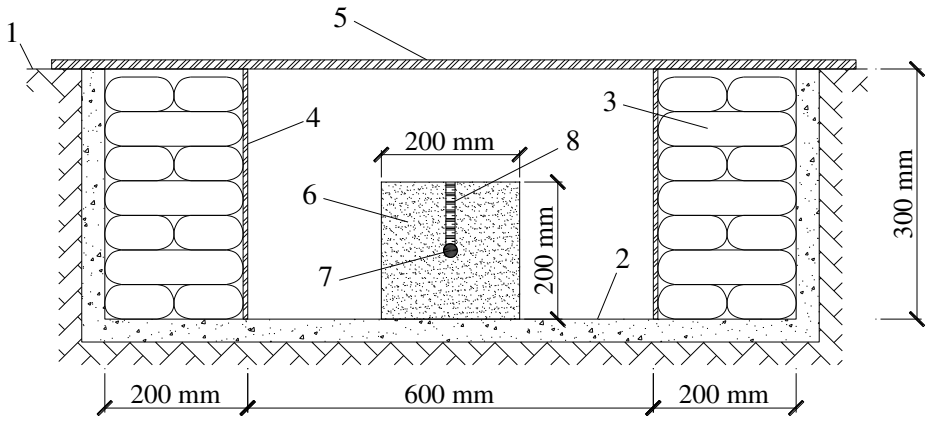
Tại Việt Nam, MĐĐVĐĐ cũng đã được nhiều tác giả nghiên cứu, với mục đích phân tích ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau đến D_{tb}. Một số ảnh hưởng có thể kể đến như nghiên cứu của các tác giả V.T.Hiếu và Đ.T.Thắng [8] là số lượng mặt thoáng, nghiên cứu của tác giả L.V.Quyển và L.T.Hải [9] là máy móc thiết bị, nghiên cứu của tác giả Đ.T.Thắng và cộng sự [10-13] là hình dạng lượng nổ, và khoảng cách từ tâm của một lượng nổ [14]. Điểm chung của các nghiên cứu này là sử dụng thông số D_{tb} được tính toán từ số liệu phân tích sàng theo tác giả V.M.Kuznetsov [15] mà chưa xét đến việc thiết lập hàm phân phối đầy đủ, đây là một phương pháp phân tích nhanh thường được sử dụng trong phân tích sàng nhưng có độ chính xác bị giới hạn bởi số lượng sàng và kích thước mắt sàng.

Trong khuôn khổ thí nghiệm nhỏ, kế thừa một phần nghiên cứu [16], bài báo này cung cấp một phương pháp trực tiếp xác định quy luật phân phối cỡ hạt theo hàm GGS, hàm RR và hàm Swebrec, dự đoán các tham số như chỉ số mũ của hàm phân phối b, cỡ hạt trung bình D_{tb}, và chỉ tiêu thuốc nổ q, tạo điều kiện cho việc đánh giá nhanh chất lượng vụ nổ và lựa chọn tham số nổ phù hợp.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.1. Mô hình thực nghiệm

Mô hình thí nghiệm được thể hiện trong hình 1 sau:



Hình 1. Mô hình thí nghiệm

1 – Mặt đất; 2 – Vỏ bê tông; 3 – túi cát; 4 – tấm tôn; 5 – nắp thép; 6 – mẫu thí nghiệm; 7 – lượng nổ và kíp; 8 – bua.

Trong hình 1, mô hình thí nghiệm sử dụng một bể bán âm sâu 300 (mm), rộng 1000 (mm), mẫu thí nghiệm hình lập phương kích thước 200x200x200 (mm) làm từ vữa xi măng cát mác M100 (B7,5). Lượng nổ Ten được kích nổ bằng kíp điện số 8, nguồn gây nổ là máy điểm hỏa MFB-200. Chỉ tiêu thuốc nổ của lượng nổ và kíp được lựa chọn lần lượt là 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8; 2,1 kg/m^3. Để tránh hiện tượng đập vỡ thứ cấp do va đập của các cục đá văng, thí nghiệm được thiết kế gồm hai tầng giảm tốc, tầng thứ nhất gồm một tấm tôn mỏng bao quanh mẫu thí nghiệm, tầng thứ hai gồm các bao cát đặt xung quanh.

2.2. Thu thập số liệu thí nghiệm

Các sản phẩm nổ được phân tích bằng bộ sàng có cỡ sàng lần lượt là 2,5; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70 (mm), cho ra 10 nhóm cỡ hạt trung bình theo cỡ sàng, cân từng nhóm như hình 1 và tổng hợp số liệu theo phần trăm khối lượng lũy kế. Số liệu của 6 lần nổ được tổng hợp trong bảng 1 sau:

Bảng 1. Bảng phần trăm khối lượng lũy kế

STT	Cỡ sàng x, mm										
	Khoảng	**<2,5**	**2,5÷5**	**5÷10**	**10÷20**	**20÷30**	**30÷40**	**40÷50**	**50÷60**	**60÷70**	**>70**
	TB	**1,25**	**3,75**	**7,50**	**15**	**25**	**35**	**45**	**55**	**65**	**80**
1	q=0,6	0,026	0,055	0,096	0,138	0,196	0,266	0,394	0,490	0,659	1,000
2	q=0,9	0,045	0,088	0,164	0,246	0,337	0,431	0,555	0,691	0,833	1,000
3	q=1,2	0,108	0,139	0,191	0,274	0,398	0,510	0,616	0,742	0,880	1,000
4	q=1,5	0,176	0,271	0,385	0,493	0,586	0,682	0,787	0,863	0,949	1,000
5	q=1,8	0,151	0,283	0,408	0,530	0,623	0,775	0,838	0,894	0,976	1,000
6	q=2,1	0,166	0,324	0,438	0,606	0,771	0,859	0,912	0,947	0,979	1,000

3. Phương pháp luận

3.1. Xây dựng hàm phân phối cỡ hạt dạng Gate-Gaudin-Schumann

Xác định một hàm giả thiết dạng phân phối Gate-Gaudin-Schumann như sau:

$$\hat{P} = \hat{P}_{(x)} = \left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^a \tag{1}$$

Đặt $\overline{x}_i = \frac{x_i}{x_{\max}}$, xét một hàm mất mát với biến số a (hệ số phân tán, thể hiện mức độ phân bố của kích thước hạt), bao gồm tất cả cỡ sàng trung bình trong bảng 1, có xét đến cả cỡ sàng 0 như sau:

$$L(a) = \frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\left(P_{(x_i)} - \hat{P}_{(x_i)}\right)^2 = \frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\left(P_i - \hat{P}_i\right)^2 = \frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\left(P_i - \overline{x}_i^{\,a}\right)^2 \tag{2}$$

Việc tìm hàm phân phối GGS phù hợp tương đương với việc tìm ra hệ số a để tối thiểu hóa phương trình (2). Đạo hàm riêng phương trình (2) theo a, thu được:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial a} &= \frac{1}{m}\left[\left(P_1 - \overline{x}_1^{\,a}\right)\left(-\overline{x}_1^{\,a}\ln\overline{x}_1\right) + \ldots + \left(P_m - \overline{x}_m^{\,a}\right)\left(-\overline{x}_m^{\,a}\ln\overline{x}_m\right)\right] \\ &= \frac{1}{m}\left[\overline{x}_1^{\,2a}\ln\overline{x}_1 + \ldots + \overline{x}_m^{\,2a}\ln\overline{x}_m - P_1\overline{x}_1^{\,a}\ln\overline{x}_1 - \ldots - P_m\overline{x}_m^{\,a}\ln\overline{x}_m\right] \\ &= \frac{1}{m}\left[\sum_{i=1}^{m}\overline{x}_i^{\,2a}\ln\overline{x}_i - \sum_{i=1}^{m}P_i\overline{x}_i^{\,a}\ln\overline{x}_i\right]\end{aligned} \tag{3}$$

Cho phương trình (3) bằng 0, bổ sung thêm một số vô cùng bé vào những vị trí cụ thể của phương trình (3), tìm ra tham số a là nghiệm của phương trình (4) sau:

$$\sum_{i=1}^{m}P_i\overline{x}_i^{\,a}\ln\left(\overline{x}_i + \varepsilon\right) - \sum_{i=1}^{m}\overline{x}_i^{\,2a}\ln\left(\overline{x}_i + \varepsilon\right) = 0 \text{ , với } \overline{x}_i = \frac{x_i}{x_{\max}} \tag{4}$$

Trong các phương trình (1) đến (4): P_i hay $P_{(x_i)}$ là phân phối lũy kế đến cỡ hạt thứ i của phân tích sàng; $\hat{P}_i$ hay $\hat{P}_{(x_i)}$ - phân phối lũy kế đến cỡ hạt thứ i tính từ hàm giả thiết (1); x_{max} là cỡ hạt lớn nhất tính theo mm; x_i là kích cỡ mắt sàng thứ i tính theo mm; a là hệ số mũ của hàm GGS; ε là một số vô cùng bé; m là tổng số cỡ sàng (bao gồm cả cỡ sàng 0).

Kích thước cục trung bình của đống đá sau nổ là kỳ vọng toán học của giá trị kích thước cục x, được tính theo công thức sau:

$$D_{tb}=\int_0^1 xd\left[P_{(x)}\right]=\int_0^{x_{\max}} xp_{(x)}dx=\int_0^{x_{\max}} x\frac{ax^{a-1}}{x_{\max}^a}dx=\int_0^{x_{\max}}\frac{ax^a}{x_{\max}^a}dx$$

$$=\frac{ax_{\max}}{a+1}\approx\sum_{i=1}^{iter}\frac{ax_i^a}{x_{\max}^a}\Delta x\text{, với }\Delta x=x_{\max}/iter \quad (5)$$

Trong đó: D_{tb} – kích thước cục trung bình (mm); x – kích thước cục (mm); x_{max} là kích thước cục lớn nhất (mm); P(x) là hàm phân phối cỡ hạt từ (1); p(x) – phân phối xác suất của cỡ hạt x, thu được bằng cách đạo hàm P(x) theo x; a – hệ số mũ hàm phân phối dạng Gate-Gaudin-Schumann; iter – số lần tính lặp, chọn iter=1000000.

3.2. Xây dựng hàm phân phối cỡ hạt dạng Rosin-Rammler

Xác định một hàm giả thiết dạng phân phối Rosin-Rammler như sau:

$$\hat{P}=\hat{P}_{(x)}=1-e^{-\left(\frac{x}{x_{63,2}}\right)^b} \quad (6)$$

Đặt $\tilde{x}_i=\frac{x_i}{x_{63,2}}$, xét một hàm mất mát với biến số b, bao gồm tất cả cỡ sàng trung bình trong bảng 1, có xét đến cả cỡ sàng 0 như sau:

$$L(b)=\frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\left(P_{(x_i)}-\hat{P}_{(x_i)}\right)^2=\frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\left(P_i-\hat{P}_i\right)^2=\frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\left(P_i+e^{-\tilde{x}_i^b}-1\right)^2 \quad (7)$$

Việc tìm hàm phân phối RR phù hợp tương đương với việc tìm ra hệ số b để tối thiểu hóa phương trình (7). Đạo hàm riêng phương trình (7) theo b, thu được:

$$\frac{\partial L}{\partial b}=\frac{1}{m}\left[\left(P_1+e^{-\tilde{x}_1^b}-1\right)\left(e^{-\tilde{x}_1^b}\tilde{x}_1^b\ln\tilde{x}_1\right)+...+\left(P_m+e^{-\tilde{x}_m^b}-1\right)\left(e^{-\tilde{x}_m^b}\tilde{x}_m^b\ln\tilde{x}_m\right)\right]$$

$$=\frac{1}{m}\left[P_1e^{-\tilde{x}_1^b}\tilde{x}_1^b\ln\tilde{x}_1+...+P_me^{-\tilde{x}_m^b}\tilde{x}_m^b\ln\tilde{x}_m+e^{-2\tilde{x}_1^b}\tilde{x}_1^b\ln\tilde{x}_1+...\right.$$

$$\left.+e^{-2\tilde{x}_m^b}\tilde{x}_m^b\ln\tilde{x}_m-e^{-\tilde{x}_1^b}\tilde{x}_1^b\ln\tilde{x}_1-...-e^{-\tilde{x}_m^b}\tilde{x}_m^b\ln\tilde{x}_m\right]$$

$$=\frac{1}{m}\left[\sum_{i=1}^{m}P_ie^{-\tilde{x}_i^b}\tilde{x}_i^b\ln\tilde{x}_i+\sum_{i=1}^{m}e^{-2\tilde{x}_i^b}\tilde{x}_i^b\ln\tilde{x}_i-\sum_{i=1}^{m}e^{-\tilde{x}_i^b}\tilde{x}_i^b\ln\tilde{x}_i\right] \quad (8)$$

Cho phương trình (8) bằng 0, bổ sung thêm một số vô cùng bé vào những vị trí cụ thể của phương trình (8), tìm ra tham số b là nghiệm của phương trình (9) sau:

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{P_i\tilde{x}_i^b\ln\left(\tilde{x}_i+\varepsilon\right)}{e^{\tilde{x}_i^b}}+\sum_{i=1}^{m}\frac{\tilde{x}_i^b\ln\left(\tilde{x}_i+\varepsilon\right)}{e^{\tilde{x}_i^{2b}}}-\sum_{i=1}^{m}\frac{\tilde{x}_i^b\ln\left(\tilde{x}_i+\varepsilon\right)}{e^{\tilde{x}_i^b}}=0\text{, với }\tilde{x}_i=\frac{x_i}{x_{63,2}} \quad (9)$$

Trong các phương trình từ (6) đến (9): P_i hay $P_{(x_i)}$ là phân phối lũy kế đến cỡ hạt thứ i của phân tích sàng; $\hat{P}_i$ hay $\hat{P}_{(x_i)}$ - phân phối lũy kế đến cỡ hạt thứ i tính từ hàm giả thiết (6); x_i là kích cỡ mắt sàng thứ i; b là hệ số mũ của hàm RR; ε là một số vô cùng bé; m là tổng số cỡ sàng (bao gồm cả cỡ sàng 0); $x_{63,2}$ là kích cỡ mắt sàng có 63,2% lọt sàng, ứng với $P_{(x_{63,2})}=0,632$.

Kích thước cục trung bình được tính theo công thức sau:

$$D_{tb}=\int_0^1 xd\left[P_{(x)}\right]=\int_0^{\infty} xp_{(x)}dx=D_{tb}=\int_0^{\infty} x\frac{bx^{b-1}}{e^{\left(\frac{x}{x_{63,2}}\right)^b}x_{63,2}^b}dx=\int_0^{\infty}\frac{bx^b}{e^{\left(\frac{x}{x_{63,2}}\right)^b}x_{63,2}^b}dx$$

$$\approx \sum_{i=1}^{iter} \frac{b x_i^b}{e^{\left(\frac{x_i}{x_{63,2}}\right)^b} x_{63,2}^b} \Delta x \text{, với } \Delta x = \overline{x_{\max}} / iter \tag{10}$$

Trong đó: D_{tb} – kích thước cục trung bình (mm); x – kích thước cục (mm); $\overline{x_{\max}}$ là kích thước cục lớn nhất (mm), sẽ tiến tới vô cùng đối với phân phối RR, chọn $\overline{x_{\max}}$=200 (mm); P(x) là hàm phân phối cỡ hạt từ (6); p(x) – phân phối xác suất của cỡ hạt x, thu được bằng cách đạo hàm P(x) theo x; b – hệ số mũ hàm phân phối dạng Rosin-Rammler; iter – số lần tính lặp, chọn iter=1000000.

3.3. Xây dựng hàm phân phối cỡ hạt dạng Swebrec

Xác định một hàm giả thiết dạng phân phối Swebrec như sau:

$$\hat{P} = \hat{P}_{(x)} = 1 \Big/ \left\{ 1 + \left[\frac{\ln\left(x_{\max}/x\right)}{\ln\left(x_{\max}/x_{50}\right)} \right]^c \right\} \tag{11}$$

Đặt $\bar{x} = \frac{\ln\left(x_{\max}/x\right)}{\ln\left(x_{\max}/x_{50}\right)}$, xét một hàm mất mát với biến số c, bao gồm tất cả cỡ sàng trung bình trong bảng 1, có xét đến cả cỡ sàng 0 như sau:

$$L(c) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^{m} \left(P_{(x_i)} - \hat{P}_{(x_i)} \right)^2 = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^{m} \left(P_i - \hat{P}_i \right)^2 = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^{m} \left(P_i - \frac{1}{1+\bar{x}_i^c} \right)^2 \tag{12}$$

Việc tìm hàm phân phối Swebrec phù hợp tương đương với việc tìm ra hệ số c để tối thiểu hóa phương trình (12). Đạo hàm riêng phương trình (12) theo c, thu được:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial c} &= \frac{1}{m} \left[\left(P_1 - \frac{1}{1+\bar{x}_1^c} \right) \left(\frac{\bar{x}_1^c \ln\left(\bar{x}_1\right)}{\left(1+\bar{x}_1^c\right)^2} \right) + \ldots + \left(P_m - \frac{1}{1+\bar{x}_m^c} \right) \left(\frac{\bar{x}_m^c \ln\left(\bar{x}_m\right)}{\left(1+\bar{x}_m^c\right)^2} \right) \right] \\
&= \frac{1}{m} \left[\frac{P_1 \bar{x}_1^c \ln\left(\bar{x}_1\right)}{\left(1+\bar{x}_1^c\right)^2} - \frac{\bar{x}_1^c \ln\left(\bar{x}_1\right)}{\left(1+\bar{x}_1^c\right)^3} + \ldots + \frac{P_m \bar{x}_m^c \ln\left(\bar{x}_m\right)}{\left(1+\bar{x}_m^c\right)^2} - \frac{\bar{x}_m^c \ln\left(\bar{x}_m\right)}{\left(1+\bar{x}_m^c\right)^3} \right] \\
&= \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^{m} \frac{P_i \bar{x}_i^c \ln\left(\bar{x}_i\right)}{\left(1+\bar{x}_i^c\right)^2} - \sum_{i=1}^{m} \frac{\bar{x}_i^c \ln\left(\bar{x}_i\right)}{\left(1+\bar{x}_i^c\right)^3} \right]
\end{aligned} \tag{13}$$

Cho phương trình (13) bằng 0, bổ sung thêm một số vô cùng bé vào những vị trí cụ thể của phương trình (13), tìm ra tham số b là nghiệm của phương trình (14) sau:

$$\sum_{i=1}^{m} \frac{P_i x_i^c \ln\left(\bar{\bar{x}}_i + \varepsilon\right)}{\left(1+\bar{\bar{x}}_i^c\right)^2} - \sum_{i=1}^{m} \frac{\bar{\bar{x}}_i^c \ln\left(\bar{\bar{x}}_i + \varepsilon\right)}{\left(1+\bar{\bar{x}}_i^c\right)^3} = 0 \text{, với } \bar{\bar{x}}_i = \frac{\ln\left[\left(x_{\max}+\varepsilon\right)/\left(x_i+\varepsilon\right)\right]}{\ln\left(x_{\max}/x_{50}\right)} \tag{14}$$

Trong các phương trình từ (11) đến (14): P_i hay $P_{(x_i)}$ là phân phối lũy kế đến cỡ hạt thứ i của phân tích sàng; $\hat{P}_i$ hay $\hat{P}_{(x_i)}$ - phân phối lũy kế đến cỡ hạt thứ i tính từ hàm giả thiết (11); x_i là kích cỡ mắt sàng thứ i; c là hệ số mũ của hàm Swebrec; ε là một số vô cùng bé; m là tổng số cỡ sàng (bao gồm cả cỡ sàng 0); x_{50} là kích cỡ mắt sàng có 50% lọt sàng, ứng với $P_{(x_{50})} = 0{,}5$.

Kích thước cục trung bình được tính theo công thức sau:

$$D_{tb}=\int_0^1 xd\left[P_{(x)}\right]=\int_0^{x_{max}} xp_{(x)}dx=D_{tb}=\int_0^{x_{max}}\frac{b\ln^b\left(x_{max}/x_{50}\right)\ln^{b-1}\left(x_{max}/x\right)}{\left[\ln^b\left(x_{max}/x_{50}\right)+\ln^b\left(x_{max}/x\right)\right]^2}dx$$

$$\approx\sum_{i=1}^{iter}\frac{b\ln^b\left(x_{max}/x_{50}\right)\ln^{b-1}\left(x_{max}/\left(x_i+\varepsilon\right)\right)}{\left[\ln^b\left(x_{max}/x_{50}\right)+\ln^b\left(x_{max}/\left(x_i+\varepsilon\right)\right)\right]^2}\Delta x\text{, với }\Delta x=x_{max}/iter \quad (15)$$

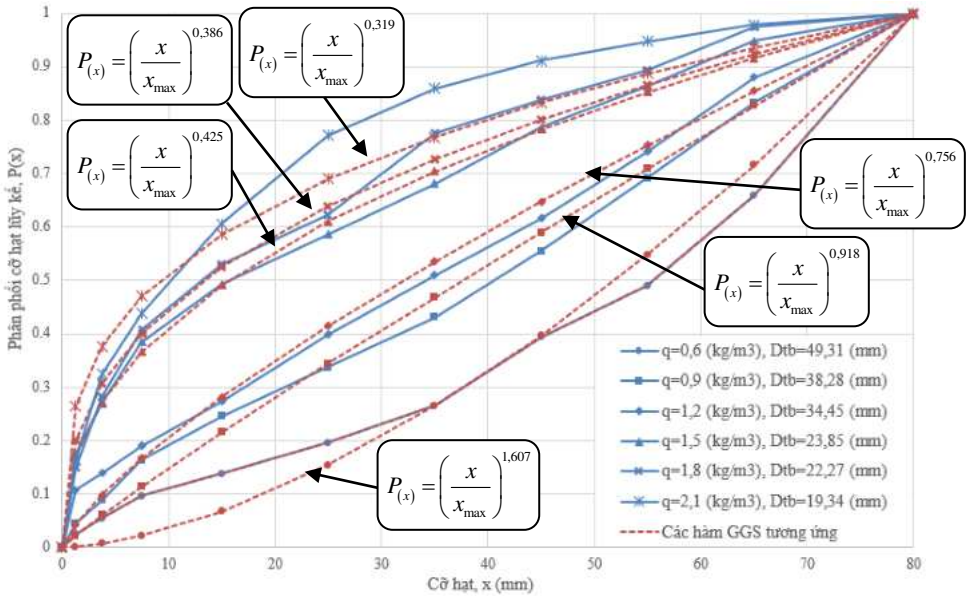
Trong đó: D_{tb} – kích thước cục trung bình (mm); x – kích thước cục (mm); x_{max} là kích thước cục lớn nhất (mm); P(x) là hàm phân phối cỡ hạt từ (11); p(x) – phân phối xác suất của cỡ hạt x, thu được bằng cách đạo hàm P(x) theo x; c – hệ số mũ hàm phân phối dạng Swebrec; iter – số lần tính lặp, chọn iter=1000000.

4. Kết quả và phân tích

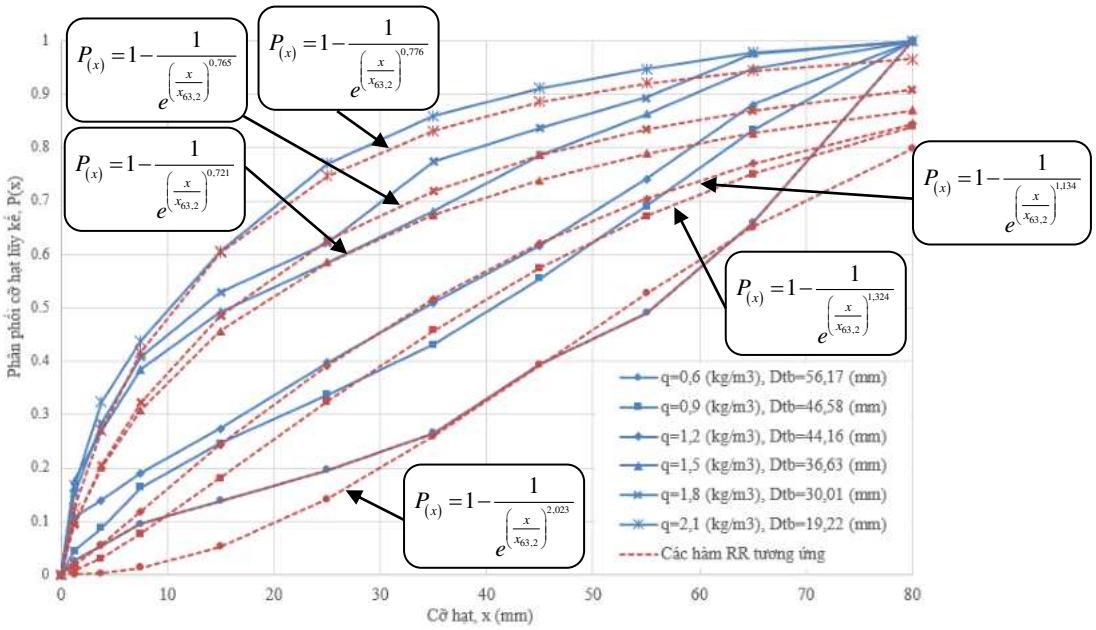
Các phương trình (4), (9), (14) là các phương trình siêu việt có duy nhất 1 ẩn số, có thể giải được bằng kỹ thuật xấp xỉ nghiệm Goal Seek của Excel, thu được nghiệm là a, b, c lần lượt là hệ số mũ của các hàm phân phối dạng GGS, RR, Swebrec tương ứng. Xây dựng các hàm phân phối, từ đó tìm được D_{tb} chính xác về mặt toán học theo các phương trình (5), (10), (15). Kết quả được thể hiện trong bảng 2 và các hình 2, 3 và 4 sau.

Bảng 2. Bảng tổng hợp kết quả hàm phân phối theo 3 dạng GGS, RR và Swebrec.

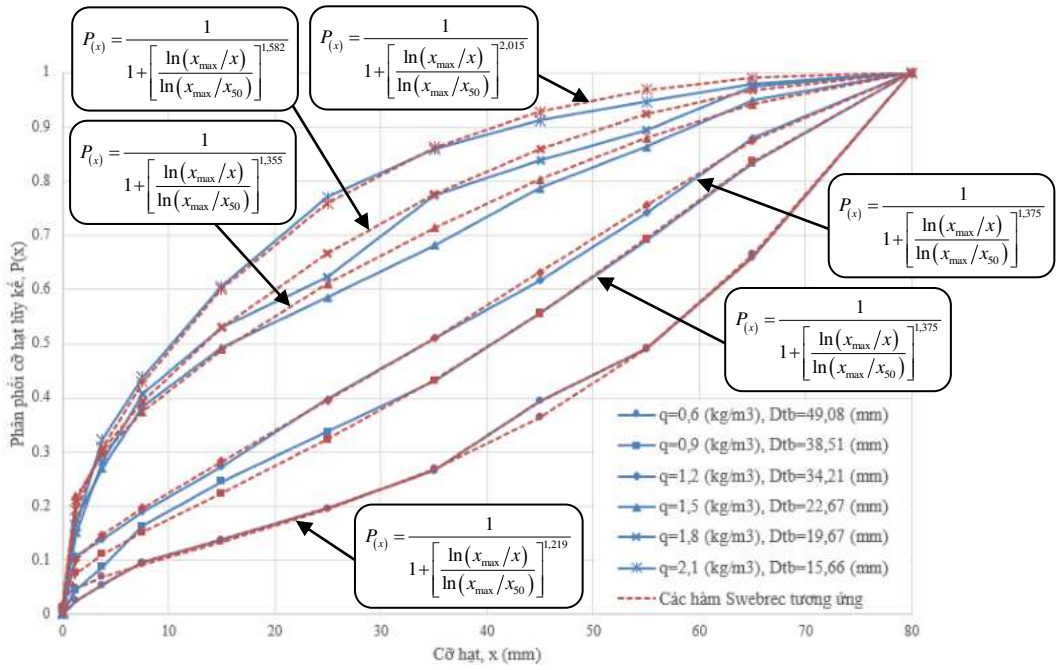
STT	q (kg/m³)	GGS			RR			Swebrec			D_{tb} sàng (mm)
		a	R^2	D_{tb} (mm)	b	R^2	D_{tb} (mm)	c	R^2	D_{tb} (mm)	
1	0,6	1,607	0,978	49,31 6,22%	2,023	0,935	56,17 6,83%	1,219	0,998	49,08 6,65%	52,58
2	0,9	0,918	0,994	38,28 9,72%	1,324	0,959	46,58 9,86%	1,375	0,998	38,51 9,19%	42,40
3	1,2	0,756	0,993	34,45 10,71%	1,134	0,956	44,16 14,46%	1,375	0,999	34,21 11,32%	38,58
4	1,5	0,425	0,999	23,85 11,96%	0,721	0,968	36,62 35,18%	1,355	0,995	22,67 16,33%	27,09
5	1,8	0,386	0,995	22,27 7,86%	0,765	0,977	30,01 24,16%	1,582	0,993	19,68 18,59%	24,17
6	2,1	0,319	0,984	19,34 0,10%	0,776	0,996	19,22 0,72%	2,015	0,998	15,66 19,14%	19,35



Hình 2. Các hàm phân phối dạng Gate-Gaudin-Schumman của 6 mẫu thí nghiệm



Hình 3. Các hàm phân phối dạng Rosin-Rammler của 6 mẫu thí nghiệm



Hình 4. Các hàm phân phối dạng Swebrec của 6 mẫu thí nghiệm

Từ bảng 2 và các hình 2, 3, 4, có thể thấy rằng hàm phân phối dạng Swebrec khớp với số liệu thí nghiệm sàng tốt hơn dạng GGS và RR, đặc biệt tại những đoạn biểu thị vùng hạt mịn với độ chính xác trên 0,99 cho tất cả các lần thí nghiệm nổ. Nói chung, các quy luật đều cho thấy chỉ tiêu thuốc nổ q càng lớn thì cỡ hạt trung bình D_{tb} càng nhỏ, quy luật này đúng cho cả ba dạng hàm phân phối. Tuy nhiên, D_{tb} từ cách tính chính xác về mặt toán học qua các phương trình (5), (10) và (15) có khác biệt tương đối với D_{tb} thu được từ phân tích sàng đã phản ánh một số hạn chế của phương pháp tính toán D_{tb} chỉ dựa vào phân tích sàng thực tế mà không rút ra dạng hàm phân phối.

Từ khoảng giới hạn hệ số mũ c của dạng hàm Swebrec là $1 \leq c \leq 4$ dựa trên kết luận từ dự án LESS FINES của Liên minh Châu Âu [17], cho phép rút ra bảng giá trị về quan hệ giữa các hệ số số mũ a, b, c, chỉ tiêu thuốc nổ q và D_{tb} như sau:

Bảng 3. Bảng tổng hợp giá trị các tham số nổ tương đối ứng với 3 hàm phân phối

Chỉ tiêu thuốc nổ q (kg/m^3)	Hệ số mũ a theo dạng hàm GGS	Hệ số b theo dạng hàm RR	Hệ số c theo dạng hàm Swebrec	D_{tb} (mm)
0,411	2,660	2,512	1,000	58,098
0,632	1,512	1,928	1,250	48,784
1,739	0,400	0,744	1,500	20,383
2,090	0,314	0,775	2,000	15,454
2,278	0,281	0,833	2,500	13,325
2,416	0,260	0,888	3,000	11,946
2,529	0,245	0,937	3,500	10,929
2,625	0,233	0,980	4,000	10,130

Trong bảng 3, do hàm dạng Swebrec có hệ số xác định R^2 lớn nhất nên các tham số q, c và D_{tb} được tính theo dạng hàm này. Đối với hàm dạng GGS và RR, các hệ số a và b tương ứng được tính gián tiếp thông qua khoảng giá trị q là $0,411 \leq q \leq 2,625$ (kg/m^3) đã được tính toán ứng với khoảng $1 \leq c \leq 4$ rút ra từ dạng hàm Swebrec.

5. Kết luận và kiến nghị

Cỡ hạt trung bình của đống đá sau nổ là môt tiêu chí quan trọng để đánh giá hiệu quả nổ. Bài báo đã thiết lập một phương pháp xác định hàm phân phối cỡ hạt của đống đá sau nổ theo các dạng hàm nổi tiếng như GGS, RR và Swebrec, đồng thời dự đoán các dải giá trị của các tham số nổ là a, b, c – q – D_{tb} dựa trên dải giá trị của c từ 1 đến 4 [17]. Dựa trên các hàm phân phối tìm được, bài báo cũng đưa ra cách tính toán D_{tb} phù hợp về mặt toán học. Các giá trị D_{tb} thu được từ các hàm phân phối này và D_{tb} từ phân tích sàng có sự sai khác nhất định từ khoảng 6% đến trên 24% rõ ràng cho thấy cỡ hạt mịn và dạng đường cong phân phối đóng một vai trò khá quan trọng trong phân phối cỡ hạt tổng thể. Các hàm phân phối tìm được với số liệu đầu vào từ phân tích sàng đều có độ chính xác cao, khớp với số liệu thực tế với R^2 lớn, đặc biệt với dạng hàm Swebrec có R^2 đều lớn hơn 0,99.

Hơn hết, tất cả các kết quả đầu ra trong bài báo đều có thể tính toán một cách tường minh từ các phương trình (4), (5), (9), (10), (14), (15) được trình bày trong bài báo mà không cần bất kỳ hiểu biết trước nào về các kỹ thuật học máy, thống kê hay toán học phức tạp. Các kết quả đều được tính toán và thể hiện bằng phần mềm Excel mà không sử dụng bất kỳ ngôn ngữ lập trình hay các đoạn macro script nào để chứng minh tính khả thi của các phương trình.

Lời cảm ơn: Bài báo được tài trợ bởi Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, mã đề tài: **24.1.58**

Tài liệu tham khảo

1. H. S. Giao, Đ. T. Thắng, L. V. Quyền và H. T. Chung, *Nổ hóa học lý thuyết và thực tiễn*. Nxb Khoa học tự nhiên và Công nghệ, 2010.
2. Đ. T. Thắng, B. X. Nam và T. Q. Hiếu, *Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình*. Nxb Khoa học tự nhiên và Công nghệ, 2015.
3. И. Ф. Оксанич и П. С. Миронов, *Закономерности дробления горных пород взрывом и прогнозирование гранулометрического состава*. Недра, Москва, 1982.

4. J. A. Sanchidrián, P. Segarra, and L. M. López, "Energy components in rock blasting", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, Iss. 1, pp. 130-147, 2007. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.05.002
5. A. M. Osorio, J. M. Menéndez-Aguado, O. Bustamante, and G. M. Restrepo, "Fine grinding size distribution analysis using the Swebrec function", *Powder Technology*, Vol. 258, pp. 206-208, 2014. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.03.036
6. J. A. Sanchidrián, F. Ouchterlony, P. Segarra, and P. Moser, "Size distribution functions for rock fragments", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 71, 381-394, 2014. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.08.007
7. V. Akinbinu, G. Oniyide, and M. Idris, "Assessment of rock fragmentation and strength properties using the Rosin-Rammler and extended Swebrec distribution functions parameters", *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, Vol. 56, Iss. 1, pp. 53-60, 2022. DOI: 10.22059/ijmge.2021.281746.594811
8. V. T. Hiếu và Đ. T. Thắng, "Đánh giá ảnh hưởng của mặt thoáng đến mức độ đập vỡ đất đá trong đường hầm từ kết quả thí nghiệm trên mô hình nổ điện", *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, Số 49, tr. 59-64, 2015.
9. L. V. Quyển và L. T. Hải, "Nghiên cứu, xác định mức độ đập vỡ đất đá hợp lý bằng nổ mìn cho điều kiện thực tế của mỏ than Đèo Nai", *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, Tập 58, Kỳ 5, tr. 424-430, 2017.
10. Đ. T. Thắng, N. T. Tá và V. X. Bảng, "Nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng lượng nổ đến mức độ đập vỡ đất đá bằng phương pháp thực nghiệm", *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật*, Vol. 13, No. 04, tr. 113-121, 2018.
11. D. T. Thang, T. V. Doanh, T. D. Viet, and T. D. Tho, "Study on the reasonable parameters of the cylinder shaped charge with tapered liner funnel to destroy stone", *ISRM International Symposium on Rock Mechanics and Engineering for Sustainable Energy*, Hanoi, Vietnam, 2019. ISRM-VCRES-2019-010
12. D. T. Thang, B. X. Nam, N. T. Ta, and T. D. Tho, "Study on the reasonable parameters of the concentric hemisphere-style shaped charge for destroying rock", *International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*, Hanoi, Vietnam, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-60839-2_3
13. Д. Ч. Тханг, В. А. Белин, и Ч. В. Зоань, "Исследования действия кумулятивных зарядов с выемкой полусферической эксцентрической формы для разрушения горных пород", *Журнал Устойчивое развитие горных территорий*, Т.13, №2, с. 281-291, 2021. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-281-291
14. D. T. Thang, N. T. Ta, V. X. Bang, and V. T. Hieu, "Studying the rule of distribution of rock breaking size according to the distance from the center of concentrated charge", *ISRM International Symposium on Rock Mechanics and Engineering for Sustainable Energy*, Hanoi, Vietnam, 2019. ISRM-VCRES-2019-029
15. V. M. Kuznetsov, "The mean diameter of the Fragments formed by blasting rock", *Soviet Mining Science*, Vol. 9, pp. 144-148, 1973. DOI: 10.1007/BF02506177
16. V. X. Bảng và Đ. T. Thắng, "Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của chỉ tiêu thuốc nổ đến quy luật đập vỡ đất đá khi nổ lượng nổ tập trung", *Tạp chí Công nghiệp mỏ*, Số 3, tr. 24-28, 2019.
17. F. Ouchterlony and J. A. Sanchidrián, "A review of development of better prediction equations for blast fragmentation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 11, Iss. 5, pp. 1094-1109, 2019. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.03.001

Predicting rock fragmentation based on the function form of particle size distribution Gate-Gaudin-Schumann, Rosin-Rammler and Swebrec

Abstract: *Rock fragmentation is a parameter representing the quality of an explosion. Today, rock fragmentation is mainly determined by sieve analysis to obtain the mean particle size. However, sieve sizes with fairly wide gaps not being able to cover all the particle size range is a limitation of this method. Hence, this paper provides a solution directly determining rock fragmentation and the mean particle size D_{tb} of a muck pile after blasting, based on well-known particle size distribution functions such as Rosin-Rammler (RR), Gate-Gaudin-Schumann (GGS) and Swebrec. The final results of this paper can be used to quickly evaluate the quality of an explosion as a basis for optimizing blasting parameters. Compared to other machine-learning-based methods, the methodology in this paper can be reused to establish exact regression functions when predefined.*

Keywords: Rock fragmentation, mean particle size, particle size distribution function, Rosin-Rammler (RR), Gate-Gaudin-Schumann (GGS), Swebrec.

❑

Environmentally friendly concrete: An overview and application development in Viet Nam

Dang Thi Thu Hien[1], Nguyen Thi Bach Duong[2], Pham Thanh Hai[3]

[1]*Institute of techniques for special engineering, Le Quy Don Technical University*

[2]*University of Transport and Communications*

[3]*Thuyloi University*

Email: thuhien118v2@lqdtu.edu.vn, Tel: 0984.515.768

Abstract

Vietnam has a coastline of over 3,260 km with more than 3,000 large and small islands. The sea plays a pivotal role in the pattern of economic development and people's lives. There are 28 out of 64 provinces and cities with coastlines, and nearly half of the population lives in coastal provinces and cities. To date, the coastal infrastructure has been designed with limited consideration of the environment. Concrete is the primary material and plays a vital role in construction projects. Over 70% of coastal infrastructure is made of concrete, but it harms underwater ecosystems, is vulnerable to climate change-related degradation, and contributes significantly to carbon emissions. Concrete and reinforced concrete structures occupy and destroy the natural environment of most marine species living near the shore, potentially damaging the ecosystems of marine life for a long time. A measure to enhance biodiversity, promote green development, and guarantee environmental sustainability is the use of Green Concrete, Eco-friendly Concrete, and Environmentally Active Concrete. These are types of concrete that are gaining attention in the construction of coastal, offshore, and island projects. The article reviews studies on this issue worldwide and in Vietnam, from technological advancements, and research methods, to experiences in evaluating and developing its applications.

Keywords: *Green concrete, active environmental concrete, eco-friendly concrete, sustainable development, ecosystem restoration, pollution reduction*.

1. Introduction

Coastal concrete structures can provide numerous benefits, including coastal protection, transportation support, and economic development. However, if not designed and managed properly, they can also have significant negative impacts on the marine environment such as the degradation of marine ecosystems. The construction of concrete, such as sea dikes, ports, and docks can destroy natural ecosystems like coral reefs, seagrass beds, and wetlands. This desstruction reduces biodiversity, causing marine species to lose their shelter and food sources, which can lead to the decline or extinction of certain species. Additionally, concrete absorbs heat from the sun, raising local temperatures in the construction area and affecting water temperature and the surrounding ecosystem. Concrete structures often impede the coastlines' natural restoration processes, leading to the degradation of coastal protection offered by ecosystems such as mangrove forests and coral reefs. Therefore, the design and construction processes should incorporate mitigation measures, including the use of eco-friendly concrete, green concrete, and environmentally active concrete as alternatives to traditional concrete. This innovative concrete is engineered not only to meet mechanical requirements but also to fulfill environmental functions, reduce carbon emissions, filter air,

and enhance sustainability. It signifies a significant advancement in the integration of material technology with environmental solutions aimed at promoting sustainable construction.

2. Environmentally friendly concrete

2.1 The construction and operation of marine structures impact the environment

Marine structures such as sea dikes, docks, bridges, and ports significantly contribute to the socioeconomic development of coastal regions. These constructions, including sea walls and breakwaters, play a crucial role in protecting human life. However, since most marine species inhabit areas near the coastline, these artificial structures can adversely affect the surrounding ecosystems. Approximately 70% of coastal structures worldwide are constructed from concrete, which can leach chemicals that increase the alkalinity of the surrounding water, making it challenging for certain marine species to survive until the pH level returns to neutral. Furthermore, the smooth and flat surfaces of these structures hinder the attachment of marine organisms such as algae, oysters, and long-tailed parrots [10]. The negative environmental impacts of coastal structures [1] include:

Impact on Mangrove Ecosystems: The construction process significantly reduces the area of mangrove forests, which serve as habitats for numerous species, including birds, mammals, reptiles, bottom-dwelling animals, barnacles, and seaweed. This reduction leads to a loss of biodiversity, as species are at risk of direct destruction or displacement to other areas.

Destruction of Coral Ecosystems: The coral ecosystem in the port construction area is significantly impacted by the extensive rock blasting and dredging activities associated with infrastructure development.

The impact on the aquatic environment: Rock blasting, dredging, and channel formation disrupt the seabed, significantly increasing water turbidity and the concentration of environmental pollutants.

Destruction of Natural Landscapes: Mangrove forests are unique and visually appealing ecosystems characterized by high species diversity. The destruction of these forests will result in the loss of natural landscapes, ultimately diminishing the potential for coastal tourism.

Pollution of Water and Soil: The water and soil environments are at risk of contamination due to construction activities.

In light of the negative impacts on marine environments, the use of environmentally friendly concrete is regarded as a groundbreaking solution for constructing structures in these areas. This type of concrete not only satisfies strength and load-bearing requirements but also contributes to the protection of the marine ecosystem, endures harsh conditions, and prolongs the service life of the structure. By incorporating additives and sustainable materials, this concrete minimizes corrosion caused by chloride ions and seawater. Its self-healing properties and high durability significantly reduce repair and maintenance costs for marine structures. Additionally, some types of environmentally friendly concrete are specifically designed to create surfaces conducive to the growth of marine organisms, such as algae, coral, and bottom-

dwelling animals. The ability to withstand extreme conditions, including strong winds, powerful waves, and temperature fluctuations, further enhances the longevity of these structures.

2.2 Applications of environmentally friendly concrete

Environmentally friendly concrete has been tested and implemented in marine structures worldwide, yielding positive results, particularly in restoring marine ecosystems, reducing carbon emissions, and extending the service life of these structures.

Marine Ecosystem Restoration: Utilizing Concrete to Restore Degraded Natural Coral Reefs. The concrete surfaces are infused with minerals that promote coral attachment and growth. After one year, coral attachment rates reached 65%, significantly higher than those of conventional materials, which range from 30% to 40%. Concurrently, marine life, including fish and crustaceans, appeared in greater numbers. Experimental results from *the Okinawa Artificial Coral Reef in Japan* confirmed the concrete's effectiveness in enhancing marine ecosystems and supporting the restoration of natural environments.

Carbon Emission Reduction: Utilizing Concrete that Absorbs CO_2 During Natural Carbonation. This innovative concrete absorbs approximately 30 kg of CO_2 per cubic meter each year, which is equivalent to 15-20% of the CO_2 emissions produced by traditional concrete. The durability of this concrete remains unaffected by the carbonation process, and it plays a significant role in reducing greenhouse gas emissions. Notably, *the Port of Rotterdam in the Netherlands and offshore wind farms in the North Sea* have successfully implemented this concrete for their pile foundation structures.

Increased Service Life of Structures: Utilizing concrete that resists steel corrosion and possesses self-healing properties can significantly extend the service life of breakwaters. Structures constructed with this innovative concrete, such as the Breakwater at *Tokyo Bay, Japan, and Sydney's Pier in Australia*, demonstrate remarkable resistance to chloride ion attacks from seawater, thereby minimizing steel corrosion. After five years, minor cracks are automatically repaired through self-healing technology, which is enhanced by the use of bacteria or specialized additives. This advanced concrete can increase the service life of structures by approximately 20 to 30 years compared to conventional materials and reduce maintenance costs by 35% due to its crack resistance and self-healing capabilities.

Results from the testing and application of environmentally friendly concrete in marine structures worldwide are summarized in Table 1.

Table 1. Applications of environmentally friendly concrete

Effect	Experimental results
Marine Ecosystem Restoration	- Promotes coral growth and marine life, increasing by 50-65%.
	- Enhances biodiversity in artificial marine environments.
Carbon Emission Reduction	- Absorbs 15-30% of the emitted CO_2 throughout its lifecycle.
	- Reduces overall emissions in construction and operation by 20-25%.
Enhanced Durability of Structures	- The service life is extended by 20-30 years due to self-healing properties and corrosion resistance.
	- Reduces maintenance costs by as much as 35%.

Environmentally friendly concrete is an excellent solution for marine projects. It not only enhances durability and reduces maintenance costs but also aids in restoring marine ecosystems and minimizing CO_2 emissions, thereby satisfying sustainability goals and protecting the environment.

In Vietnam, various types of environmentally friendly concrete are currently being researched and implemented in marine projects to satisfy sustainable development and promote environmental protection. These types of concrete not only enhance durability in marine environments but also offer ecological benefits and reduce emissions. Some common types of environmentally friendly concrete [11,12,13,14] include:

Photocatalytic Concrete: This type of concrete contains photocatalytic substances, such as titanium dioxide (TiO_2), which enable it to react with sunlight to break down pollutants like nitrogen oxides (NOx) and sulfur oxides (SOx). Photocatalytic concrete is utilized in coastal structures, such as *the Can Gio seawall in Ho Chi Minh City*, as well as in infrastructure projects *in Phu Quoc and Vung Tau*. It effectively cleans the surface of these structures, reduces air pollution in coastal areas, and enhances the overall environmental quality of the surrounding region.

Carbon-Sequestering Concrete: This type of concrete is produced by absorbing CO_2 during the manufacturing process or by incorporating additives that allow the concrete to continue absorbing CO_2 throughout its lifecycle. It is currently being utilized in trial projects at major ports such as *Cai Mep - Thi Vai and Ba Ria - Vung Tau*, as well as in foundation structures for offshore wind energy projects in *Binh Thuan*. Carbon-sequestering concrete not only reduces greenhouse gas emissions during construction and operation but also enhances corrosion resistance and extends the service life of structures.

Ecological Concrete: This type of concrete incorporates additives or minerals that encourage the growth of marine life, including coral, seaweed, and invertebrates. It has been utilized in the construction of artificial coral reefs *in Nha Trang Bay, Khanh Hoa, and in marine conservation areas in Con Dao and Phu Quoc*. Ecological concrete plays a vital role in restoring marine ecosystems, enhancing biodiversity, and supporting the recovery of coral reefs that have been damaged by climate change.

Self-Healing Concrete: This innovative type of concrete incorporates bacteria or specialized additives that enable it to autonomously repair minor cracks on its surface. It is particularly beneficial for coastal structures that demand high durability, such as *the Cua Dai Bridge in Quang Nam and the breakwaters at Ha Long Bay*. Self-healing concrete not only helps to lower maintenance costs in challenging marine environments but also extends the lifespan of structures and minimizes the risk of seawater infiltration.

Ultra High-Performance Concrete (UHPC) is a specialized type of concrete engineered for exceptional strength, superior density, and excellent resistance to chemical and mechanical corrosion. This advanced material is utilized in the construction of foundations for offshore wind turbines and large docks, such as those in *the La Gan offshore wind project in Binh Thuan, as well as the Hai Phong and Dung Quat ports*. UHPC can endure substantial pressure and harsh marine conditions, enhancing economic efficiency while minimizing environmental impact.

Geopolymer Concrete: This type of concrete does not utilize Portland cement; instead, it replaces it with recycled materials such as fly ash and blast-furnace slag. This substitution significantly reduces CO_2 emissions. Geopolymer concrete has been employed in pilot projects along the central and southern coasts of Vietnam, including *the Quy Nhon port in Binh Dinh and the Phan Rang seawall in Ninh Thuan*. It not only helps lower CO_2 emissions during production but also exhibits excellent corrosion resistance, making it particularly suitable for marine environments.

Environmentally Active Concrete (EAC) is an advanced type of concrete researched and developed by scientists at Tokushima University, Japan, in the early 2000s. The unique feature of this concrete is the addition of a small amount of biological additives (amino acids), which enhance its environmental properties. EAC has the ability to reduce CO_2 emissions, promote biodiversity, and support ecosystem restoration. Thanks to these characteristics, this type of concrete not only serves as a construction material but also contributes to environmental protection, aligning with the sustainable development trends in the modern construction industry.

Table 2. Summary of Environmentally Friendly Concrete Types in Vietnam

No.	Environmentally Friendly Concrete Types	Typical Applications	Main Benefits
1	Photocatalytic Concrete	Can gio Seawall, Phu Quoc Coastal Projects	Reduces air pollution and cleans surfaces
2	Carbon-Sequestering Concrete	Cai Mep – Thi Vai Port and Offshore Wind Projects in Binh Thuan	Reduces CO_2 emissions and extends service life
3	Ecological Concrete	Artificial Coral Reefs in Nha Trang and Con Dao	Restores marine ecosystems and supports biodiversity
4	Self-Healing Concrete	Cua Dai Bridge and breakwaters of Ha Long Bay	Reduces maintenance costs and extends service life
5	Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)	La Gan Wind Turbines, Hai Phong and Dung Quat Ports	High durability; designed to withstand harsh conditions.
6	Geopolymer Concrete	Phan Rang Seawall, Quy Nhon Port	Reduces CO_2 emissions and offer exellent corrosion resistance.
7	Environmentally Active Concrete (EAC)	It has not been applied in Vietnam yet	Reduces CO_2 emissions, promotes biodiversity, and supports ecosystem restoration

In Vietnam, environmentally friendly types of concrete have demonstrated significant potential in the construction of marine structures. They contribute to environmental protection, promote sustainable development, and enhance economic efficiency. These applications have shown that this type of concrete is not merely a trend but an essential solution for the future of coastal construction. An environmentally friendly concrete variant, which promotes the growth of aquatic organisms and aids in restoring and preserving aquatic ecosystems while maintaining the

strength and durability of structures has been researched and applied in coastal and riverine projects in many countries worldwide. This type of concrete is also suitable for marine structures, ensuring green and sustainable development, particularly in areas that require conservation and those with cultural and historical significance.

3. Proposal for using L-Arginine concrete to regenerate Vietnam's marine ecosystem

3.1. Applications of L-Arginine concrete in Japan [5,9]

In Japan, authors Sato et al. (2011) and Nishimura et al. (2014) developed a type of concrete known as "Environmentally Active Concrete" (EAC) by incorporating L-Arginine into fresh concrete during the mixing process. This compound dissolves completely within the concrete, helping to minimize the unintended environmental impact of concrete structures on the natural ecosystem. L-Arginine gradually permeates from the hardened concrete surface into the surrounding water without compromising the concrete's strength. Simultaneously, it stimulates the growth of microalgae on the concrete surface, which absorb CO_2 through photosynthesis and enhance the food chain for aquatic organisms. Abalone, mother-of-pearl shellfish, sea cucumbers, and other marine life feed on microalgae and seaweed in their environments. This indicates that a new food chain is established as a result of using this type of concrete. Amino acids, the building blocks of proteins, are essential nutrients for both microorganisms and larger organisms. This innovative concrete facilitates the coexistence of natural life forms and concrete structures. One of the remarkable features of EAC concrete utilizing L-Arginine in Japan is its ability to not only ensure the structural integrity of concrete but also restore marine ecosystems, reduce CO_2 emissions, and extend the service life of structures. The results of field experiments with EAC concrete using L-Arginine in Japan include:

EAC helps damaged coral reefs thrive. The base blocks made from EAC enhance the survival rate of broken coral branches during the re-rooting process.

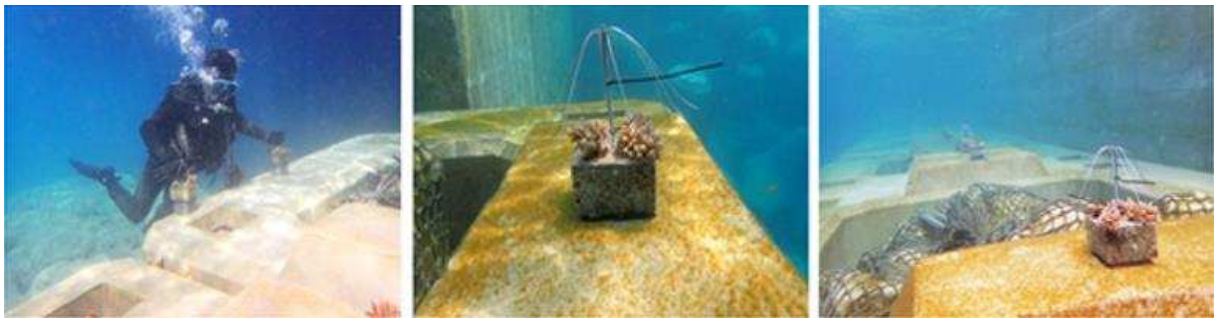


Figure 1. Image of EAC concrete reattaching broken coral branches [9]

The application of EAC using L-Arginine for wave-dissipating blocks at Breaker No. 6, Wajima Port, Japan, demonstrates that EAC concrete has fostered the growth of algae and established a habitat for various organisms on its surface in the breakwater area.

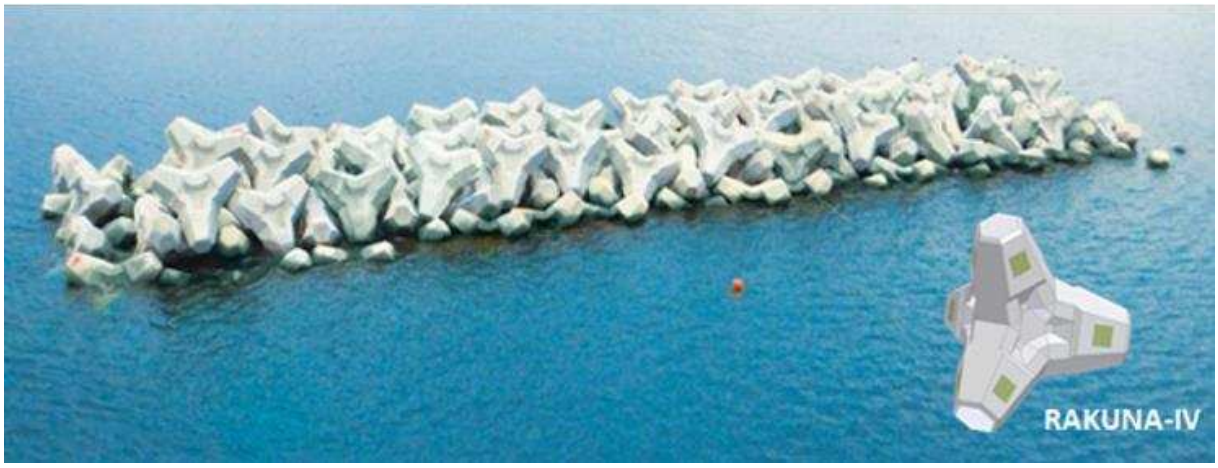


Figure 2. Image depicting the attachment of EAC concrete slabs or plates to wave-dissipating blocks at Wajima Port [9]

The selected amino acid, L-Arginine, promotes the growth of microalgae on concrete surfaces [5,6], as illustrated in Figure 3.

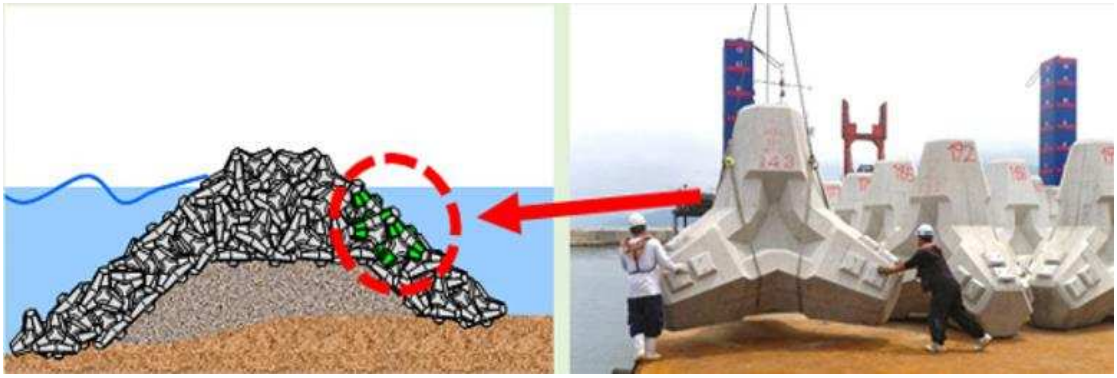


Figure 3. An image depicting concrete blocks that create feeding areas and habitats for marine organisms.

The surface of the concrete blocks exhibits a color variation, with blocks containing a higher amino acid content showing increased algae growth (Figure 4.a). The chlorophyll content in EAC blocks is 2 to 5 times greater, and the growth rate of microalgae on the surface of EAC blocks is 5 to 10 times faster compared to conventional concrete (Figure 4.b).

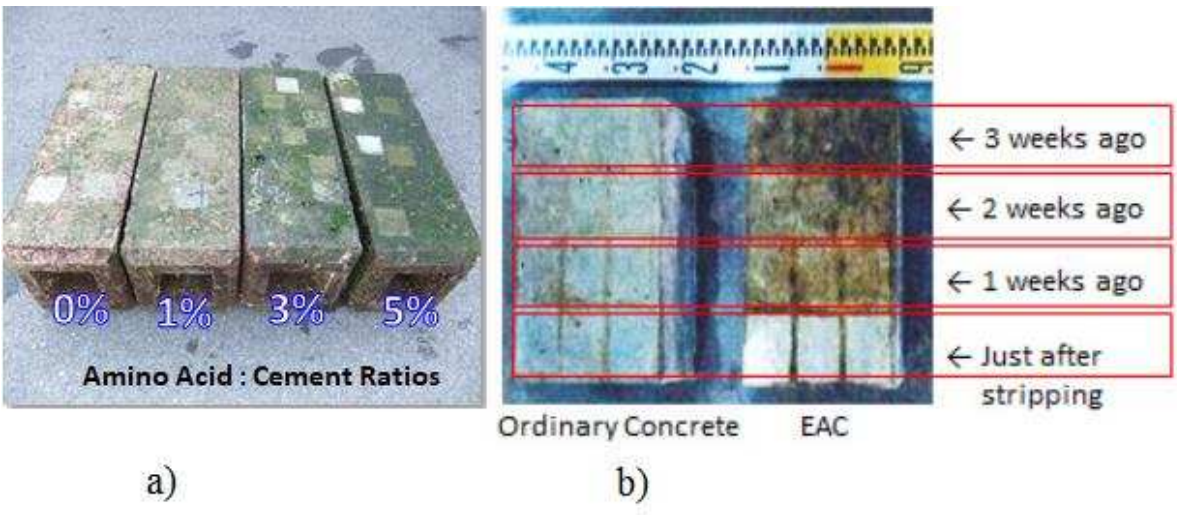


Figure 4. The growth rate of microalgae on the surface of EAC concrete [9]

The compressive strength, flexural tensile strength, and flexural strength of the concrete meet the design specifications. The abrasion resistance and frost damage resistance remain intact, while the corrosion protection effectiveness for the reinforcement has improved, as illustrated in Figure 5.

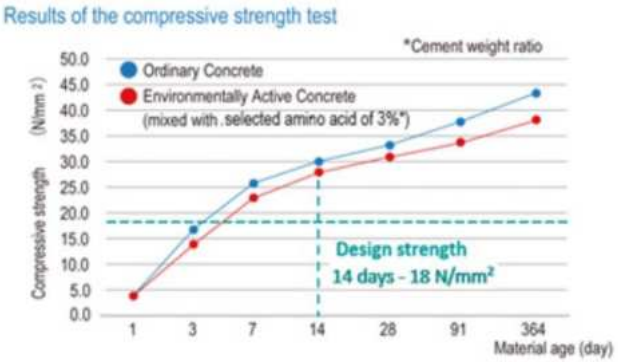


Figure 5. Compressive strength test results of concrete samples [9]

Thus, EAC concrete incorporating L-Arginine can be utilized in the construction of marine structures, ensuring compressive strength, flexural tensile strength, and flexural strength. This approach not only enhances structural integrity but also contributes to the restoration of marine ecosystems, reduces CO_2 emissions, and extends the service life of the structures.

3.2. Proposal for testing EAC concrete with L-Arginine in Vietnam

Environmentally active concrete (EAC) is an innovative construction material with significant potential for use in Vietnam's marine structures, including protective seawalls, bridges, ports, offshore wind farms, and underground facilities. This type of concrete not only ensures the structural integrity of constructions but also aids in the restoration of marine ecosystems, reduces CO_2 emissions, and extends the service life of infrastructure. With over 3,260 kilometers of coastline, numerous islands, and coastal economic zones, the implementation of EAC concrete not only enhances economic efficiency but also plays a vital role in marine environmental protection and sustainable development.

In this study, we propose testing high-quality C60 environmentally active concrete using L-Arginine from Nikken Kogaku, Japan, as a pilot project for the coastal and island regions of Khánh Hòa province. The high-performance concrete C60-5SF (a high-quality concrete containing 5% silica fume) with L-Arginine has been verified to ensure durability and service life for coastal and offshore structures [2,4]. The materials used for the experimental samples are sourced from quarries in Central Vietnam, satisfying the requirements for HPC C60 production [4]. The properties of the L-Arginine additive are presented in Table 3

Table 3. Properties of the L-Arginine Additive [7]

Component	**Properties**
Chemical Formula	$C_6H_{14}N_4O_2$
Molecular Weight	174.20 g/mol

Component	Properties
Appearance	White crystalline solid
Melting Point	244°C
PH Level	10,5-12,0 (1g in 20ml H_2 O)
Solubility in Water	14,8 g/100 g H_20 (20°C)

The experimental concrete samples are cylindrical, measuring Ø150 mm × 300 mm, and incorporate various L-Arginine admixture ratios (0%, 1%, 3%, 5%, and 7% by cement weight). The detailed material composition is presented in Table 4.

Table 4. Composition of High-Performance Environmentally Active Concrete C60 Samples [7]

N/CKD	L- Arg (%)	Component							Mix ID
		Silica fume (kg)	Superplasticizer (lit)	Water (lit)	Cement (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	L- Arg (kg)	
0,3	0	24,52	5,88	145	466	760	1060	0	C60-SF-SR-0A
	1							4,66	C60-SF-SR-1A
	3							13,98	C60-SF-SR-3A
	5							23,3	C60-SF-SR-5A
	7							32,62	C60-SF-SR-7A

The experiments conducted with C60-SF-SR concrete samples under local conditions in Vietnam are essential for assessing their feasibility in real-world applications. This study will evaluate the compressive strength, flexural tensile strength, and durability of EAC concrete incorporating L-Arginine, specifically under Vietnam's climatic and environmental conditions. Additionally, it will assess the concrete's resistance to abrasion and corrosion in marine environments, as well as analyze its potential to support marine ecosystem regeneration. Finally, the performance of EAC concrete will be compared with that of conventional marine-grade concrete.

Coastal infrastructure testing sites are located at port facilities, bridges, seawalls, and other structures in areas such as Hải Phòng, Quảng Ninh, Khánh Hòa, and Vũng Tàu. Additionally, controlled testing is conducted under laboratory conditions at research and oceanographic institutes

4. Conclusion

Environmentally active concrete (EAC) that incorporates L-Arginine is an innovative solution that not only meets construction requirements but also positively impacts marine ecosystem restoration. This material ensures durability and structural strength while actively

safeguarding the marine environment, promoting ecosystem regeneration, and enhancing resistance to harsh conditions. Ultimately, it extends the service life of marine structures.

Amino acids in concrete not only enhance bonding capacity and guarantee material strength, but they also create favorable conditions for the growth of microorganisms, algae, and corals on the concrete surface. This promotes underwater biodiversity and helps restore marine ecosystems that have been damaged by human activities and the impacts of climate change.

At the same time, the use of L-Arginine helps minimize negative environmental impacts during the production and application of concrete by facilitating CO_2 absorption from the atmosphere through marine organisms that grow on the concrete surface. As a result, it reduces damage to coastal structures and supports the protection of residential areas against rising sea levels. This makes it highly effective for applications such as seawalls, breakwaters, and structures designed to protect coastal ecosystems.

Environmentally Active Concrete (EAC) is not only an advanced building material but also an effective solution for addressing the significant challenges posed by climate change. This innovation marks a substantial advancement in the construction of sustainable marine structures while contributing to the conservation and restoration of marine ecosystems in Vietnam.

Proposal for Testing C60-Grade EAC in the Coastal and Island Areas of Khanh Hoa Province.

References

[1] Ha Xuan Chuan (2009). *Environmental impacts during the construction and exploitati of seaport projects*. Journal of Marine Science and Technology (17,4/2009).

[2] Prof. Pham Duy Huu and collaborators (2008). *High-strength and high-performance concrete*. Construction Publishing House.

[3] Lan Anh (2021). *Environmentally friendly concrete for protecting marine ecosystems. Electronic Environmental Economics Magazine*, October 28, 2021.

[4] Dang Thi Thu Hien (2024). *Study on the durability of high-performance concrete in offshore areas of Khanh Hoa Province*. Ph.D. thesis. University of Transport.

[5] Hirokazu Nishimura, Ryoichi Yamanaka, Kazuhiro Sato, Chizuru Tara, Takashi Nakanishi, and Yasunori Kozuki (2014). *Material properties of environmentally active concrete containing amino acids in aquatic environments*. PIANC World Conference, San Francisco, USA.

[6] Naozumi Yoshizuka and collaborators (2023). *Application of Environmental Activity Concrete (EAC) for river works*. PIANC 2022, LNCE 264, pp. 1041–1051. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6138-0_92.

[7] Nguyen Thi Bach Duong and collaborators (2024). *Research on the effect of L-Arginine additive on the compressive strength of high-performance environmentally friendly concrete*. ICSCE 2024 International Conference.

[8] Safety data sheet, version 10. Ajinomoto Co. Inc., January 21, 2019. *https://ajiaminoscience.eu/aminoacid/wp-content/uploads/application/pdf/MSDS_L-Arginine.pdf.*

[9] Nikken Kogaku co.,ltd. *Amino acid energizes rivers and sea all over the work - Environmentally Active concrete (EAC).* https://www.nikken-kogaku.co.jp/English/Product/product301.php

[10] Yuanchen Wei (2023). Recent advances in photocatalytic self-cleaning performances of TiO2-based building materials. PMC Pubmed Central.

[11] Amit Kenny, Ela Ofer Rozovsky.Six-Year-Old *Ecological Concrete in a Marine Environment: A Case Study*. https://www.mdpi.com/2071-1050/15/18/13780, sustainability 15 September 2023.

[12] Peiyuan Zhuang, Xinjun Yan, Xuehu Wang, Jiaqi Liu. *Study on the Performance Optimization of Plant-Growing Ecological Concrete*. https://www.mdpi.com/2071-1050/16/11/4575, sustainability, 28 May 2024.

[13] Pritam Das, Prof. Dr. Biman Mkkherjee. *A review on self headling concrete using microbial agent*. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. Volume:06/Issue:01/Jauuary-2024.

[14] Manvedra Vermar, Nirendra Dev, Ibadur Rahman, Mayank Nigam, Mohde Ahmed , Javed Mallick. *Geopolymer Concrete: A Material for Sustainable Development in Indian Construction Industries*. https://www.mdpi.com/2073-4352/12/4/514,7 April 2022.

Nghiên cứu tổng quan về bê tông thân thiện với môi trường và việc phát triển ứng dụng tại việt nam

Tóm tắt: *Việt Nam có đường bờ biển dài trên 3.260Km với hơn 3.000 hòn đảo lớn nhỏ. Biển đóng vai trò quan trọng trong đời sống của cư dân và phát triển kinh tế. Có 28/64 tỉnh, thành phố có biển và gần một nửa dân số sinh sống tại các tỉnh, thành ven biển. Cho đến nay, cơ sở hạ tầng ven biển và biển được thiết kế với sự quan tâm đến môi trường còn hạn chế. Bê tông là vật liệu chính và đóng vai trò quan trọng trong xây dựng công trình. Hơn 70% cơ sở hạ tầng biển là bê tông, nhưng bê tông được biết là gây hại cho hệ sinh thái dưới nước, dễ bị thoái hóa do biến đổi khí hậu và có lượng khí thải carbon lớn. Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép chiếm và phá hủy môi trường tự nhiên của hầu hết các loài sinh vật biển sống gần bờ cũng như có thể phá hỏng hệ sinh thái của những sinh vật biển trong một thời gian dài. Một biện pháp nhằm tăng cường đa dạng sinh học, phát triển xanh và bền vững với môi trường - Bê tông xanh, Bê tông thân thiện với môi trường. Bê tông hoạt tính với môi trường ra đời đang là mối quan tâm lớn, rất cần thiết và ở quy mô lớn để đáp ứng nhu cầu của các cảng, các công trình ven biển, trên biển và hải đảo. Bài báo tổng quan các nghiên cứu trên thế giới và Việt Nam về bê tông thân thiện với môi trường, những tiến bộ công nghệ, phương pháp nghiên cứu cũng như những kinh nghiệm đánh giá và phát triển ứng dụng của nó.*

Từ khóa: Bê tông xanh, bê tông hoạt tính môi trường, bê tông thân thiện với môi trường, phát triển bền vững, phục hồi hệ sinh thái, giảm thiểu ô nhiễm.

Nghiên cứu tương quan giữa hệ số nền tĩnh và hệ số nền động của mặt đường cứng khi thay đổi độ lớn tải trọng bằng thí nghiệm trong phòng

Đỗ Văn Thùy, Nguyễn Văn Hiếu

Học viện Kỹ thuật quân sự

[*]Email: thuydv@lqdtu.edu.vn; Tel: 0974 180 566

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu mối tương quan giữa hệ số nền tĩnh và hệ số nền động của kết cấu mặt đường bê tông xi măng (BTXM) thông qua thí nghiệm trong phòng. Trước hết, bài báo đặt vấn đề về sự khác biệt giữa hai hệ số nền này và tầm quan trọng của việc xác định chính xác chúng trong thiết kế và đánh giá mặt đường BTXM. Để giải quyết vấn đề, nhóm tác giả thực hiện thí nghiệm nén tĩnh bằng hệ thống kích thủy lực nhằm xác định phản ứng nền dưới tác dụng của tải trọng tĩnh, đồng thời sử dụng thiết bị đo độ võng động FWD để thu thập phản ứng nền dưới tác dụng của tải trọng động. Trong cả hai trường hợp, tải trọng được thay đổi để đánh giá sự ảnh hưởng của độ lớn tải trọng đến hệ số nền. Kết quả cho thấy hệ số nền động có giá trị xấp xỉ gấp hai lần hệ số nền tĩnh, góp phần cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc hiệu chỉnh các mô hình thiết kế mặt đường BTXM.

Từ khóa: *Hệ số nền tĩnh; hệ số nền động; tấm bê tông xi măng; mặt đường.*

1. Đặt vấn đề

Mặt đường BTXM là loại kết cấu có độ cứng cao, chịu tải trọng lớn và được ứng dụng rộng rãi trong xây dựng đường giao thông và sân bay. Độ bền và khả năng chịu tải của mặt đường BTXM phụ thuộc đáng kể vào sự tương tác giữa tấm bê tông và nền đường, trong đó hệ số nền đóng vai trò quan trọng trong tính toán thiết kế cũng như đánh giá khả năng khai thác của kết cấu mặt đường [1]. Tuy nhiên, trên thực tế, hệ số nền có sự khác biệt khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng động, điều này ảnh hưởng đến độ chính xác của các mô hình thiết kế và đánh giá mặt đường. Vì vậy, việc nghiên cứu mối quan hệ giữa hệ số nền tĩnh và hệ số nền động là cần thiết để hiểu rõ hơn về ứng xử của mặt đường BTXM dưới các điều kiện tải trọng khác nhau.

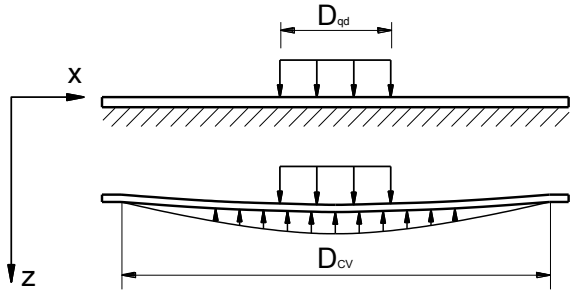
Ứng xử của kết cấu mặt đường BTXM trong các điều kiện tải trọng khác nhau là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng trong công tác đánh giá chất lượng khai thác mặt đường sân bay. Những nghiên cứu này nhằm mục đích tìm hiểu cách mà hệ kết cấu nền, mặt đường phản ứng và biến dạng trong các điều kiện chất và dỡ tải khi độ lớn và tính chất tải trọng thay đổi. Bằng cách nghiên cứu ứng xử này, các kỹ sư có thể dự đoán tốt hơn về tính chất làm việc của kết cấu mặt đường trong các ứng dụng tính toán, thiết kế kết cấu mặt đường BTXM sân bay.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả trình bày ứng xử của kết cấu mặt đường BTXM trong phòng thí nghiệm chịu tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng động thông qua độ võng tĩnh và độ võng động đo được, đồng thời thể hiện qua tham số cường độ nền (hệ số nền) tĩnh và động tính toán được. Bởi vì, trên thực tế, tải trọng động là dạng tải trọng ngắn hạn tác dụng rất nhanh lên mặt đường bao gồm cả xung lực, trong khi đó tải trọng tĩnh là tải trọng dài hạn mang tính chất cố định. Các dạng tải trọng này sẽ gây ra tính biến dạng khác nhau đối với đất nền do vật liệu nền là vật liệu đàn nhớt [2]. Qua đó, chúng ta có thể xem xét về mối quan hệ giữa hệ số nền động và hệ số nền tĩnh nhằm phục vụ công tác tính toán, thiết kế và đánh giá trong quá trình khai thác của kết cấu mặt đường BTXM theo các tiêu chuẩn hiện hành.

Vì vậy, trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày thí nghiệm gia tải tĩnh và động với độ lớn tải trọng thay đổi, nhằm xem xét ứng xử của kết cấu mặt đường BTXM cũng như đưa ra mối tương quan về hệ số nền động và hệ số nền tĩnh bằng thí nghiệm trong phòng.

2. Cơ sở lý thuyết tính toán hệ số nền từ độ võng đo được dưới tác dụng của tải trọng

2.1. Cơ sở lý thuyết tính toán hệ số nền tĩnh



Hình 1. Sơ đồ lực tác dụng lên tấm gây ra độ võng khi nén tĩnh [2]

Xét điều kiện cân bằng của tấm bê tông trong hình 1, khi chịu áp lực tác dụng q, đường kính quy đổi D_{qd}, tấm bị võng và truyền áp lực xuống nền, trong nền xuất hiện các phản lực nền r(x,y) tác dụng lên tấm trong phạm vi chậu võng (đường kính D_{cv}). Chiếu tất các lực tác dụng lên tấm theo phương z, gồm có tải trọng tác dụng và phản lực nền [2]:

$$P=\int r(x,y)ds\,, \tag{1}$$

trong đó: P - Tải trọng tác dụng, kN;

r(x,y) - Phản lực nền tại (x,y), MPa, theo mô hình một hệ số nền: $r(x,y) = C \cdot w(x,y)$;

w(x,y) - Độ võng tấm tại tọa độ x, y được giả thiết bằng độ võng nền, cm;

S - Diện tích hình chiếu bằng của chậu võng, cm^2.

Thay biểu thức r(x,y) vào (2), ta được: $P=\int_s C \cdot w(x,y)ds = C \cdot \int_s w(x,y)ds$.

Mặt khác: $\int_s w(x,y)ds = V$.

Từ đó suy ra hệ số nền tĩnh sẽ bằng:

$$C_t = \frac{P}{V}, (MPa/cm) \tag{2}$$

với V - Thể tích chậu võng tĩnh mặt nền, lấy bằng thể tích chậu võng mặt đường, được xác định từ số liệu thực nghiệm, cm^3.

2.2. Cơ sở lý thuyết tính toán hệ số nền động

Khi chịu tác dụng của tải trọng động, khác hớn so với tải trọng tĩnh đó là ngoài lực đàn hồi và phản lực nền, còn có lực quán tính của tấm và lực cản nhớt của nền tác dụng lên tấm bê tông. Xét cho trường hợp dao động một bậc tự do, phương trình vi phân chuyển động sẽ có dạng [2]:

$$M \cdot \frac{d^2W}{dt^2} + S \cdot \eta \cdot \frac{dW}{dt} + F_{dh} = P_d\,, \tag{3}$$

trong đó: P_d - Tải trọng động tác dụng, kN;

$\frac{d^2W}{dt^2}$ - Gia tốc chuyển động của tấm bê tông cm/s^2;

M - Khối lượng dao động của phần tấm bê tông trong phạm vi chậu võng, kg;

$\frac{dW}{dt}$ - Vận tốc chuyển động của tấm bê tông, cm/s;

S - Diện tích hình chiếu bằng chậu võng mặt đường D_{cv}, cm^2;

η - Hệ số cản nhớt của đất nền (N.s/cm^3);

F_{dh} - Phản lực nền, $F_{dh}=C\cdot V_d$ với V_d là thể tích chậu võng động do tải trọng động gây ra.

Khi đó hệ số nền động được xác định bằng:

$$C_d=\frac{P_d}{V_d}=\frac{P_d-M\cdot\frac{d^2W}{dt^2}-S\cdot\eta\cdot\frac{dW}{dt}}{V_d}. \quad (4)$$

Như vậy, từ kết quả thí nghiệm độ võng dưới tác dụng của các loại tải trọng, ta có thể đo đạc xác định được thể tích chậu võng, từ đó tính toán được hệ số nền tĩnh theo (2) hoặc hệ số nền động theo (4).

2.3. Tính toán hệ số nền thông qua độ võng đo được bằng phương pháp tính ngược AREA - Based

Theo [3-5], sử dụng phương pháp AREA thông qua nghiên cứu thực nghiệm, để xác định sự tương quan giữa hình dạng độ cong mặt võng tấm (thông qua độ võng một số điểm trên chậu võng) với độ cứng mặt đường, thông qua tham số đặc trưng khả năng chống biến dạng tấm bê tông (đặc trưng đàn hồi tấm). Để tiến hành xác định tham số AREA, người ta sử dụng độ võng từ tất cả các đầu đo trên thiết bị gia tải để tính toán chậu võng. Tham số AREA được xác định phụ thuộc số điểm đo độ võng và vị trí đặt các đầu đo trên mặt đường, có sự kết hợp ảnh hưởng của các độ võng trong chậu võng. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng 04 đầu đo đặt tại các vị trí cách tâm tấm một khoảng 0, 30, 60, 90 cm với các độ võng tương ứng là w_0, w_1, w_2 và w_3. Tham số AREA được xác định [3]:

$$AREA=6\cdot(1+2\cdot\frac{w_1}{w_0}+2\cdot\frac{w_2}{w_0}+\frac{w_3}{w_0}).\ \text{(inch)} \quad (5)$$

Xác định đặc trưng đàn hồi tấm bê tông:

$$L=\left[\frac{\ln\left(\frac{A-AREA}{B}\right)}{C}\right]^D,\text{(inch)} \quad (6)$$

trong đó: Các hằng số thực nghiệm A = 36; B = 1812,279; C = - 2,559; D = 4,387.

Khi biết độ võng tại tâm tải trọng, độ lớn tải trọng tác dụng lên mặt đường và đặc trưng đàn hồi, hệ số nền có thể được xác định từ công thức của Westergaad [6]:

$$C=\frac{P}{8\cdot w_0\cdot L^2}\left\{1+\frac{1}{2\pi}\cdot\left[\ln\left(\frac{R}{2\cdot L}\right)-0{,}673\right]\cdot\left(\frac{R}{L}\right)^2\right\}, \quad (7)$$

trong đó: R - Bán kính vệt bánh xe quy đổi, cm, $R=\sqrt{\frac{P}{\pi\cdot q}}$, q là áp lực bánh hơi (MPa) hay được lấy bằng giá trị bán kính tấm ép xuống mặt đường của thiết bị gia tải;

P - Tải trọng tác dụng của thiết bị gia tải tác dụng lên mặt đường, T.

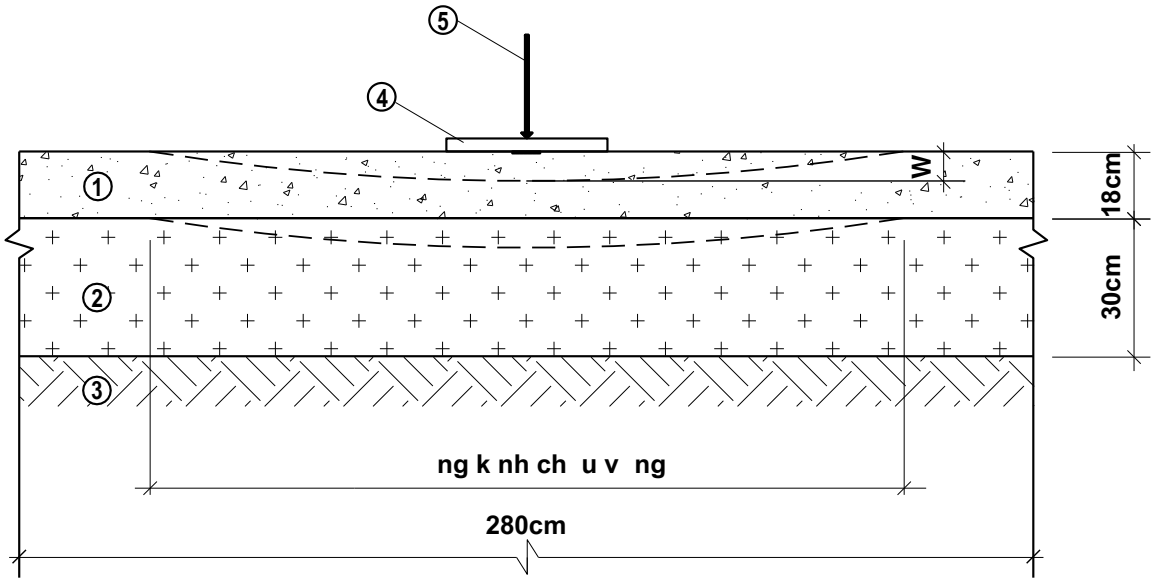
Trong công thức (7), hệ số nền thu được là hệ số nền động nếu sử dụng thiết bị gia tải động gây ra độ võng động, còn thu được hệ số nền tĩnh khi sử dụng thiết bị gia tải tĩnh gây ra độ võng tĩnh. Mối tương quan giữa hệ số nền động và hệ số nền tĩnh sẽ được lượng hóa trong phần tính toán kết quả thí nghiệm.

3. Các phương pháp thí nghiệm

3.1. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm là kết cấu tấm BTM trong Phòng thí nghiệm Cầu đường, sân bay tại Học viện Kỹ thuật quân sự, được mô tả như hình 2:

- Tấm BTXM có kích thước là 280 cm x 280 cm, dày 18 cm;
- Móng là cát vàng đầm chặt có chiều dày 30 cm;
- Lớp nền tự nhiên ở dưới lớp móng cát vàng.



Hình 2. Mô hình kết cấu BTXM trong phòng thí nghiệm

1 - Tấm BTXM dày 18cm; 2 - Lớp móng cát vàng đầm chặt dày 30cm; 3 - Đất nền tự nhiên; 4 - Tấm ép đường kính 33cm; 5 - Tải trọng tác dụng (tĩnh hoặc động); w - Độ võng tấm BTXM

Một số giả thiết trong phạm vi nghiên cứu:

- Chấp nhận các giả thiết về tấm BTXM theo các lý thuyết đã đưa ra.

- Tấm ép trong PTN được coi là tuyệt đối cứng, do đó việc gắn đầu đo tại tấm ép được chấp nhận với giải thiết là độ võng tại tâm tấm.

- Với tải trọng động, nhóm tác giả sử dụng thiết bị FWD trong PTN là tải trọng quả rơi, nên chấp nhận giả thiết áp lực tác dụng lên tấm BTXM là tổng áp lực của 3 đầu đo đo được.

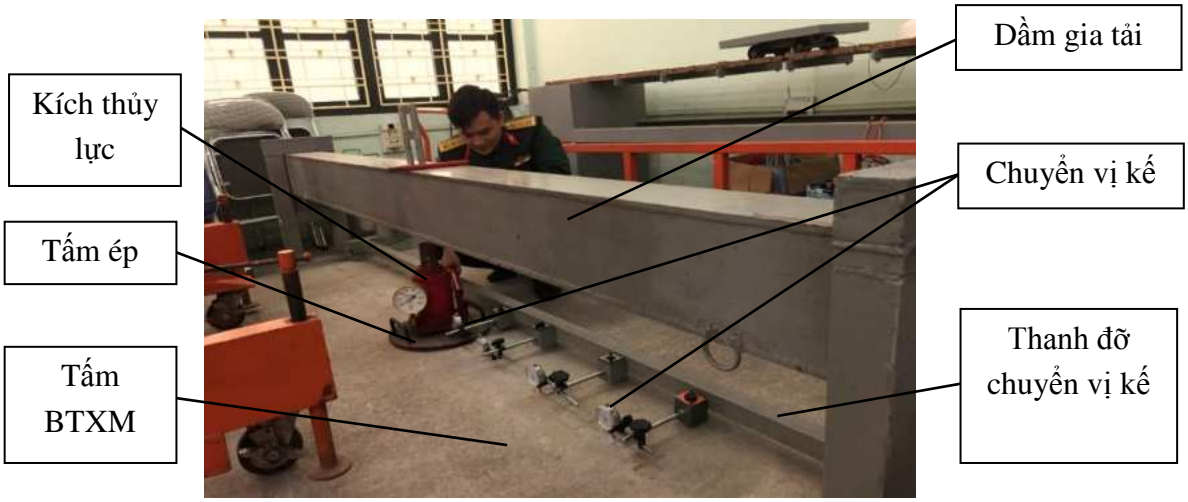
- Tấm BTXM mặt đường tuân theo lý thuyết tấm trên nền đàn hồi, độ võng của tấm sinh ra do tải trọng bao nhiêu sẽ võng bấy nhiêu dưới nền.

- Trong thí nghiệm, tải trọng tác dụng lên tấm BTXM dao động từ 10 kN đến 50 kN để đảm bảo không gây phá hoại mẫu. Tuy nhiên, trong thực tế, tải trọng của một bánh tàu bay

khi tiếp xúc với mặt đường thường cao hơn nhiều. Ví dụ, với tàu bay ATR 72, tải trọng trên mỗi bánh khoảng 112 kN, trong khi với Airbus A320 hoặc Boeing 737-800, tải trọng này có thể đạt 190-200 kN. Dù tải trọng thí nghiệm không đạt đến mức này, phạm vi 10-50 kN vẫn giúp xác định xu hướng ứng xử của nền theo tải trọng. Dữ liệu thu thập từ thí nghiệm có thể được nội suy để đánh giá hệ số nền tương ứng với tải trọng thực tế. Ngoài ra, nếu có dữ liệu đo thực tế từ sân bay, có thể áp dụng hệ số hiệu chỉnh để liên kết kết quả phòng thí nghiệm với điều kiện khai thác.

3.2. Thí nghiệm xác định độ võng tĩnh mặt đường dưới tác dụng của tải trọng tĩnh

Hình 3 trình bày sơ đồ thí nghiệm tĩnh gồm tấm ép, kích thủy lực và dầm gia tải được đặt tại vị trí tâm tấm. Các chuyển vị kế được đặt tại các vị trí cách tâm tấm một khoảng 0, 30, 60, 90 cm thông qua đế từ gắn trên thanh đỡ, thanh đỡ được đặt tại các gối tựa bên ngoài tấm để khi tấm dao động không ảnh hưởng tới kết quả đo.



Hình 3. Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm gia tải tĩnh

Nội dung thí nghiệm tĩnh:

- Đặt tấm ép vào vị trí tâm tấm BTXM đã đánh dấu từ trước. Sau đó đặt kích thủy lực lên trên tấm ép.

- Lắp đặt các chuyển vị kế cách tâm tấm một khoảng 0, 30, 60, 90 cm thông qua đế từ gắn trên thanh đỡ. Trong thí nghiệm này, để xác định độ võng tại tâm, lấy giá trị trung bình của 02 chuyển vị kế đặt trên tấm ép đối xứng cách tâm 12 cm.

- Tiến hành gia tải với các cấp tải trọng từ 2T (20kN) đến 5T (50kN). Xác định độ võng của tấm tại các chuyển vị kế.

3.3. Thí nghiệm xác định độ võng động mặt đường dưới tác dụng của tải trọng động

Hình 4 trình bày sơ đồ thí nghiệm động gồm thiết bị quả rơi (hệ thống quả nặng rơi, lò xo giảm chấn, khung thiết bị và đế tấm ép đường kính 33 cm có ba vị trí để bố trí 03 đầu đo áp lực động), 04 đầu đo độ võng động đặt cách vị trí tâm tấm 0, 30, 60, 90 cm.

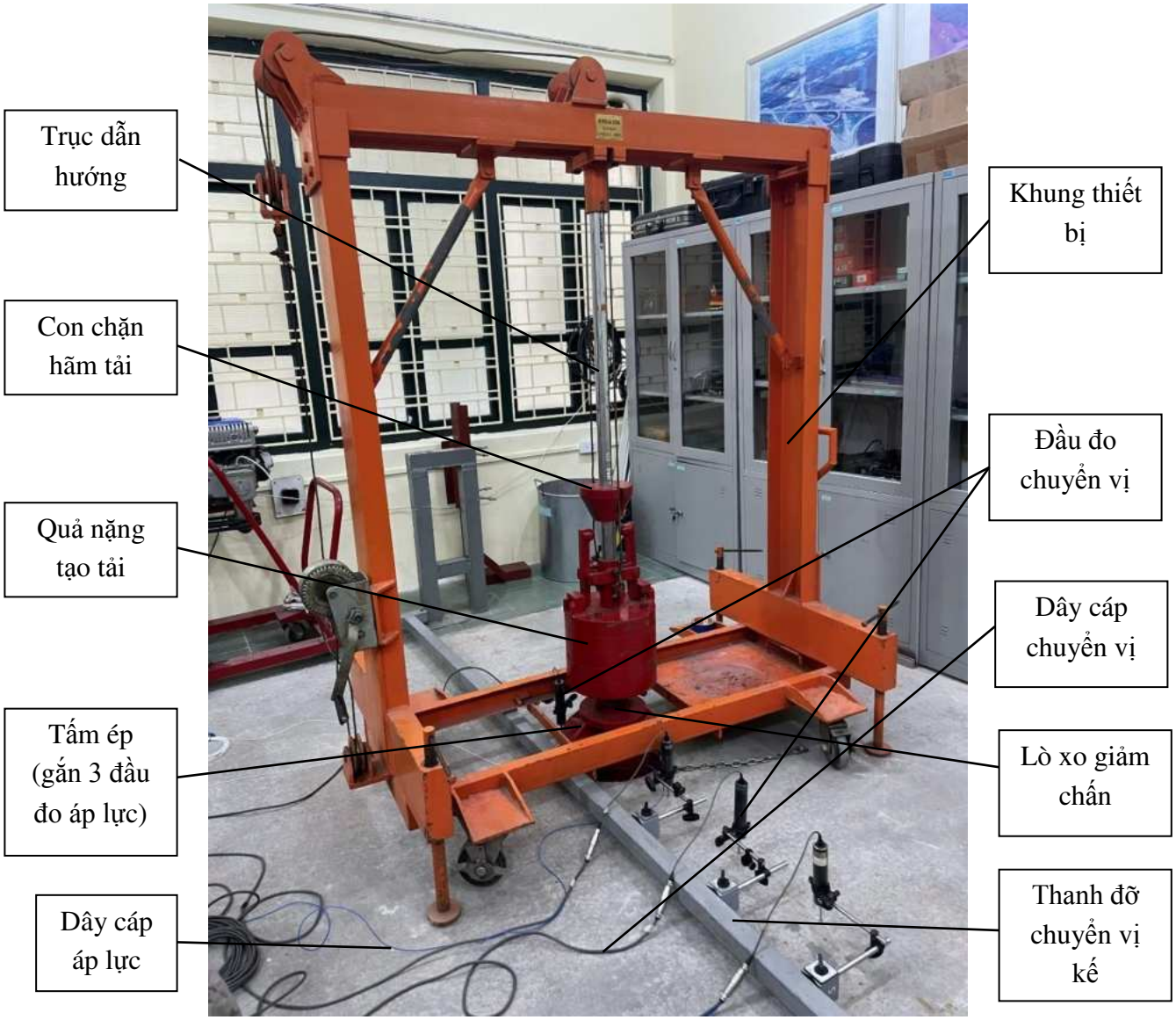
Số liệu thí nghiệm động được thu nhận và phân tích bởi máy đo dao động SXI 1000DC/NATIONAL INSTRUMENT của Hoa Kỳ và được xử lý bằng phần mềm LabVIEW

SignalExpress 3.0 (hình 5).

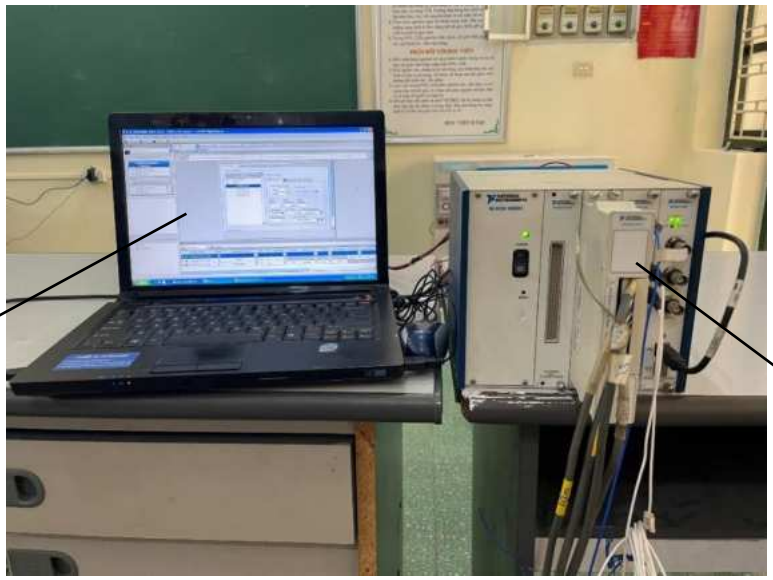
Nội dung thí nghiệm gia tải động:

- Độ lớn của tải trọng động sẽ được thay đổi thông qua chiều cao rơi của khối gia tải. Khi khối gia tải chuyển động trượt qua chốt hãm, toàn bộ khối gia tải sẽ rơi xuống. Tải trọng được truyền qua hệ lò xo giảm chấn để giảm xung động tác dụng lên mặt đường.

- Độ lớn của tải trọng được xác định thông qua 03 đầu đo áp lực động, độ võng động được xác định bởi 04 đầu đo chuyển vị động (độ võng tại tâm tấm do đầu đo đặt trên tấm ép tải trọng). Số liệu đo được ghi lại dưới dạng file .txt bởi phần mềm LabVIEW SignalExpress 3.0 thông qua máy đo dao động.



Hình 4. Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm gia tải động



Hình 5. Thiết bị thu nhận và xử lý số liệu đo

4. Kết quả thí nghiệm

4.1. Kết quả thí nghiệm gia tải tĩnh

Số liệu độ võng tĩnh tại các chuyển vị kế đo được với các cấp tải trọng khác nhau trong thí nghiệm gia tải tĩnh được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Số liệu độ võng tấm BTXM bằng thí nghiệm tĩnh

Tải trọng (kN)	**Lần đo**	**Độ võng tại tấm ép (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 30 cm (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 60 cm (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 90 cm (cm)**
20,00	1	0,0080	0,0080	0,0060	0,0040
	2	0,0080	0,0080	0,0070	0,0050
	3	0,0090	0,0080	0,0080	0,0060
	TB	0,0083	0,0080	0,0070	0,0050
30,00	1	0,0150	0,0140	0,0130	0,0100
	2	0,0160	0,0140	0,0120	0,0090
	3	0,0150	0,0140	0,0120	0,0100
	TB	0,0153	0,0140	0,0123	0,0097
40,00	1	0,0200	0,0180	0,0150	0,0130
	2	0,0190	0,0170	0,0150	0,0130
	3	0,0190	0,0180	0,0160	0,0130
	TB	0,0193	0,0177	0,0153	0,0130
50,00	1	0,0260	0,0230	0,0220	0,0150
	2	0,0260	0,0240	0,0210	0,0160
	3	0,0270	0,0250	0,0200	0,0170
	TB	0,0263	0,0240	0,0210	0,0160

Áp dụng các công thức (5), (6), (7), ta có số liệu tính toán hệ số nền tĩnh như bảng 2.

Bảng 2. Hệ số nền tĩnh tính toán từ độ võng tĩnh đo được

Tải trọng (kN)	**Độ võng tại tấm ép (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 30 cm (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 60 cm (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 90 cm (cm)**	**Tham số AREA (inch)**	**Đặc trưng đàn hồi tĩnh tấm L_t (inch)**	**Hệ số nền tĩnh (MPa/cm)**
20,00	0,0083	0,0080	0,0070	0,0050	31,20	40,03	0,252
30,00	0,0153	0,0140	0,0123	0,0097	30,39	35,62	0,251
40,00	0,0193	0,0177	0,0153	0,0130	30,62	36,77	0,252
50,00	0,0263	0,0240	0,0210	0,0160	30,23	34,85	0,253
Hệ số nền tĩnh trung bình C_t (MPa/cm)							**0,252**

4.2. Kết quả thí nghiệm gia tải động

Số liệu độ võng động tại các chuyển vị kế đo được với các tải trọng tác dụng khác nhau trong thí nghiệm gia tải động được thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Số liệu độ võng tấm BTXM bằng thí nghiệm động

Thứ tự	**Tải trọng lớn nhất (kN)**	**Độ võng tại tấm ép (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 30 cm (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 60 cm (cm)**	**Độ võng cách tâm tải trọng 90 cm (cm)**
1	12,45	0,0061	0,0052	0,0035	0,0025
2	49,44	0,0224	0,0199	0,0150	0,0091
3	31,64	0,0185	0,0144	0,0115	0,0042
4	34,43	0,0189	0,0152	0,0113	0,0045
5	55,50	0,0289	0,0240	0,0177	0,0097

Áp dụng các công thức (5), (6), (7), ta có số liệu tính toán hệ số nền động như bảng 4.

Bảng 4. Hệ số nền động tính toán

Thứ tự	**Tham số AREA (inch)**	**Đặc trưng đàn hồi động tấm L_d (inch)**	**Hệ số nền động của các lần đo (MPa/cm)**	**Hệ số nền động trung bình C_d (MPa/cm)**
1	25,62	21,74	0,536	**0,515**
2	27,06	24,63	0,496	
3	24,23	19,51	0,498	
4	24,22	19,49	0,529	
5	25,30	21,18	0,517	

4.3. Mối tương quan giữa hệ số nền động và hệ số nền tĩnh

Từ số liệu trong bảng 2, giá trị hệ số nền tĩnh khi nghiên cứu thay đổi độ lớn tải trọng tác dụng lên tấm BTXM trong phòng có giá trị trung bình C_t = 0,252 MPa/cm.

Trong khi đó, từ số liệu trong bảng 4, khi thay đổi độ lớn tải trọng thì hệ số nền động tương đối ổn định, thay đổi không nhiều trong khoảng từ 0,494 MPa/cm đến 0,536 MPa/cm, giá trị hệ số nền động trung bình C_d = 0,515 MPa/cm.

Từ đó, ta tính được tương quan giữa hệ số nền động và hệ số nền tĩnh $\frac{C_d}{C_t} = 2,04$.

Nhận xét:

Từ kết quả thí nghiệm cho thấy, hệ số nền tĩnh có giá trị dao động trong khoảng 0,251 - 0,253 MPa/cm khi tải trọng tăng từ 20 kN đến 50 kN. Sự sai lệch giữa các giá trị nhỏ (~0,8%), cho thấy hệ số nền tĩnh khá ổn định với phạm vi tải trọng thí nghiệm. Trong khi đó, hệ số nền động có biên độ dao động lớn hơn, từ 0,496 - 0,536 MPa/cm, với mức chênh lệch lên tới ~8%. Điều này có thể do sự ảnh hưởng của tốc độ gia tải động, đặc tính vật liệu nền, hoặc yếu tố dao động khi đo đạc.

Nhìn chung, hệ số nền động cao hơn hệ số nền tĩnh gần gấp đôi trong phạm vi tải trọng thí nghiệm. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về tính chất nền đàn hồi chịu tải động, trong đó lực tác dụng nhanh dẫn đến mô đun nền lớn hơn do hiệu ứng quán tính của vật liệu nền. Và kết quả này cũng hoàn toàn phù hợp với vật liệu nền đất là vật liệu nhiều pha (pha rắn, pha lỏng, pha khí) thể hiện tính chất đàn nhớt dưới tác dụng của tải trọng động [2].

Mặc dù thí nghiệm đã cung cấp dữ liệu quan trọng về mối tương quan giữa hệ số nền động và hệ số nền tĩnh, song vẫn tồn tại một số hạn chế có thể ảnh hưởng đến tính đại diện và khả năng áp dụng thực tế:

- Về giới hạn tải trọng thí nghiệm trong phòng, tác giả chỉ sử dụng tải trọng tối đa khoảng < 60 kN để tránh phá hoại mẫu. Điều này có thể ảnh hưởng đến tính đại diện của dữ liệu khi áp dụng cho tải trọng bánh tàu bay thực tế (thường từ 100 kN trở lên).

- Hệ số nền xác định được trong phòng có thể chưa phản ánh chính xác điều kiện nền thực tế tại sân bay, nơi chịu ảnh hưởng của môi trường, độ ẩm và mật độ nền khác nhau.

- Sai số đo đạc có thể xuất phát từ độ nhạy của cảm biến đo chuyển vị và áp lực. Các biến động nhỏ trong lắp đặt đầu đo có thể ảnh hưởng đến kết quả tính toán hệ số nền động và hệ số nền tĩnh.

5. Kết luận

Thí nghiệm xác định hệ số nền của mặt đường BTXM cho thấy hệ số nền động cao gấp khoảng hai lần so với hệ số nền tĩnh. Nguyên nhân do đất nền có tính đàn nhớt, dưới tác dụng của tải trọng động, lực cản nhớt tăng làm nền cứng hơn, trong khi tải trọng tĩnh khiến nền ứng xử như vật liệu đàn hồi thuần túy.

Hệ số nền tĩnh có mức dao động nhỏ trong phạm vi tải trọng thí nghiệm, cho thấy tính ổn định tương đối của nền khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh. Điều này phù hợp với lý thuyết về bài toán tấm trên nền đàn hồi, trong đó độ võng của mặt đường và nền có mối quan hệ mật thiết, và lớp nền đóng vai trò hỗ trợ chính thay vì là lớp chịu lực trực tiếp.

Với trường hợp tải trọng động tác dụng, nền có xu hướng phản ứng nhanh và đạt đến trạng thái ứng suất ổn định, do sự phân bố lại ứng suất trong nền diễn ra tức thời. Tuy nhiên, sự thay đổi nhỏ của hệ số nền động theo mức tải trọng động có thể phản ánh mức độ ảnh

hưởng của biến dạng đàn hồi nhớt của nền, đặc biệt trong điều kiện tải trọng xung kích có cường độ lớn. Điều này cần được xem xét trong các nghiên cứu mở rộng để đánh giá chính xác hơn về đặc trưng động lực học của nền đường BTXM.

Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế và đánh giá khả năng khai thác mặt đường BTXM, đặc biệt là trong việc quy đổi giữa hệ số nền động và hệ số nền tĩnh. Khi điều kiện thí nghiệm động cho phép, việc xác định hệ số nền động có thể được thực hiện trước, sau đó quy đổi về hệ số nền tĩnh để sử dụng trong các phương pháp tính toán theo tiêu chuẩn và quy trình hiện hành. Điều này giúp nâng cao độ chính xác trong thiết kế, đánh giá kết cấu mặt đường BTXM.

Tài liệu tham khảo

1. Norbert Delette (2008), *Concrete pavement design, construction and performance*. The Taylor & Francis e-Library.
2. Phạm Cao Thăng (2014), *Tính toán thiết kế các kết cấu mặt đường,* NXB Xây dựng.
3. Kurt D. Smith, James E. Bruinsma, Monty J. Wade, Karim, Chatti, Julie M. Vandenbossche, H. Thomas Yu (2017), *Using Falling Weight Deflectometer data with Mechanistic - Empirical design and analysis, Volume I: Final report*, Research, Development, and Technology, Turner - Fairbank Highway Research center.
4. T. Paul Teng, PE (2001), *Backcalculation of layer parameters for LTTP test sections, volume 1: Slab on elastic solid and slab on dense - liquid foundation analysis of rigid pavements,* Research and Development, Turner - Fairbank Highway Research Center.
5. Yang H.Huang (2004), *Pavement Analysis and Design.*
6. TCVN 11365:2016. *Mặt đường sân bay - Xác định số phân cấp mặt đường bằng thiết bị đo võng bằng quả nặng thả rơi*, 2016.

Research on the relationship between static foundation coefficient and dynamic foundation coefficient of rigid pavement under change of the loading magnitudes by laboratory experiment

Abstract: *The paper investigates the correlation between the static and dynamic subgrade reaction coefficients of cement concrete pavement (CCP) through laboratory experiments. First, it addresses the differences between these two coefficients and highlights the importance of accurately determining them in the design and evaluation of CCP. To tackle this issue, the authors conducted static compression tests using a hydraulic jack system to determine the subgrade response under static loading and employed a Falling Weight Deflectometer (FWD) to capture the subgrade response under dynamic loading. In both cases, the applied load was varied to assess the influence of load magnitude on the subgrade reaction coefficient. The results indicate that the dynamic subgrade reaction coefficient is approximately twice the static subgrade reaction coefficient, providing an experimental basis for refining cement concrete pavement design models.*

Keywords: Static foundation coefficient; dynamic foundation coefficient; cement concrete slab; pavement.

Một giải pháp sử dụng cát sạn san hô xây dựng kết cấu công sự dã chiến lắp ghép bảo vệ tàu bay tại các đảo xa bờ

KS. Dương Duy Khánh, TS. Nguyễn Văn Hiếu

Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: khanhduong@lqdtu.edu.vn; Tel: 037.772.7269

Tóm tắt

Giải pháp công sự dã chiến bảo vệ tàu bay đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao cấp kháng lực, giảm thiểu tác động của vũ khí sát thương đối với tàu bay tại các sân bay quân sự. Bài báo phân tích, so sánh một số giải pháp công sự bảo vệ tàu bay hiện có, từ đó đề xuất kết cấu công sự dã chiến lắp ghép sử dụng cát sạn san hô để bảo vệ tàu bay tại các đảo xa bờ Việt Nam. Kết cấu này được thiết kế theo dạng mô đun địa kỹ thuật, có khả năng lắp đặt và tháo dỡ nhanh, tận dụng nguồn vật liệu là cát sạn san hô sẵn có tại các đảo xa bờ. Trên cơ sở mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus, bài báo đánh giá khả năng chống xuyên của cát sạn san hô đối với đạn 12,7mm, từ đó đánh giá hiệu quả của giải pháp kết cấu sử dụng cát sạn san hô cho công sự dã chiến bảo vệ tàu bay tại các sân bay ở các đảo xa bờ Việt Nam.

Từ khóa: *Công sự dã chiến lắp ghép; cát sạn san hô; mô đun địa kỹ thuật; Abaqus.*

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh hiện nay, các cuộc xung đột quân sự diễn ra với diễn biến phức tạp, sử dụng các loại phương tiện vũ khí hiện đại, đa dạng, đòi hỏi quân đội các quốc gia phải tăng cường các biện pháp bảo vệ cho các phương tiện quân sự quan trọng, đặc biệt là tàu bay quân sự. Tàu bay quân sự là một trong những phương tiện chiến lược, đóng vai trò quan trọng trong việc bảo vệ và duy trì chủ quyền quốc gia, thực hiện các nhiệm vụ phòng thủ và phản công nhanh chóng. Do đó, khả năng bảo vệ tàu bay quân sự khỏi tác động của các phương tiện sát thương trở thành một trong những ưu tiên hàng đầu của nhiều quốc gia.

Đối với các tàu bay được bố trí trên sân đỗ hoặc ven đường cơ động, yêu cầu chính đối với hệ thống bảo vệ tàu bay bao gồm khả năng chống lại mảnh văng, hỏa lực từ vũ khí bộ binh thông thường, cũng như đảm bảo việc ngăn cách độc lập giữa các tàu bay nhằm hạn chế nguy cơ lan truyền thiệt hại. Một số giải pháp kết cấu bảo vệ tàu bay hiện nay có thể kể đến như:

- Giải pháp vòm che tàu bay:

Đây là giải pháp được kế thừa từ các chiến lợi phẩm thu được của Mỹ tại một số sân bay Việt Nam. Giải pháp này bao gồm các ụ chắn bằng thép (tôn lượn sóng), bằng tôn lượn sóng phủ lớp bê tông bên trên, được sử dụng tại các sân bay: Tuy Hòa, Chu Lai, Đà Nẵng...



Hình 1. Công sự bằng vòm thép kết hợp lớp vỏ bê tông tại sân bay Tuy Hòa



Hình 2. Công sự cho tàu bay bằng kết cấu kim loại chứa đất kết hợp vòm che composit

- Giải pháp ụ chắn chống nổ lan bằng kết cấu kiên cố:

Các giải pháp bảo vệ hiện có cho tàu bay quân sự trên sân đỗ ở Việt Nam chủ yếu sử dụng các loại ụ chắn kiên cố như ụ bê tông, ụ đất gia cố bê tông, ụ bê tông cốt thép đổ tại chỗ hoặc ụ bằng kết cấu thép nhồi đất.



Hình 3. Ụ chắn bằng bê tông cốt thép tại Cảng hàng không quốc tế Tân Sơn Nhất



Hình 4. Ụ chắn bằng vỏ thép nhồi đất, cát tại sân bay Nội Bài



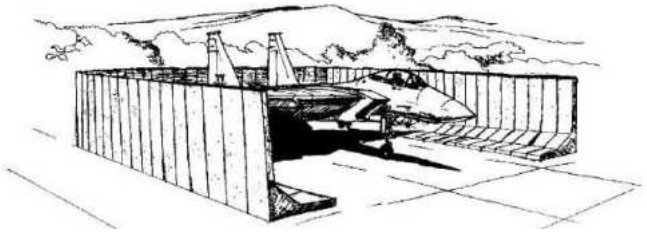
Hình 5. Ụ chắn bằng kết cấu tường đất gia cố bê tông tại sân bay Kép

Các loại vòm che tàu bay hay kết cấu ụ kiên cố này mang lại nhiều ưu điểm, bao gồm khả năng chịu lực tốt và độ bền lâu dài, phù hợp với các yêu cầu bảo vệ lâu dài và cố định. Tuy nhiên, nhược điểm chính của chúng là thời gian thi công kéo dài, chi phí lắp đặt cao và không thể đáp ứng yêu cầu về tính cơ động và sự linh hoạt. Những hạn chế này trở nên đặc biệt rõ rệt

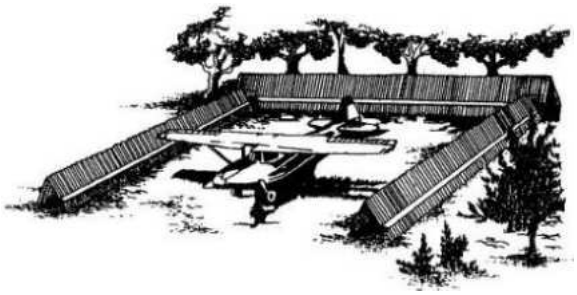
trong các tình huống cần thay đổi vị trí bảo vệ, mở rộng hoặc di dời kết cấu, đặc biệt các yêu cầu pháp lý trong đầu tư xây dựng công trình.

- Giải pháp ụ chống nổ lan bằng kết cấu lắp ghép:

Kết cấu ụ chắn bằng các khối bê tông đúc sẵn hay các tấm kim loại hoặc composite lắp ghép mang lại ưu thế về độ bền và khả năng chịu lực cao. Các khối bê tông, tấm kim loại được sản xuất theo kích thước tiêu chuẩn, sau đó lắp ráp tại hiện trường, giúp rút ngắn đáng kể thời gian thi công so với bê tông đổ tại chỗ. Ngoài ra, kết cấu này có thể tái sử dụng khi cần thay đổi vị trí, đảm bảo tính linh hoạt trong triển khai. Tuy nhiên, hạn chế lớn nhất của giải pháp này là khối lượng lớn, yêu cầu phương tiện chuyên dụng để vận chuyển và đòi hỏi kỹ thuật lắp ghép chính xác để duy trì tính ổn định và kín khít của kết cấu. Bên cạnh đó, đối với kết cấu sử dụng các tấm kim loại đòi hỏi bảo trì định kỳ để đảm bảo độ bền, đặc biệt trong môi trường có độ ẩm cao hoặc gần biển, nơi nguy cơ ăn mòn là đáng kể.



Hình 6. Kết cấu ụ chắn bằng các khối bê tông đúc sẵn lắp ghép



Hình 7. Kết cấu ụ chắn bằng các tấm kim loại lắp ghép

Ở các quốc gia có nền quân sự phát triển như Mỹ, Nga, Trung Quốc..., để bảo vệ tàu bay quân sự trong điều kiện tác chiến đã sử dụng các hệ thống ụ chắn lắp ghép, nhằm giảm thiểu nguy cơ phá hủy hàng loạt tàu bay khi căn cứ không quân bị tấn công. Các ụ chắn lắp ghép này thường ứng dụng vật liệu địa kỹ thuật và tận dụng vật liệu sẵn có tại sân bay như đất, cát, đá, sỏi..., mang lại nhiều thuận lợi trong tác chiến và ít chịu ảnh hưởng từ thay đổi quy hoạch khu vực sân đỗ khi triển khai các nhiệm vụ khác nhau. Tuy nhiên, các giải pháp kết cấu này thường là bí mật công nghệ mà đến nay chúng ta chưa có điều kiện tiếp cận.



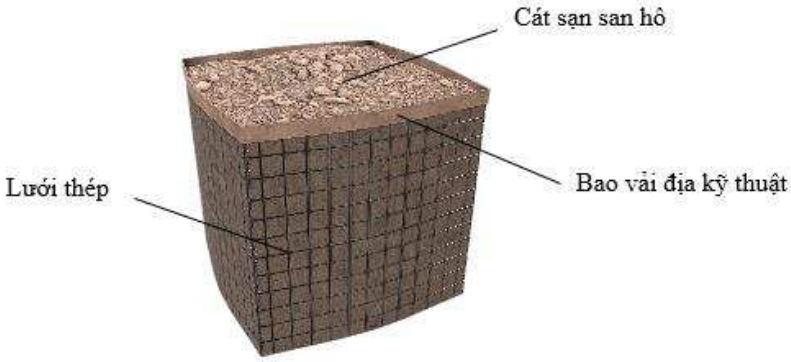
Hình 8. Ụ lắp ghép dã chiến bảo vệ tàu bay trên căn cứ không quân của Nga

Từ những lý do trên, nghiên cứu này đề xuất và đánh giá giải pháp kết cấu công sự dã chiến được lắp ghép từ các mô đun cấu kiện địa kỹ thuật chứa cát sạn san hô để bảo vệ cho các

tàu bay ở các đảo xa bờ Việt Nam. Sử dụng phần mềm mô phỏng Abaqus để đánh giá khả năng chống xuyên của lớp vật liệu trong giải pháp kết cấu đề xuất. Đây là loại kết cấu có tính năng lắp ghép nhanh dễ tháo dỡ và có khả năng chống xuyên tốt.

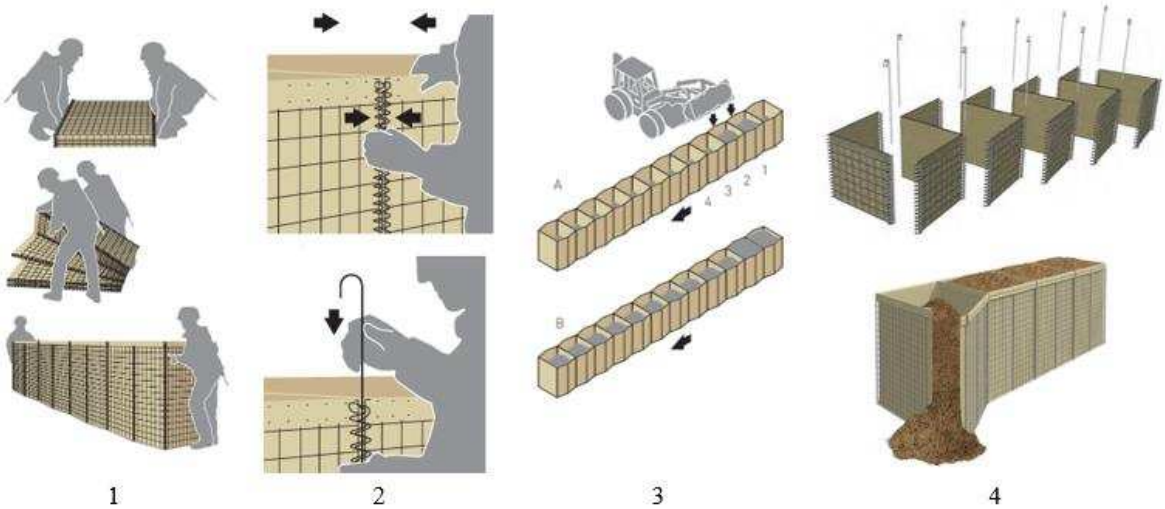
2. Quy trình lắp ghép và tháo dỡ ụ chắn

Cấu tạo của cấu kiện bao gồm khung lưới thép mạ kẽm hàn thành các ô vuông, liên kết với nhau bằng thanh nối để tạo thành khoang chứa vật liệu. Bên trong khung lưới được lót một lớp vải địa kỹ thuật có độ bền cao, giúp giữ chặt vật liệu cát sạn san hô bên trong và ngăn chặn rò rỉ ra ngoài. Khi triển khai, các cấu kiện này được lấp đầy bằng cát sạn san hô. Nhờ thiết kế dạng mô đun linh hoạt, các cấu kiện có thể dễ dàng nối tiếp nhau để tạo thành bức tường phòng thủ dài hoặc xếp chồng lên nhau để tăng cường độ dày và chiều cao.



Hình 9. Cấu tạo chung cấu kiện công sự dã chiến sử dụng cát sạn san hô

Hệ thống này có ưu điểm vượt trội về tốc độ triển khai, khả năng chịu lực tốt và dễ dàng tháo dỡ, tái sử dụng khi cần thiết. Quy trình lắp ghép ụ dã chiến bao gồm các bước chính: triển khai mô đun, cố định vị trí, đổ vật liệu lấp đầy.



1. Triển khai mô đun; 2. Cố định vị trí; 3. Đổ vật liệu lấp đầy; 4. Tháo dỡ kết cấu

Hình 10. Thi công lắp đặt và tháo dỡ giải pháp công sự dã chiến đề xuất

2.1. Triển khai mô đun

Các cấu kiện được sản xuất dưới dạng các đơn vị mô đun liên kết với nhau theo dạng gấp gọn để thuận tiện cho việc vận chuyển. Khi đến vị trí thi công, các mô đun này được kéo giãn theo chiều dài mong muốn để tạo thành hệ thống vách ngăn liên tục. Tùy theo yêu cầu bảo vệ, các mô đun có thể được lắp đặt theo một hàng hoặc xếp chồng nhiều tầng, nhiều lớp.

2.2. Cố định vị trí

Sau khi mở rộng hệ thống, các khung thép được kiểm tra để đảm bảo kết nối chắc chắn giữa các mô đun thông qua bản lề kim loại. Sử dụng các chốt cố định được sử dụng để gia tăng tính ổn định của hệ thống, đặc biệt trong môi trường địa hình không bằng phẳng hoặc khi triển khai trên các bề mặt có độ dốc cao.

2.3. Đổ vật liệu lấp đầy

Bước quan trọng nhất trong quá trình lắp ghép là đổ vật liệu lấp đầy, ở đây là cát sạn san hô - vật liệu sẵn có tại các đảo xa bờ. Quá trình này có thể thực hiện bằng phương pháp thủ công hoặc sử dụng thiết bị cơ giới như xe xúc lật để tăng tốc độ thi công. Khi vật liệu được đổ vào, chúng cần được nén chặt để đảm bảo độ ổn định và khả năng chịu lực của hệ thống. Trong một số trường hợp, các lớp xếp chồng sẽ được lấp đầy theo từng giai đoạn để tránh tạo áp lực quá lớn lên kết cấu bên dưới.

2.4. Tháo dỡ kết cấu

Khi cần di dời ụ chắn, quá trình tháo dỡ được thực hiện nhanh chóng và hiệu quả. Chỉ cần tháo các chốt liên kết để giải phóng kết cấu mô đun, vật liệu lấp đầy sẽ tự chảy ra ngoài do trọng lực kết hợp với việc xúc bỏ thủ công hoặc bằng máy. Sau đó, các mô đun được thu hồi bằng cách gấp gọn và vận chuyển đến vị trí triển khai mới. Vật liệu lấp đầy có thể được tái sử dụng cho lần lắp đặt tiếp theo hoặc loại bỏ tùy theo yêu cầu tác chiến và điều kiện thực tế.

3. Xác định chiều sâu xuyên của đạn 12,7 mm vào kết cấu công sự bảo vệ tàu bay lắp ghép bằng cát sạn san hô

3.1. Đặt bài toán

Xác định chiều sâu xuyên của đạn 12,7mm được bắn từ khoảng cách 900m (vận tốc chạm mục tiêu V_0 = 500m/s) xuyên vào cấu kiện công sự dã chiến bảo vệ tàu bay chứa cát sạn san hô.

3.2. Các thông số của đầu đạn 12,7mm

Các thông số của đạn 12,7mm được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số cơ bản đầu đạn 12,7mm [1,2]

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Thông số
1	Đường kính d	mm	12,979
2	Chiều dài L	mm	64,6
3	Chiều dài phần thon Lt	mm	33,30
4	Khối lượng	g	51,30
5	Tốc độ chạm mục tiêu	m/s	500
6	Góc chạm mục tiêu	độ	0

3.3. Các thông số vật liệu

3.3.1. Vải địa kỹ thuật

Nhóm tác giả đề xuất sử dụng loại vải địa kỹ thuật không dệt ART25. Vải địa kỹ thuật không dệt ART25 được sản xuất từ polypropylene (PP), một loại polymer bền bỉ, có tính kháng cao với môi trường và khả năng chịu lực tốt. Chất liệu polypropylene giúp vải ART25 chống lại hóa chất và độ ẩm, đồng thời giữ ổn định trong các điều kiện khắc nghiệt, giúp duy trì hiệu quả trong các ứng dụng dài hạn.

Bảng 2. Các chỉ tiêu kỹ thuật vải địa kỹ thuật không dệt ART25 [3]

STT	Chỉ tiêu	Phương pháp thử	Đơn vị	ART25
1	Cường độ chịu kéo (Tensile Strength)	ASTM D 4595	kN/m	25
2	Dãn dài khi đứt (Elongation at break)	ASTM D 4595	%	50/80
3	Kháng xé hình thang (Trapezoidal Tear Strength)	ASTM D 4533	N	520

4	Sức kháng thủng thanh (Puncture Resistance)	ASTM D 4833	N	750
5	Sức kháng thủng CBR (CBR Puncture Resistance)	DIN 54307	N	4000
6	Rơi côn (Cone Drop)	BS 6906/6	mm	11
7	Hệ số thấm tại 100mm (Permeability at 100mm)	BS 6906/3	$l/m^2/sec$	60
8	Kích thước lỗ O_{90} (Opening size O_{90})	EN ISO 12956	micron	70
9	Độ dày P=2kPa (Thickness under 2kPa)	ASTM D 5199	Mm	2
10	Trọng lượng (Mass per Unit area)	ASTM D 5261	g/m^2	315

3.3.2. Cát sạn san hô

Trong bài toán xét loại vật liệu đổ đầy là cát sạn san hô tại các quần đảo xa bờ ở Việt Nam. Các thông số cơ lý của hai loại vật liệu này được thể hiện ở bảng 3.

Bảng 3. Chỉ tiêu cơ lý đối với cát sạn san hô tại các quần đảo xa bờ ở Việt Nam [4]

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Thông số
1	Khối lượng riêng	kg/m^3	2077
2	Mô đun biến dạng	N/m^2	$30,86.10^6$
3	Hệ số Poisson		0,34
4	Lực dính	N/m^2	$29,83.10^3$
5	Góc ma sát trong	°	46,49
6	Góc trương nở	°	9,52
7	Góc ma sát ngoài với thép	°	30,66
8	Độ chặt tương đối	%	70

Hệ số ma sát giữa thép và cát sạn san hô được tính theo công thức [5]:

$$\mu = \tan\phi \quad (1)$$

trong đó:

μ - hệ số ma sát giữa cát và bề mặt thép;

ϕ - góc ma sát ngoài giữa cát và bề mặt thép.

Khi đó hệ số ma sát giữa thép và cát sạn san hô trong bài toán này sẽ là:

$$\mu = \tan\phi = \tan 30,66° = 0,59.$$

3.3.3. Lưới thép

Sử dụng thép mạ kẽm bọc PVC nhằm đảm bảo độ bền trong môi trường biển đảo. Lưới thép mắt lưới 75x75mm, đường kính của thanh thép được chọn là 5mm, giúp đảm bảo độ ổn định cho cấu kiện.

3.4. Tính toán chiều sâu xuyên của đạn 12,7mm vào cát sạn san hô bằng lý thuyết

Khi tính toán bài toán xuyên của đạn trong môi trường được nghiên cứu bởi nhiều nước như Nga, Anh, Mỹ, Thụy Điển, Úc,... Trong đó, tại Việt Nam hiện nay, khi xét đến bài toán xuyên của vật thể xuyên, phổ biến nhất có thể xem xét sử dụng công thức của Bê-rê-gian [6]:

$$h_x = \lambda_1.\lambda_2.K_x.\frac{P}{d^2}.V_0.\cos\left(\frac{1+n}{2}\right)\alpha \quad (2)$$

trong đó:

h_x - chiều sâu xuyên của vật thể xuyên, m;

λ_1 - hệ số phụ thuộc phần thon của vật thể xuyên được tính theo công thức:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{l_t}{1,5d}} \quad (3)$$

l_t - chiều dài phần thon đầu vật thể xuyên, m, với $1,5d \le l_t \le 2,5d$;

d - đường kính thân vật thể xuyên, m;

λ_2 - hệ số xác định theo công thức:

$$\lambda_2 = 2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d} \; ; \quad (4)$$

P - trọng lượng vật thể xuyên, kG;

V_0 - tốc độ của vật thể xuyên ngay trước khi va chạm, m/s;

α - góc chạm của vật thể xuyên, độ;

n - hệ số đổi hướng của vật thể xuyên trong môi trường tính theo kết quả thực nghiệm, đối với các môi trường đất mềm thì chọn n = 1;

K_x - hệ số xuyên, được xác định bằng thực nghiệm [6].

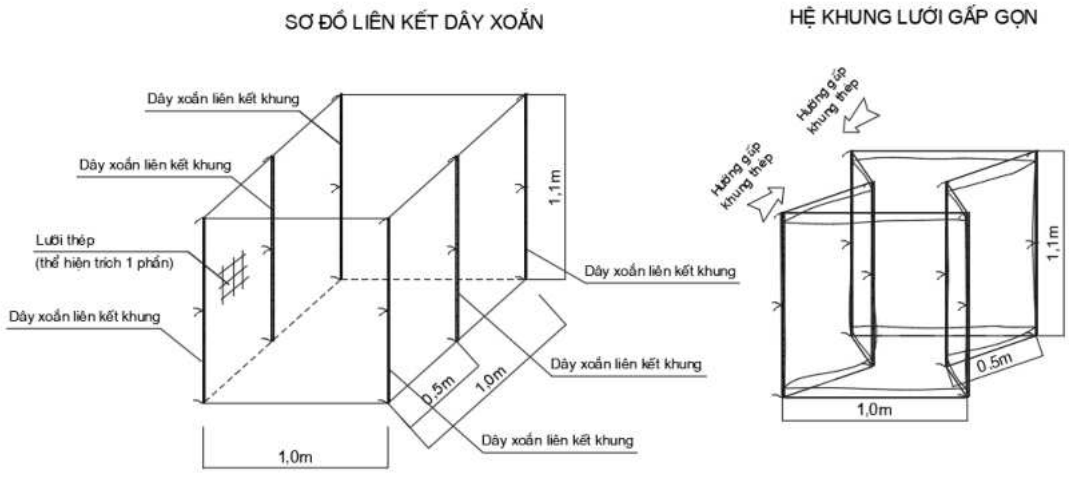
Do vật liệu cát sạn san hô là vật liệu phi tiêu chuẩn, chưa có hệ số xuyên, ở đây tác giả tính toán dựa trên dải hệ số xuyên của một số loại môi trường đất cát có tính chất tương tự, kết quả được thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4. Chiều sâu xuyên h_X của đạn 12,7mm với các hệ số xuyên khác nhau

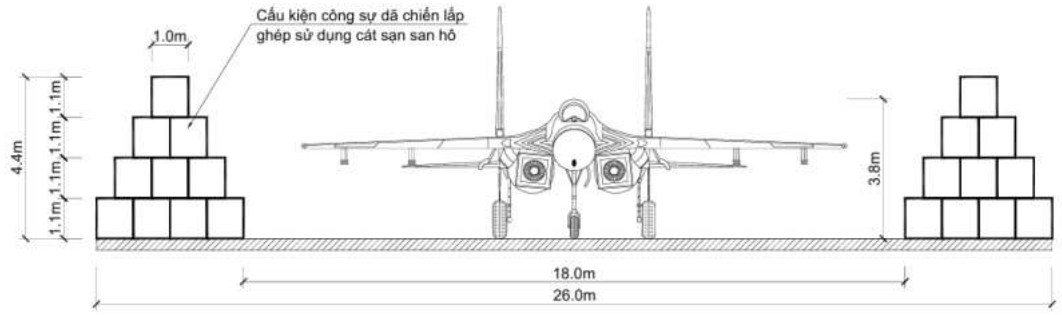
STT	Loại môi trường	Hệ số Kx [6]	Chiều sâu xuyên hx (m)
1	Cát chặt có độ ẩm tự nhiên	45.10^{-7}	0,45
2	Cát ngậm nước	68.10^{-7}	0,69
3	Á cát	50.10^{-7}	0,51
4	Á sét	60.10^{-7}	0,61
5	Đất sét chặt trung bình	70.10^{-7}	0,71

3.5. Xác định kích thước mô đun điển hình và đề xuất giải pháp

Dựa trên kết quả tính toán lý thuyết, chiều sâu xuyên của đạn 12,7mm phải đáp ứng bề rộng lớn hơn 0,71m (trường hợp nguy hiểm nhất). Nhóm tác giả đề xuất kích thước điển hình cho 1 mô đun cấu kiện là 1m x 1m x 1,1m. Kích thước này giúp việc vận chuyển, lắp đặt được thuận tiện, phù hợp với phương tiện vận chuyển, cẩu lắp, trình độ thi công của đơn vị, linh hoạt cho các loại tàu bay quân sự khác nhau. Với chiều cao 1,1m, các cấu kiện có thể được xếp thành 3 ÷ 4 tầng, đạt chiều cao từ 3,3 ÷ 4,4m, đáp ứng cơ bản cho phần thân chính của các loại tàu bay quân sự của Việt Nam hiện nay (Su-27, Su-30, Su-30MK2).



Hình 11. Kích thước mô đun điển hình



Hình 12. Mặt đứng bố trí một phương án hệ thống công sự dã chiến lắp ghép bảo vệ tàu bay sử dụng cát sạn san hô

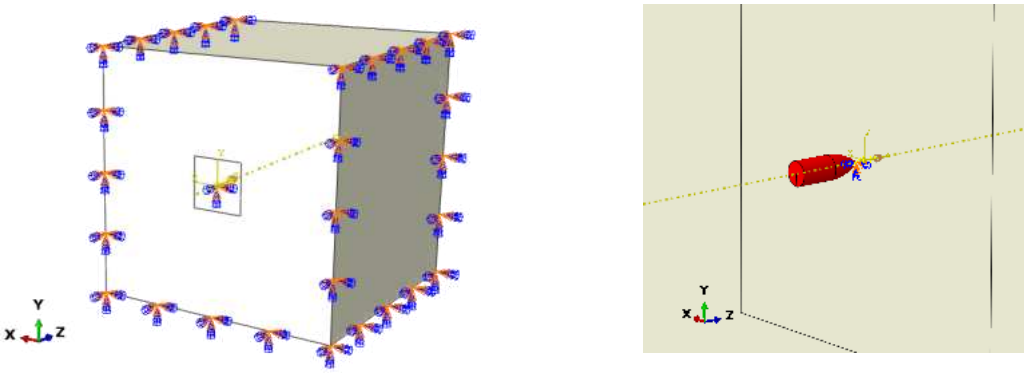
3.6. Mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus

Abaqus là một phần mềm mô phỏng số mạnh mẽ sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), đặc biệt thích hợp cho việc phân tích các bài toán động lực học phi tuyến với các bài toán va chạm, nổ và biến dạng phức tạp.

Nghiên cứu này tập trung mô phỏng bài toán đạn 12,7mmm xuyên vào cấu kiện ụ dã chiến bảo vệ tàu bay. Trong bài toán xuyên này, sự đóng góp của bao vải địa kỹ thuật và lưới thép vào tác dụng chống xuyên là không đáng kể, do đó để đơn giản hóa và giảm thời gian tính toán và thiên về an toàn, nhóm tác giả không xét đến sự làm việc của lưới thép và bao vải địa kỹ thuật. Đối với bài toán va chạm của đạn, vật liệu cát sạn san hô có thể mô phỏng theo mô hình Mohr – Coulomb, mô hình Cam Clay, mô hình tái bền động học Hypoplastic. Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo, tác giả sử dụng mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr - Coulomb để mô hình hoá vật liệu cát sạn san hô do tính đơn giản, các tham số dễ xác định qua thí nghiệm và khả năng mô phỏng phù hợp với hành vi cơ học của vật liệu trong bài toán xuyên.

Đạn 12,7mm bằng vật liệu thép với các thông số kỹ thuật [1, 2] được thể hiện trong bảng 1. Trong mô phỏng này, coi đạn là tuyệt đối cứng và giả thiết đạn bay thẳng vuông góc với cấu kiện, không xét đến chuyển động xoay của đạn. Mô phỏng với trường hợp đạn được bắn từ khoảng cách 900m, khi đó vận tốc đầu đạn khi va chạm là 500 m/s [2].

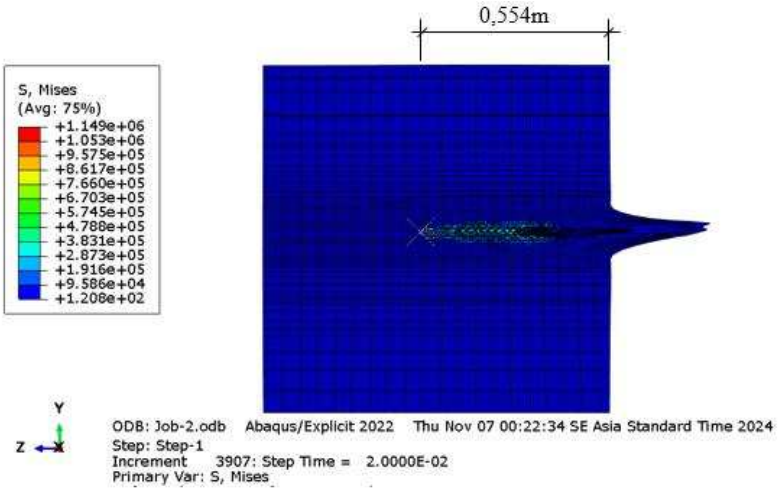
Trong bài toán xét loại vật liệu đổ đầy là cát sạn san hô tại các quần đảo xa bờ ở Việt Nam. Các thông số cơ lý của hai loại vật liệu này được thể hiện ở bảng 3.



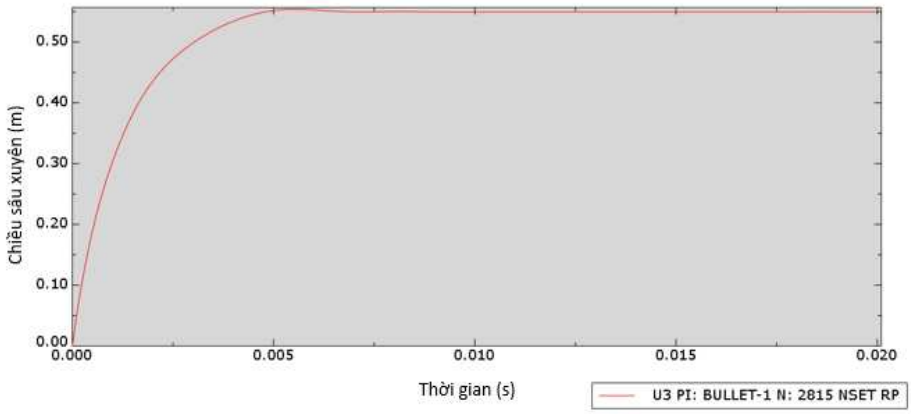
Hình 13. Mô hình hóa cấu kiện ụ dã chiến bằng phần mềm Abaqus

4. Kết quả và thảo luận

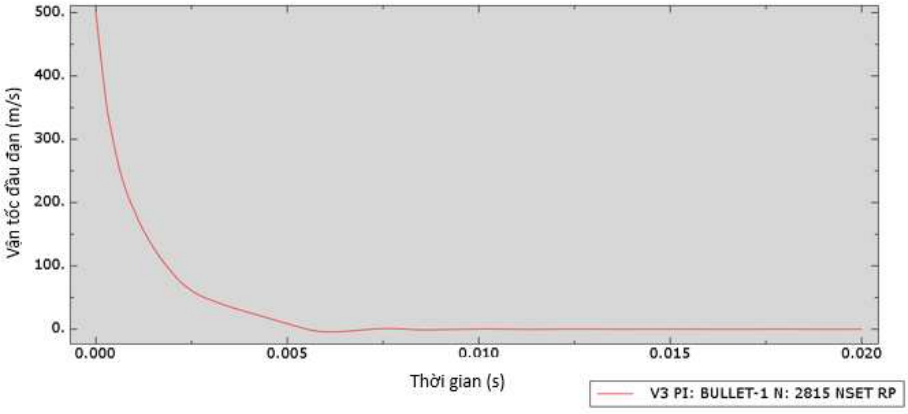
Kết quả mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus được thể hiện trong hình 14, 15, 16.



Hình 14. Xuyên của đạn 12,7mm vào cấu kiện ụ dã chiến bằng cát sạn san hô tại các quần đảo xa bờ Việt Nam



Hình 15. Biểu đồ chiều sâu xuyên của đầu đạn theo thời gian



Hình 16. Biểu đồ vận tốc đầu đạn theo thời gian

Qua mô phỏng, xác định được chiều sâu xuyên của đầu đạn 12,7mm vào cát sạn san hô tại các đảo xa bờ Việt Nam là 0,554m tại thời điểm t = 0,0055s (tính từ lúc chạm mục tiêu), đạn chưa xuyên qua cấu kiện (dày 1m). Đối chiếu với bảng 4, hệ số xuyên có thể chọn K_X=54,8.10^{-7} (tương đương với loại đất á sét). Như vậy có thể sử dụng cát sạn san hô trong xây dựng kết cấu công sự dã chiến bảo vệ tàu bay tại các sân bay ở các đảo xa bờ Việt Nam,

Việc sử dụng mô đun địa kỹ thuật lắp ghép chứa cát sạn san hô không chỉ giúp tận dụng nguồn vật liệu sẵn có tại các đảo xa bờ mà còn đảm bảo khả năng lắp đặt và tháo dỡ nhanh chóng, đáp ứng yêu cầu cơ động của công sự dã chiến trong môi trường tác chiến. Giải pháp này có tiềm năng ứng dụng thực tế trong việc nâng cao khả năng bảo vệ tàu bay tại các sân bay trên các đảo xa bờ Việt Nam.

5. Kết luận

Trên cơ sở kết quả mô phỏng đạn 12,7mm bắn tại cự ly 900m (vận tốc chạm mục tiêu 500m/s) vào cấu kiện cho thấy so với các giải pháp công sự lâu bền như ụ chắn bê tông cốt thép hay vòm thép, ụ dã chiến lắp ghép từ các mô đun cấu kiện địa kỹ thuật sử dụng vật liệu cát sạn san hô áp dụng cho các sân bay tại các đảo xa bờ Việt Nam không chỉ đáp ứng yêu cầu bảo vệ hiệu quả mà còn giúp tận dụng vật liệu có sẵn, giảm thiểu khối lượng vận chuyển, đồng thời đảm bảo khả năng lắp ráp và tháo dỡ nhanh chóng, phù hợp với các yêu cầu bảo vệ tạm thời trong điều kiện chiến đấu phức tạp cũng như trong điều kiện xây dựng khó khăn tại các đảo xa bờ.

Giải pháp kết cấu này khi được nghiên cứu và chế tạo thành công, có thể cung cấp phương án hiệu quả trong triển khai công sự dã chiến bảo vệ tàu bay tại các đảo xa bờ.

Tài liệu tham khảo

1. https://www.wikiwand.com/en/articles/.50_BMG
2. Miloš S. Pešić (2022). Numerical analysis of a frontal impact of a 12.7 mm projectile on an armor plate. Vojnotehnicki glasnik/Military Technical Courier, vol. 70, no. 4, pp. 897-923.
3. https://hatangviet.com/san-pham/vai-dia-ky-thuat-art25/
4. Nguyễn Thanh Sang (2024). Luận án tiến sĩ kỹ thuật "Nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô". Học viện Kỹ thuật quân sự.
5. Chuanxiao Yang (2020). Improved Terzaghi-theory-based interaction modeling of rotary robotic locomotors with granular substrates. Mechanism and Machine Theory, vol. 152.
6. Nguyễn Trí Tá (2008). Giáo trình công sự tập I. Học viện Kỹ thuật quân sự.
7. Nguyễn Trí Tá (2010). Giáo trình công sự dã chiến. Học viện Kỹ thuật quân sự.

A solution for using coral sand in modular field fortifications to protect aircraft on offshore islands

Abstract: *The fortification solution for aircraft protection plays a crucial role in enhancing the resistance level and minimizing the impact of lethal weapons on aircraft at military airports. This paper analyzes and compares existing aircraft protection fortification solutions and then proposes a modular field fortification structure using coral sand to protect aircraft at offshore islands in Vietnam. This structure is designed in the form of geotechnical modules, which can be quickly installed and dismantled, utilizing the readily available coral sand material found on offshore islands. Based on numerical simulations using the Abaqus software, the paper evaluates the penetration resistance of coral sand against 12,7mm bullet, assessing the effectiveness of the proposed structural solution for airports on offshore islands in Vietnam.*

Keywords: Modular field fortifications; coral sand; geotechnical modules; Abaqus.

Một số vấn đề kiểm soát nứt nhiệt trong kết cấu bê tông khối lớn sử dụng chất ức chế tăng nhiệt thủy hóa

TS. Nguyễn Trọng Chức[1], PGS.TS. Hoàng Quốc Long[1], NCS. Lê Văn Hưng[1]

[1]Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt – Học viện KTQS

Email: trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Vấn đề nứt nhiệt do sự thủy hóa xi măng trong kết cấu bê tông khối lớn đã được đông đảo các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Hiện nay, có nhiều biện pháp ngăn ngừa sự hành thành vết nứt nhiệt như công nghệ thiết kế tối ưu thành phần bê tông có sử dụng phụ gia khác nhau và biện pháp công nghệ thi công. Một trong số những biện pháp tối ưu thành phần bê tông có sử dụng phụ gia đó là sử dụng chất ức chế tăng nhiệt. Biện pháp trên là công nghệ mới, hiện đại và chưa được nhiều các công trình công bố. Trong bài báo này, tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích, đánh giá việc kiểm soát vết nứt nhiệt trong kết cấu móng bê tông khối lớn có sử dụng phụ gia chất ức chế tăng nhiệt thủy hóa. Kết quả nghiên cứu là bước đầu cho các nghiên cứu tiếp theo và là tài liệu tham khảo cho các dự án xây dựng kết cấu bê tông khối lớn sử dụng bê tông có phụ gia chất ức chế tăng nhiệt.

Từ khóa: *Nhiệt độ lớn nhất; trường nhiệt độ; bê tông khối lớn; chỉ số nứt; chất ức chế tăng nhiệt.*

1. Đặt vấn đề

Do kết cấu bê tông khối lớn (BTKL) có kích thước tiết diện lớn nên sau khi đổ bê tông, nhiệt độ bên trong tăng lên đáng kể do quá trình thủy hóa. Khi nhiệt độ tăng, khối bê tông có xu hướng giãn nở, nhưng do bị kiềm chế nên khối bê tông bị nén lại và sinh ra ứng suất nén, vào thời điểm này do mô đun đàn hồi của bê tông tương đối nhỏ và từ biến tương đối lớn nên ứng suất nén do tăng nhiệt độ không lớn. Tuy nhiên khi nhiệt độ giảm dần, khối bê tông có xu hướng co lại, nhưng do bị kiềm chế nên khối bê tông bị kéo căng và sinh ra ứng suất kéo, lúc này mô đun đàn hồi lớn và từ biến nhỏ sẽ gây ra ứng suất kéo đáng kể trong khối bê tông [1, 2]. Tóm lại, trong quá trình thi công và vận hành, sự thay đổi nhiệt độ sẽ gây ra ứng suất kéo lớn trong BTKL, khi ứng suất này vượt quá giá trị ứng suất kéo cho phép sẽ xuất hiện các vết nứt trong kết cấu. Chính vì vậy, cần có biện pháp hạn chế nhiệt thủy hóa trong BTKL để nhiệt độ tối đa không vượt quá giới hạn cho phép. Lý do chính là để ngăn chặn các hư hại cho bê tông, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng độ bền lâu dài của bê tông có thể bị ảnh hưởng nếu nhiệt độ tối đa sau khi đổ vượt quá phạm vi từ 68°C đến 74°C hoặc chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt ngoài của kết cấu BTKL từ 20°C đến 25°C [3].

Quá trình thủy hóa xi măng được chia làm 5 giai đoạn: Giai đoạn hòa tan, giai đoạn cảm ứng, giai đoạn tăng tốc, giai đoạn giảm tốc và giai đoạn ổn định. Các phụ gia hóa học được đưa vào mẻ trộn trước hoặc trong quá trình trộn bê tông với một liều lượng nhất định (không lớn hơn 5 % khối lượng xi măng) nhằm mục đích thay đổi một số tính chất của hỗn hợp bê tông [4]. Các phụ gia bê tông thông thường bao gồm chất siêu dẻo, chất làm chậm đông kết, chất đóng rắn nhanh… chúng tác động vào quá trình nhiệt động lực học của bê tông trong các

giai đoạn nhiệt thủy hóa theo các cơ chế khác nhau để đạt được tính chất bê tông như mong muốn [5].

Là một loại phụ gia bê tông mới, chất ức chế tăng nhiệt độ thủy hóa (concrete temperature rising inhibitor-TRI) có thể làm chậm tốc độ giải phóng nhiệt của phản ứng thủy hóa bê tông và nó đã được áp dụng ở một số công trình xây dựng trong những năm gần đây. Theo tiêu JC/T 2608-2021 của Trung Quốc về "Chất ức chế tăng nhiệt độ thủy hóa bê tông" thì nó là phụ gia được trộn vào bê tông xi măng và có thể làm giảm tốc độ giải phóng nhiệt thủy hóa của xi măng trong giai đoạn tăng tốc mà không ảnh hưởng đến tổng nhiệt lượng giải phóng nhiệt thủy hóa [6].

TRI là một loại phụ gia bê tông được điều chế bằng quá trình thủy phân axit của bột ngô, nó chủ yếu bao gồm muối axit hydroxy và các khoáng chất [7, 8]. Nó được sử dụng để giải quyết vấn đề nứt nhiệt độ do ứng suất nhiệt quá mức trong BTKL [9]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc bổ sung TRI vào bê tông có thể điều chỉnh quá trình thủy hóa bằng cách giảm tốc độ giải phóng nhiệt của quá trình hydrat hóa [10]. Cơ chế, bản chất tác dụng của phụ gia TRI trong bê tông là hòa tan từ từ trong môi trường dung dịch kiềm được tạo ra bởi quá trình thủy hóa xi măng. Xi măng có khả năng hấp thụ lượng TRI đáng kể, do TRI chứa một số lượng lớn nhóm -OH, có khả năng tương tác với các hydroxit kim loại như $Ca(OH)_2$ trên bề mặt xi măng [11]. Sự gia tăng hàm lượng TRI làm tăng số lượng phân tử hữu cơ hấp thụ trên bề mặt xi măng, dẫn đến tốc độ giải phóng nhiệt hydrat hóa giảm. Do đó, ức chế tốc độ tỏa nhiệt thủy hóa của các hạt xi măng. TRI hòa tan trong dung dịch kiềm với tốc độ chậm nên nó có thể được hòa tan và hấp thụ liên tục, làm chậm tốc độ phản ứng thủy hóa của các hạt xi măng và làm chậm đáng kể mức độ tập trung của phản ứng thủy hóa xi măng [8]. Từ đó, đạt được mục tiêu giảm nhiệt độ tối đa trong kết cấu BTKL.

TRI khác với các phụ gia làm chậm quá trình đông kết của bê tông. Vì các phụ gia làm chậm quá trình đông kết chủ yếu kéo dài thời gian cảm ứng của quá trình thủy hóa xi măng, do đó làm chậm sự xuất hiện nhiệt độ lớn nhất trong quá trình thủy hóa. Nhưng khi thời gian cảm ứng kéo dài kết thúc, quá trình thủy hóa diễn ra với tốc độ nhanh hơn, do đó giá trị nhiệt độ lớn nhất thậm chí còn cao hơn. Vì vậy, chất làm chậm quá trình đông kết thông thường không thể giải quyết được hầu hết các vấn đề nứt nhiệt. TRI cũng có những đặc tính của chất làm chậm quá trình đông kết nhưng nó khác ở cơ chế tác động tới quá trình thủy hóa. TRI chủ yếu ảnh hưởng đến thời gian phản ứng trong giai đoạn tăng tốc của quá trình thủy hóa xi măng, nó làm giảm tốc độ thủy hóa và kéo dài thời gian phản ứng nhanh. Khi thêm TRI vào hỗn hợp bê tông, nhiệt độ lớn nhất, tốc độ tăng nhiệt độ của bê tông sẽ giảm khi tăng hàm lượng TRI, giúp cải thiện khả năng chống nứt nhiệt ở tuổi sớm. Đồng thời, khi C-S-H (Silicat của Canxi hydrat – $3CaO.2SiO_2.3H_2O$) được hình thành trong quá trình thủy hóa, nó sẽ rất ổn định và không bị ảnh hưởng bởi TRI nên không có sự thay đổi lớn về giá trị cường độ cuối cùng của bê tông [10]. Cũng như các loại phụ gia hóa học khác, hàm lượng TRI sử dụng phụ thuộc vào từng sản phẩm cụ thể và được khuyến cáo bởi nhà sản xuất [6].

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh tác dụng của TRI khi thêm vào hỗn hợp bê tông. Hao Zhang và cộng sự (2018) đã sử dụng TRI gốc tinh bột trong bê tông để nghiên cứu tác dụng của nó đối với quá trình thủy hóa xi măng và ngăn ngừa nguy cơ nứt nhiệt ở liều lượng khác nhau là 0%, 0,2%, 0,4%, 0,6%. Kết quả cho thấy nhiệt độ lớn nhất của quá trình thủy hóa lần lượt là

35,9ºC, 34,7ºC, 31,8ºC và 24,9ºC ứng với hàm lượng TRI 0%, 0,2%, 0,4% và 0,6%. Bên cạnh đó, khi tăng hàm lượng TRI tốc độ tăng nhiệt độ trong giai đoạn tăng tốc giảm và tốc độ giảm nhiệt trong kết cấu cũng giảm đáng kể, đây là một yếu tố quan trọng có lợi trong việc kiểm soát nứt nhiệt [7]. Trong nghiên cứu [9] TRI cũng được sử dụng trong thí nghiệm với hàm lượng 0%, 0,2%, 0,4% và 0,6% đối với kết cấu có độ dày 1,2m. Nghiên cứu cho thấy, khi hàm lượng TRI tới 0,6% thì nhiệt độ lớn nhất giảm khoảng 11,0% và ứng suất kéo lớn nhất giảm khoảng 11,7%, hiệu quả trong việc ngăn chặn sự xuất hiện của các vết nứt nhiệt [9].

Xiaoping Shao và cộng sự (2023) thì nghiên cứu quá trình hydrat hóa và tính chất cơ học của vữa xi măng với hàm lượng TRI khác nhau từ 0–1,0%. Kết quả chỉ ra rằng, TRI có thể giảm tốc độ tăng nhiệt độ và kéo dài thời gian đạt nhiệt độ lớn nhất. Tốc độ tăng nhiệt độ tối đa của hỗn hợp chứa 1% TRI thấp hơn hỗn hợp 0% TRI là 36,3%. TRI ức chế quá trình thủy hóa vữa xi măng chủ yếu trong vòng 7 ngày, điều này làm giảm cường độ ban đầu của hỗn hợp. Tuy nhiên, theo tuổi tác sự chênh lệch cường độ giảm dần và TRI thậm chí còn có lợi cho việc phát triển cường độ ở giai đoạn tuổi sau [11].

XiZhi Wang (2021) tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của TRI với hàm lượng khác nhau đến sự tăng nhiệt độ, cường độ và tính chất của hỗn hợp bê tông bằng thực nghiệm hiện trường. Từ đó xác định liều lượng tối ưu của TRI. Nghiên cứu thực nghiệm trong việc kiểm soát các vết trên tường bên của đường hầm đổ tại chỗ đã được thực hiện. Thông qua nghiên cứu đã xác định liều lượng tối ưu của TRI là 1% khối lượng xi măng. Khi thêm 1% TRI vào bê tông tường bên đường hầm, mức tăng nhiệt độ tối đa đã giảm xuống và thời gian đạt đỉnh nhiệt độ bị trì hoãn, không có vết nứt nào xuất hiện trên tường và hiệu quả kiểm soát vết nứt là tốt [8].

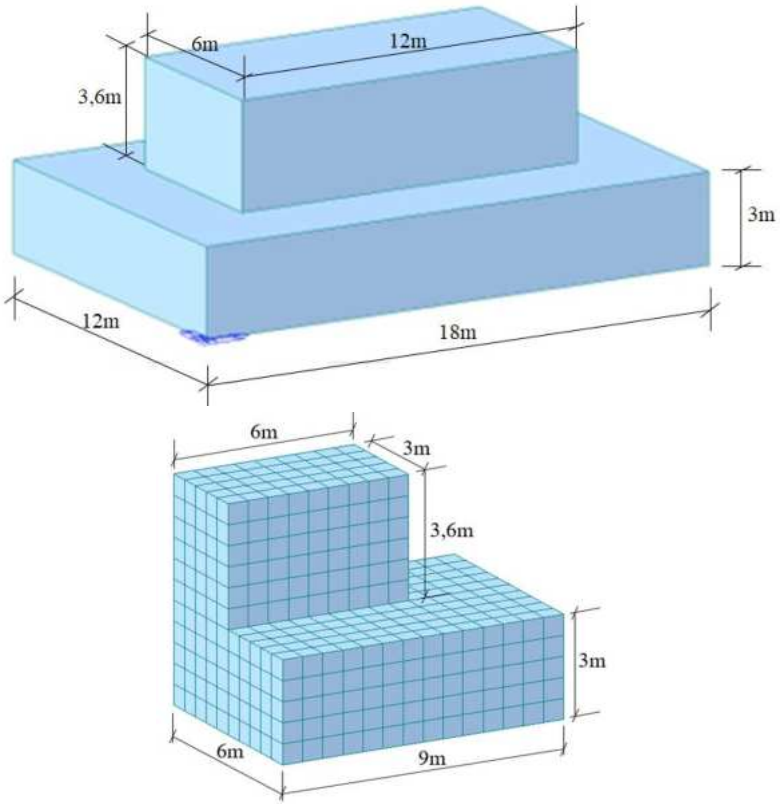
Tuy nhiên, các nghiên cứu trên và một số nghiên cứu trước đây chưa đánh giá hiệu quả của TRI đến vấn đề kiểm soát vết nứt nhiệt trong kết cấu BTKL. Do đó, mục đích của bài báo này là so sánh nguy cơ xuất hiện vết nứt nhiệt trong kết cấu móng BTKL trong hai trường hợp là bê tông không sử dụng TRI và bê tông có sử dụng TRI. Từ đó, đánh giá ảnh hưởng của TRI tới việc kiểm soát nứt nhiệt trong kết cấu BTKL.

2. Vật liệu và phương pháp

2.1. Mô tả móng bê tông khối lớn

Nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của TRI tới nhiệt độ tối đa và nguy cơ nứt trong móng BTKL kích thước 6m×12m×3,6m đặt trên nền đất 12m×18m×3m bằng phương pháp PTHH. Để đánh giá ảnh hưởng của TRI, móng BTKL được phân tích với hai cấp phối bê tông khác nhau, một cấp phối không sử dụng TRI (CP1) và một cấp phối sử dụng 1% TRI (CP2) theo khuyến cáo của nhà sản xuất. Thành phần cấp phối bê tông, tính chất của hỗn hợp bê tông, loại TRI và kết quả đo nhiệt độ đoạn nhiệt của hai cấp phối bê tông được lấy theo nghiên cứu của Wenqiang Xu (2019) và được thể hiện ở các bảng 1, bảng 2 và bảng 3 [12]. Các điều kiện nhiệt độ thi công và tính chất của nền đất cũng được tổng hợp trong bảng 2.

Do tính đối xứng hai chiều của khối bê tông, tác giả sử dụng 1/4 mô hình để giảm khối lượng phân tích. Kích thước khối bê tông và mô hình PTHH được thể hiện trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ tính toán và phân chia lưới PTHH trên 1/4 mô hình kết cấu

Bảng 1. Thiết kế thành phần cấp phối bê tông [12]

Hỗn hợp bê tông	**Xi măng (kg/m^3)**	**Tro bay (kg/m^3)**	**Cốt liệu mịn (kg/m^3)**	**Cốt liệu thô (kg/m^3)**	**Nước (kg/m^3)**	**TRI (kg/m^3)**
CP1	246	82	609	1333	118	0
CP2	246	82	609	1333	118	3,28

Bảng 2. Tính chất cơ, lý của vật liệu

Các tham số vật liệu, đơn vị	**Giá trị**		
	Bê tông CP1 [12]	**Bê tông CP2 [12]**	**Nền đất**
Hệ số dẫn nhiệt, kJ/(m.h.^{o}C)	7,74	7,74	7,2
Nhiệt dung riêng, kJ/(kg.^{o}C)	0,97	0,97	0,84
Khối lượng riêng, kg/m^3	2390	2390	1800
Hệ số truyền nhiệt đối lưu, kJ/(m^2.h.^{o}C)	16,6	16,6	40
Mô đun đàn hồi, N/m^2	$3{,}2\times10^{10}$	$3{,}25\times10^{10}$	$1{,}8\times10^{10}$
Cường độ chịu nén $f'_c(t_n)$, MPa	33,3	35,4	
Hệ số giãn nở nhiệt (α)	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}
Hệ số poatxong	0,167	0,167	0,20
Nhiệt độ bạn đầu, ^{o}C	25	25	25

Bảng 3. Kết quả đo nhiệt độ đoạn nhiệt của hai mẫu cấp phối bê tông [12] sử dụng làm thông số nguồn nhiệt trong chương trình Midas

Thời gian (ngày)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**14**	**21**	**28**
CP1, (°C)	17,5	23,5	26,4	28,5	30,3	30,9	31,6	33,4	34,2	35,0
CP2, (°C)	6,1	9,6	13,2	16,5	18,9	20,3	21,8	32,4	33,0	34,5

2.2. Cơ sở phương pháp phân tử hữu hạn trong giải bài toán nhiệt

Phương trình vi phân truyền nhiệt tổng quát là [13]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)+q_v=\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

Trong đó: k_x, k_y, k_z - là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu tương ứng theo 3 phương *x, y, z*, W/m.°C; $q_v=\rho C_p \frac{\partial T_{dn}}{\partial \tau}$ - là nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích hay tốc độ sinh nhiệt, W/m^3; C_p - là nhiệt dung riêng, J/kg.°C; ρ - là khối lượng riêng của bê tông, kg/m^3; T_{dn} – là nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông, °C; τ - là thời gian, giờ.

Để giải phương trình (1), cần sử dụng hai điều kiện biên cơ bản về nhiệt được đưa ra bởi điều kiện biên loại 1 như phương trình (2) và (3):

$$T=T_m \text{ trên } S_1 \quad (2)$$

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l+k_y \frac{\partial T}{\partial y} m+k_z \frac{\partial T}{\partial z} n+q+h\left(T-T_a\right)=0 \quad \text{trên } S_2 \quad (3)$$

Trong đó: S_1 và S_2 - là các bề mặt biên giới với S_1 hợp S_2 bằng S và S_1 giao S_2 bằng 0; *l, m, n* - là các cosin chỉ phương của các bề mặt truyền nhiệt; *h* - là hệ số tỏa nhiệt đối lưu kcal/m^2.h.°C; T_a - là nhiệt độ môi trường; T_m - là nhiệt độ trên bề mặt bê tông hoặc đất nền, °C; *q* - là dòng nhiệt tại biên.

Phương pháp phân tử hữu hạn khi giải bài toán truyền nhiệt không ổn định và có nguồn trong được thể hiện bởi phương trình viết rút gọn dạng ma trận như sau:

$$[C]\left\{\frac{\partial T}{\partial \tau}\right\}+[K]\{T\}=\{f\} \quad (4)$$

Với bài toán truyền nhiệt không ổn định, cần phân tích thời gian thành những bước thời gian Δτ như sau:

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial \tau}\right\}=\frac{1}{\Delta \tau}\left\{\left[T\left(\tau_n\right)-T\left(\tau_{n-1}\right)\right]\right\} \quad (5)$$

Phương trình (4) có thể được viết lại như sau:

$$\frac{[C]}{\Delta \tau}\left\{\left[T\left(\tau_n\right)-T\left(\tau_{n-1}\right)\right]\right\}+[K]\{T\}=\{f\} \quad (6)$$

Trong đó: [*K*] - là ma trận hệ số dẫn nhiệt; [*C*] - là ma trận nhiệt dung riêng; {*f*} - là ma trận nhiệt lượng sinh ra; $\Delta\tau = \Delta\tau_n - \Delta\tau_{n-1}$ - là bước của thời gian tính toán.

Giải phương trình (6) cho ta trường nhiệt độ trong khối bê tông ở thời điểm khác nhau.

Hiện nay, nhiều phần mềm như Ansys, Midas Civil được sử dụng để giải quyết bài toán truyền nhiệt trong bê tông. Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng phần mềm Midas Civil 2019 để giải bài toán truyền nhiệt trong kết cấu BTKL.

2.3. Đánh giá nguy cơ nứt nhiệt ở tuổi sớm trong kết cấu bê tông khối lớn

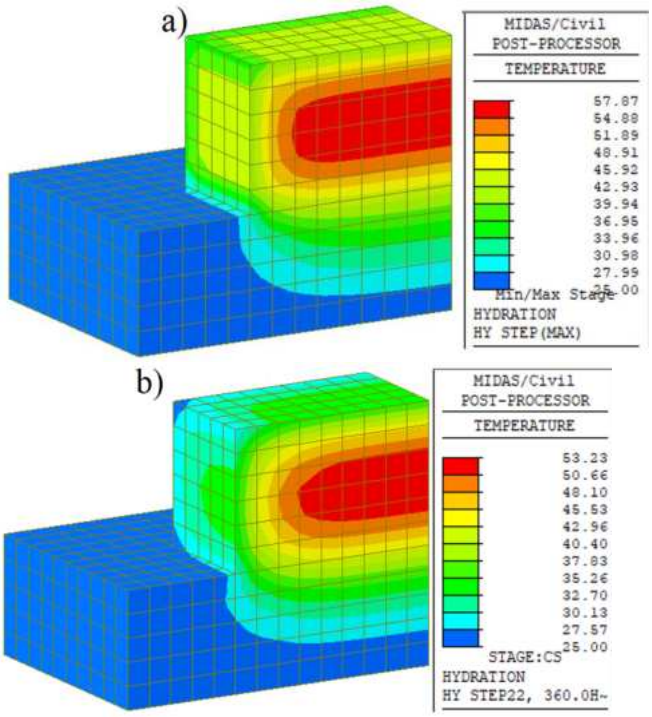
Việc đánh giá và dự đoán sự hình thành vết nứt trong kết cấu bê tông khối lớn có vai trò hết sức quan trọng trong thiết kế và thi công, nó giúp cho các kỹ sư chủ động sử dụng các biện pháp cần thiết để giảm thiểu nguy cơ nứt và kiểm soát sự phát triển vết nứt trong kết cấu. Có nhiều tiêu chí đánh giá và dự đoán sự hình thành vết nứt nhiệt ở tuổi sớm, do nhiều quốc gia đưa ra, mỗi tiêu chí lại có những ưu và nhược điểm riêng phù hợp với điều kiện và kết cấu cụ thể. Tuy nhiên, nguyên tắc chung để đảm bảo kết cấu không xuất hiện vết nứt nhiệt là ứng suất nhiệt sinh ra không được vượt quá cường độ kéo của bê tông như phương trình (7):

$$\sigma_n(t) \le f_k(t) \tag{7}$$

Trong đó: $\sigma_n(t)$ - là ứng suất nhiệt tại thời điểm *t*, kg/cm^2; $f_k(t)$ - là cường độ kéo của bê tông tại thời điểm *t*, kg/cm^2.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Sử dụng Midas Civil 2019, kết quả phân tích nhiệt độ trong móng BTKL được trình bày trong hình 2 và hình 3 cho thấy khi thêm TRI vào hỗn hợp bê tông sẽ ảnh hưởng đến nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông.

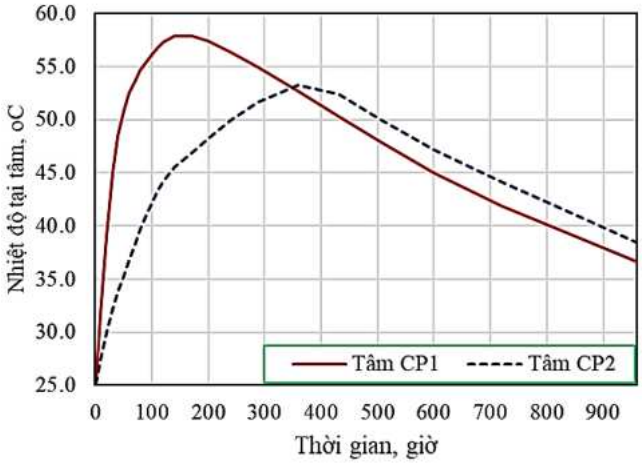


a) Trường nhiệt độ trong CP1; b) Trường nhiệt độ trong CP2

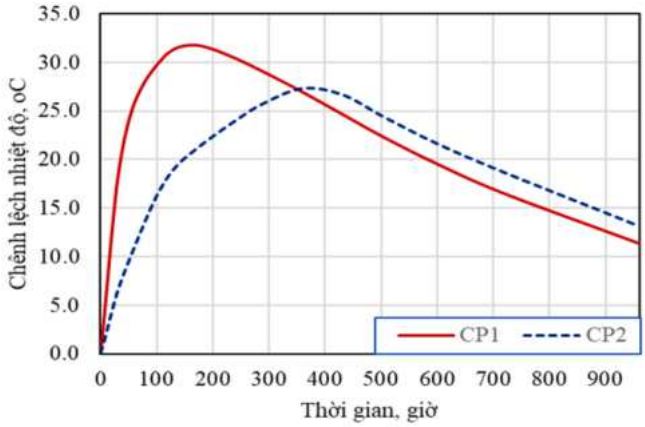
Hình 2. Phân bố nhiệt độ trong móng BTKL với hai cấp phối khi nhiệt độ đạt giá trị lớn nhất

Theo hình 3 phần đường cong tăng nhiệt của CP1 dốc hơn nhiều so với CP2. Điều này chứng tỏ tốc độ tăng nhiệt của CP1 nhanh hơn nhiều so với CP2 và nhiệt độ lớn nhất trong

móng với CP1 đạt được là 57,87^{o}C tại thời điểm 140 giờ, với CP2 là 53,23^{o}C tại tời điểm 360 giờ. Sau khi đạt đỉnh nhiệt, cả hai cấp phối bắt đầu giảm nhiệt. Hai phần đường cong giảm nhiệt ở hình 3 gần như song song cho thấy với tốc độ giảm nhiệt của chúng gần như bằng nhau.

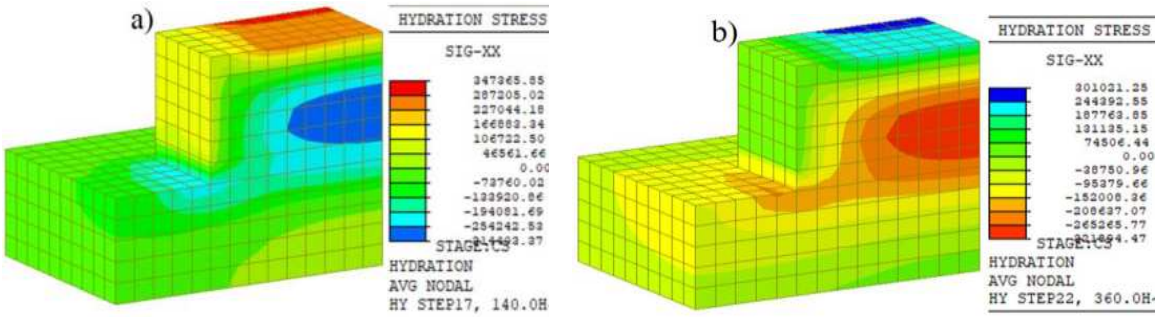


Hình 3. Sự thay đổi nhiệt độ ở tâm móng BTKL khi sử dụng hai cấp phối theo thời gian



Hình 4. Chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt móng BTKL đối với hai cấp phối theo thời gian

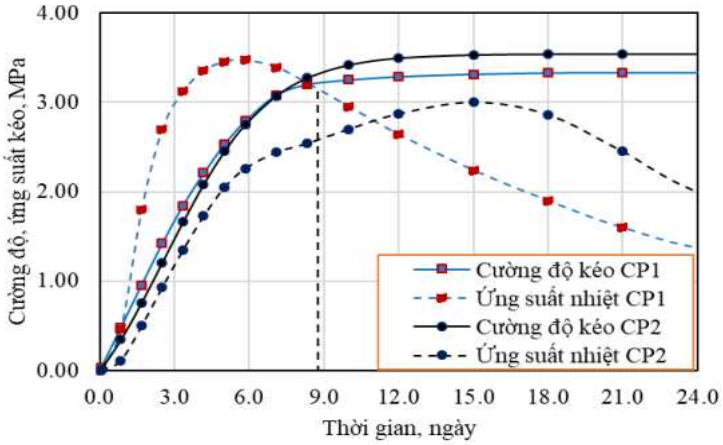
Theo hình 4, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất với CP1 là 31,8^{o}C tại thời điểm 140 giờ và CP2 là 26,3^{o}C tại thời điểm 360 giờ. Từ kết quả phân tích nhiệt độ và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất có thể thấy rằng sự phát triển ứng suất kéo trong móng BTKL với hai cấp phối là khác nhau, quá trình phân tích ứng suất kéo lớn nhất bằng Midas Civil 19 được thể hiện như hình 5.



a) Ứng suất của CP1 tại thời điểm 140 giờ; b) Ứng suất của CP2 tại thời điểm 360 giờ

Hình 5. Phân bố ứng suất nhiệt trong móng BTKL với hai cấp phối tại thời điểm nhiệt độ và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất

Theo kết quả phân tích bằng Midas Civil 19 và tính toán, giá trị ứng suất nhiệt và cường độ kéo của bê tông theo thời gian được thể hiện như hình 6.



Hình 6. Quá trình thay đổi ứng suất nhiệt và cường độ kéo của bê tông theo thời gian

Ở giai đoạn đầu, giá trị cường độ kéo của CP2 tăng chậm hơn so với CP1. Cụ thể, ở tuổi 1 ngày cường độ kéo của CP2 bằng 0,42MPa nhỏ hơn 26% so với CP1 là 0,58MPa, ở tuổi 3 ngày của CP2 là 1,48MPa nhỏ hơn 12% so với CP1 là 1,68MPa và tới tuổi 7 ngày cường độ kéo của hai cấp phối là tương đương nhau. Sau đó, sự phát triển cường độ kéo của CP2 diễn ra nhanh hơn so với CP1 và tới tuổi 18 ngày thì cả hai cấp phối gần như không tăng cường độ. Điều này cũng phù hợp với nghiên cứu thực nghiệm của Wenqiang Xu và cộng sự (2020) về sự phát triển cường độ của CP1 và CP2 [12].

Như hình 6 thể hiện, ứng suất nhiệt lớn nhất sinh ra trong CP1 là 3,47MPa tại thời điểm 6 ngày và CP2 là 3,0MPa tại thời điểm 15 ngày. Điều này hoàn toàn phù hợp với thời điểm các cấp phối đạt nhiệt độ lớn nhất như phân tích ở phần trên.

Khi xây dựng móng BTKL sử dụng bê tông theo CP2 thì ứng suất nhiệt sinh ra sẽ luôn nhỏ hơn cường độ chịu kéo của bê tông tại cùng một thời điểm. Do đó, kết cấu không có nguy cơ xuất hiện vết nứt nhiệt. Còn đối với CP1, khoảng thời gian từ 1 ngày tới gần 9 ngày sau khi thi công ứng suất nhiệt sinh lớn hơn cường độ chịu kéo của bê tông, do đó nguy cơ xuất hiện vết nứt nhiệt trong thời gian này là rất lớn.

4. Kết luận

Dựa vào kết quả thu được ta có thể đưa ra một số kết luận sau:

Chất ức chế nhiệt thủy hóa có hiệu quả rõ rệt trong việc kiểm soát nhiệt trong kết cấu BTKL. Nó có tác dụng làm giảm tốc độ tăng nhiệt và giảm nhiệt độ lớn nhất trong kết cấu, đồng thời trì hoãn thời gian đạt đỉnh nhiệt.

Sau khi đạt nhiệt độ lớn nhất, tốc độ giảm nhiệt trong bê tông không sử dụng TRI và có sử dụng TRI là tương tự nhau, điều này chứng tỏ TRI không gây ra sốc nhiệt cho kết cầu.

Khi sử dụng 1% TRI trong thi công móng BTKL có kích thước như bài báo này, móng không có nguy cơ xuất hiện vết nứt nhiệt. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu cần được đối chiếu với kết quả thực nghiệm hiện trường, từ đó mới đánh giá đầy đủ về tác dụng của phụ gia TRI trong kiểm soát vết nứt nhiệt trong kết cấu BTKL.

Tài liệu tham khảo

1. Atrushi, D. S. (2003). *Tensile and compressive creep of young concrete: testing and modelling*. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi.

2. Bofang, Z. (2013). *Thermal stresses and temperature control of mass concrete*. Butterworth-Heinemann.
3. Gajda, J., & Vangeem, M. (2002). Controlling temperatures in mass concrete. *Concrete international*, *24*(1), 58-62.
4. Tiêu chuẩn quốc gia. (2011). TCVN 8826:2011 "Phụ gia hóa học cho bê tông".
5. Kong, F. R., Pan, L. S., Wang, C. M., & Xu, N. (2016). Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. *Construction and building materials*, *105*, 545-553.
6. Major building materials standards of the People's Republic of China. (2021). JC/T 2608-2021 "Concrete hydration temperature increase inhibitor".
7. Zhang, H., Wang, W., Li, Q., Tian, Q., Li, L., & Liu, J. (2018). A starch-based admixture for reduction of hydration heat in cement composites. *Construction and Building Materials*, *173*, 317-322.
8. Wang, X., Shi, M., & Wang, X. (2021). Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 283, p. 01032). EDP Sciences.
9. Zhang, H., Liu, X., Feng, P., Li, L., & Wang, W. (2019). Influence of temperature rising inhibitor on nucleation and growth process during cement hydration. *Thermochimica Acta*, *681*, 178403.
10. Zhang, H., Li, L., Feng, P., Wang, W., Tian, Q., & Liu, J. (2018). Impact of temperature rising inhibitor on hydration kinetics of cement paste and its mechanism. *Cement and Concrete Composites*, *93*, 289-300.
11. Shao, X., Ning, J., Tang, R., Fang, Z., Zhao, B., Xu, B., ... & Wang, Z. (2023). Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material. *Case Studies in Construction Materials*, *19*, e02680.
12. Xu, W., Qiang, S., Hu, Z., Ding, B., & Yang, B. (2020). Effect of hydration heat inhibitor on thermal stress of hydraulic structures with different thicknesses. *Advances in Civil Engineering*, *2020* (1), 5029865.
13. Li, B., Wang, Z., Jiang, Y., & Zhu, Z. (2018). Temperature control and crack prevention during construction in steep slope dams and stilling basins in high-altitude areas. *Advances in Mechanical Engineering*, *10*(1), 1687814017752480.

Some problems of thermal cracking control in mass concrete structures using temperature rise inhibitor

Abstract: *The problem of thermal cracking due to cement hydration in mass concrete structures has been studied by many scientists. Currently, there are many measures to prevent the formation of thermal cracks, such as optimizing concrete composition using different additives and construction technology measures. One of the measures to optimize concrete composition using additives is to use a temperature rise inhibitor. The above measure is a new, modern technology and has not been published in many works. In this paper, the author uses the finite element method to analyze and evaluate the control of thermal cracking in mass concrete foundation structures using temperature rise inhibitor. The research results are the first step for further studies and are reference documents for projects to build mass concrete structures using concrete with temperature rise inhibitor.*

Keywords: Maximum temperature; temperature field; mass concrete; cracking index; temperature rise inhibitor (TRI).

Nghiên cứu tính toán trường nhiệt độ trong lớp bê tông nhựa mặt đường ô tô khu vực Hà Nội theo kịch bản biến đổi khí hậu 2020 của Việt Nam

KS Nguyễn Đức Đại Dương[1], TS Trần Thị Thu Trang[1]

[1]Học viện KTQS

Tóm tắt:

Bê tông nhựa (BTN), hay bê tông asphalt, là vật liệu có tính đàn nhớt, các chỉ tiêu cơ lý của vật liệu thay đổi phụ thuộc nhiệt độ môi trường. Chính vì thế, để tính toán thiết kế kết cấu mặt đường có sử dụng loại vật liệu này, cần phải có dữ liệu về đặc tính cơ học của nó theo nhiệt độ tính toán. Nói cách khác, cần biết quy luật phân bố nhiệt độ theo chiều sâu trong lớp vật liệu này. Thêm vào đó, tình trạng biến đổi khí hậu, đặc biệt là sự nóng lên toàn cầu có ảnh hưởng đến mọi mặt của đời sống xã hội, trong đó có lĩnh vực thiết kế công trình. Trong bài báo này, tác giả thu thập và xử lý dữ liệu về nhiệt độ 7 ngày nóng nhất khu vực Hà Nội trong bối cảnh biến đổi khí hậu theo kịch bản năm 2020 của Bộ tài nguyên môi trường làm cơ sở xây dựng và giải bài toán truyền nhiệt trong kết cấu mặt đường BTN bằng phương pháp PTHH, có xét đến sự thay đổi các đặc trưng truyền nhiệt của vật liệu theo nhiệt độ. Trên cơ sở trường nhiệt độ trong kết cấu từ kết quả giải bài toán, tác giả đề xuất một số nhiệt độ tính toán cho mặt đường bê tông asphalt phù hợp điều kiện khí hậu khu vực tính toán.

Từ khóa: bê tông asphalt, mặt đường bê tông nhựa, trường nhiệt độ, truyền nhiệt, phần tử hữu hạn, biến đổi khí hậu.

1. Đặt vấn đề

Bê tông nhựa (BTN) là vật liệu phổ biến trong xây dựng mặt đường ô tô, chịu ảnh hưởng mạnh bởi nhiệt độ môi trường do tính lưu biến của bitum. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu (BĐKH), nhiệt độ trung bình tăng và các đợt nóng cực đoan gia tăng ảnh hưởng đến tuổi thọ mặt đường và thông số thiết kế kết cấu mới, đặc biệt trong 20 năm tới. [1,2,3,4,7]

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã đề xuất các hàm phân bố nhiệt độ theo chiều sâu BTN, nhưng chủ yếu mang tính địa phương, chưa phản ánh đầy đủ điều kiện khí hậu và vật liệu Việt Nam. Hiện nay, tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN [6] vẫn dựa trên tiêu chuẩn Nga, gây bất cập khi áp dụng. Một số nghiên cứu trong nước đã thực nghiệm, xây dựng công thức hồi quy hoặc mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) để xác định trường nhiệt độ BTN.

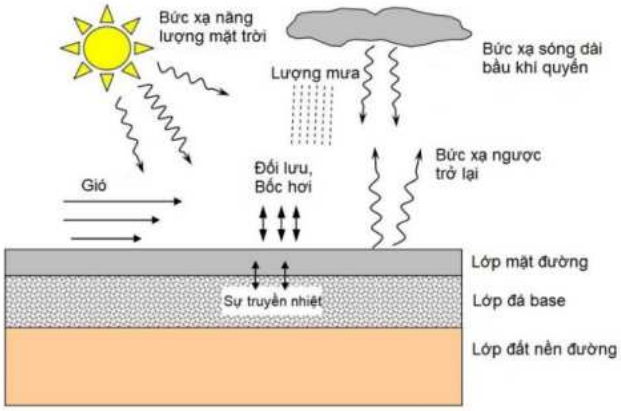
Nghiên cứu này thu thập dữ liệu nền nhiệt tại Hà Nội, kết hợp kịch bản BĐKH để mô phỏng trường nhiệt độ trong BTN bằng phần mềm Abaqus, có xét đến tính chất truyền nhiệt thay đổi theo nhiệt độ và chu kỳ ngày đêm. Kết quả giúp đề xuất nhiệt độ tính toán mặt đường BTN phù hợp với điều kiện khí hậu Việt Nam.

Trong nghiên cứu này,các tác giả tiến hành thu thập cơ sở dữ liệu về nền nhiệt tại khu vực đồng bằng Bắc Bộ, đặc trưng là khu vực Hà Nội, tính toán cùng với nhiệt độ gia tăng theo các kịch bản BĐKH sau đó kết hợp với xây dựng mô hình số trên phần mềm Abaqus, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, để mô phỏng và tính toán sự phân bố nhiệt độ theo chiều sâu trong lớp BTN làm cơ sở đề xuất nhiệt độ tính toán mặt đường BTN theo các tiêu chuẩn trạng thái giới hạn trong đó có chiều sâu HLVBX mặt đường phù hợp với điều kiện khí hậu khu vực nghiên cứu. Trong tính toán có xét đến sự thay đổi tính chất truyền nhiệt của vật liệu BTN theo nhiệt độ và sự đổi chiều của bức xạ nhiệt trong 1 chu kỳ ngày đêm.

2. Xác định dòng nhiệt trên bề mặt mặt đường tại khu vực Hà Nội

Nhiều tiêu chuẩn quốc tế đề xuất rằng, nhiệt độ tính toán cho mặt đường bê tông nhựa (BTN) nên được xác định dựa trên dữ liệu nhiệt độ trung bình của 5 đến 7 ngày nóng nhất liên tiếp trong năm tại khu vực nghiên cứu, […]. Cơ chế truyền nhiệt trong kết cấu

mặt đường bê tông nhựa được minh họa chi tiết trong Hình 1, giúp mô tả quá trình hấp thụ và phân tán nhiệt độ trong các lớp vật liệu BTN.



Hình 1. Sơ đồ truyền nhiệt trong mặt đường BTN

Đối với bề mặt thoáng tiếp xúc trực tiếp với ánh nắng mặt trời, nếu không xét đến các yếu tố như gió, mưa, độ ẩm không khí…, nhiệt độ tác dụng tại bề mặt vật liệu chủ yếu được xác định bởi nhiệt độ không khí và nhiệt độ bức xạ mặt trời. Mối quan hệ này thường được biểu diễn thông qua công thức, [4,7]:

$$T = T_{kk}^{tt} + T_{bx} \quad (1)$$

trong đó:

T: là nhiệt độ tác dụng tại bề mặt mặt đường, °C;

$T_{kk}^{tt} = T_{kk} + \Delta T$: là nhiệt độ không khí tại thời điểm tính toán, °C;

Nhiệt độ không khí tại thời điểm tính toàn là nhiệt độ của tuần nóng nhất được lấy theo từng giờ, từng ngày tại các trạm khí tượng T_{kk} kết hợp với nhiệt độ gia tăng ΔT theo 2 kịch bản BĐKH vào giữa thế kỷ 21:

- Kịch bản RCP4.5 (Kịch bản trung bình): 1,5°C ÷1,9°C [5];
- Kịch bản RCP8.5 (Kịch bản cực đoan): 2,3°C÷2,6°C [5];

T_{bx}: là nhiệt độ bức xạ, °C, xác định bởi, [4,7]:

$$T_{bx} = \frac{\rho \times I \times k_b}{a_{dn}}; \quad (2)$$

với:

ρ - hệ số hấp thụ nhiệt, phụ thuộc màu sắc và trạng thái bề mặt mặt đường. Đối với tầng phủ bê tông asphalt ρ = 0,82÷0,89;

I - cường độ tia bức xạ, kcal/m^2.h, phụ thuộc vĩ độ Bắc, tháng và giờ trong ngày (0,07÷0,95);

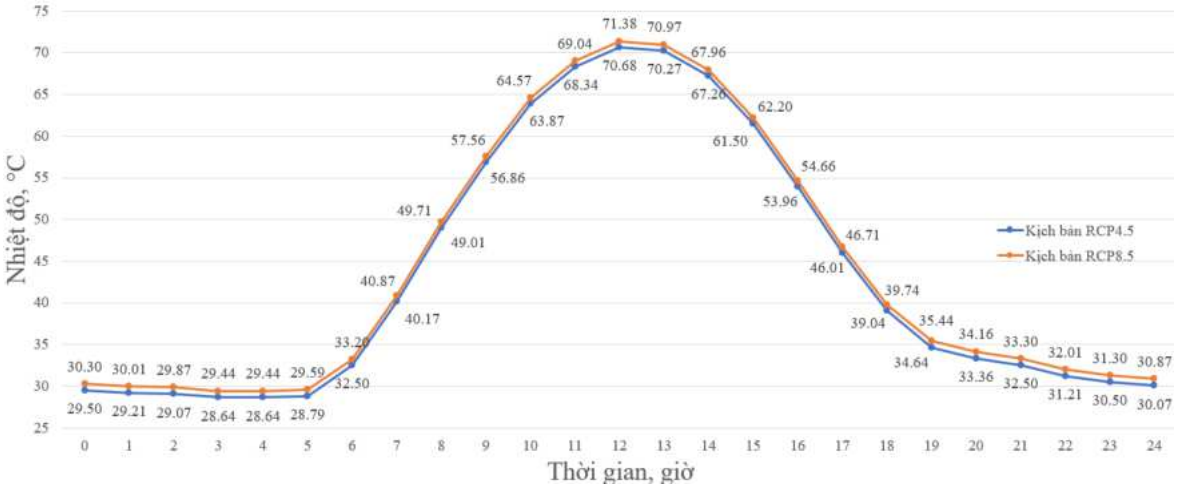
k_b - hệ số kể đến việc bức xạ mặt trời bị yếu đi do bầu khí quyển, trên các sân bay và đường ô tô có thể lấy bằng 0,5÷0,65;

a_{dn} - hệ số dẫn nhiệt, đối với mặt đường nhựa có thể lấy bằng 16Kcal/(m^2.h.°C).

Trong một chu kỳ ngày đêm, tại một khu vực nhất định, lượng bức xạ mặt trời lớn nhất thường được ghi nhận vào giữa trưa, khi góc tới (góc nhập xạ) đạt giá trị cực đại trên bầu trời địa phương. Trong giai đoạn ban ngày, khi khu vực được chiếu sáng, góc tới của các tia sáng tăng dần kể từ khi mặt trời mọc, dẫn đến sự gia tăng lượng bức xạ nhận được.

Đến giữa trưa, khi góc tới đạt cực đại, lượng bức xạ cũng đạt giá trị lớn nhất. Sau đó, lượng bức xạ giảm dần khi góc tới giảm theo quỹ đạo mặt trời, cho đến khi ánh sáng mặt trời biến mất hoàn toàn khi ban đêm thay thế. Trong suốt ban đêm, khu vực không nhận được bất kỳ năng lượng bức xạ nào từ mặt trời [7].

Theo số liệu thu thập từ các trạm khí tượng Láng và Hà Đông, đợt nắng nóng kéo dài từ ngày 16/5/2023 đến hết ngày 22/5/2023 đã được ghi nhận là giai đoạn có mức nhiệt cao nhất trong 5 năm liên tiếp (từ 2019 đến 2024). Dựa trên các số liệu quan trắc, các tác giả đã sử dụng dữ liệu nhiệt độ không khí và bức xạ trong 7 ngày nắng nóng liên tiếp [8] để làm cơ sở xác định dòng nhiệt đầu vào kết hợp với 2 kịch bản biến đổi khí hậu là RCP4.5 và RCP 8.5 vào thời điểm giữa thế kỷ (2046-2065) [6], phục vụ cho việc tính toán trường nhiệt độ trong lớp bê tông nhựa của mặt đường ô tô. Kết quả tính toán nhiệt độ bề mặt mặt đường trong khoảng thời gian này theo cộng thức [2.1] được minh họa trên đồ thị Hình 2.2, thể hiện sự biến động nhiệt độ theo thời gian.



Hình 2. Nhiệt độ tính toán trên bề mặt kết cấu mặt đường BTN theo giờ tại khu vực Hà Nội theo từng kịch bản BĐKH

3. Xây dựng và giải bài toán truyền nhiệt một chiều trong lớp bê tông nhựa kết cầu mặt đường mềm

Kết cấu mặt đường cấp cao A_1, được thiết kế bao gồm các lớp vật liệu từ trên xuống như trong bảng 3.1.

Bảng 1. Cấu tạo và vật liệu kết cấu mặt đường BTN nghiên cứu

Lớp vật liệu	**Chiều dày h (cm)**	**Dung trọng ρ (kg/m^3)**
Lớp mặt trên BTNC12,5	6	2385
Lớp mặt dưới BTNC19	8	2400
CPĐD I	22	2371
CPĐDII	30	1820
Nền đất á cát	600	1650

Mặt cắt ngang đường đưa vào phân tích có một làn xe mỗi chiều và lề gia cố cùng lề đất bố trí hai bên phần xe chạy. Chiều rộng của mỗi làn xe là 3,50 m; chiều rộng của lề gia cố và lề đất lần lượt là 2,0 m và 0,5 m. Đường nằm trong khu vực có chênh lệch độ cao nhỏ. Taluy đắp hai bên có độ dốc 1/1,5.

Trong mặt đường nhựa, sự truyền nhiệt chủ yếu diễn ra thông qua quá trình dẫn Trong mặt đường nhựa, sự truyền nhiệt chủ yếu diễn ra thông qua quá trình dẫn nhiệt, và cường độ dẫn nhiệt phụ thuộc trực tiếp vào nhiệt độ bề mặt của kết cấu. Thay đổi điều kiện thời tiết dẫn đến sự hình thành các dòng nhiệt khác nhau trong kết cấu áo đường. Hơn nữa, không chỉ giá trị mà cả hướng của dòng nhiệt cũng thay đổi, phụ thuộc vào sự biến động của nhiệt độ trong lớp mặt đường. Điều này xảy ra do nhiệt luôn truyền từ vùng có nhiệt độ cao hơn đến vùng có nhiệt độ thấp hơn. Quá trình dẫn nhiệt này được mô tả bởi Định luật Fourier, biểu diễn dưới dạng phương trình vi phân như sau [4,6]:

$$q=\lambda\frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

trong đó:

q là cường độ dòng nhiệt theo phương z, W/m^2;

λ là độ dẫn nhiệt của vật liệu theo phương z, W/(m.°C);

$\frac{\partial T}{\partial z}$ là gradient nhiệt theo phương z, °C/m;

T là nhiệt độ, °C.

Khi đã xác định được quy luật thay đổi nhiệt độ bề mặt mặt đường, có thể áp dụng lời giải của bài toán truyền nhiệt một chiều trong bán không gian vô hạn dựa trên định luật Fourier để tính toán trường nhiệt độ trong lớp bê tông nhựa (BTN) mặt đường. Phương trình truyền nhiệt một chiều được biểu diễn như sau [4,6]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{\lambda}{\rho c_p}\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (4)$$

với:

τ là thời gian, s;

ρ là khối lượng riêng của vật liệu mặt đường, kg/m^3;

c_p là nhiệt dung riêng của vật liệu mặt đường, J/°C·kg.

Để giải được phương trình (4) cần các điều kiện biên sau:

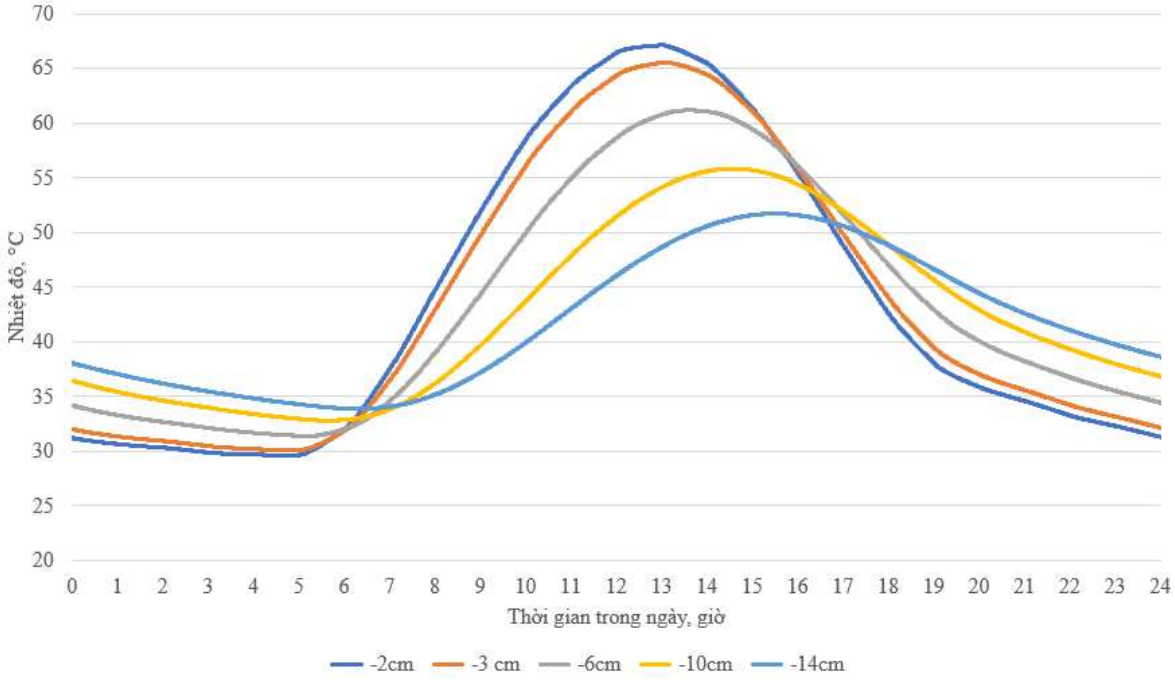
- Điều kiện biên tại bề mặt mặt đường bằng nhiệt độ mà kết cấu nhận được trên bề mặt mặt đường;
- Trong 1 chu kỳ ngày đêm, nhiệt độ lúc 0h bằng nhiệt độ lúc 24h ngày hôm trước và nhiệt độ lúc 24h bằng nhiệt độ 0h ngày hôm sau;
- Từ một độ sâu nhất định phía dưới kết cấu mặt đường, nhiệt độ của nền đất sẽ hầu như không thay đổi. Chiều sâu này đối với kết cấu mặt đường mềm đường ô tô nằm trong khoảng 2-2,5m dưới đáy áo đường, [4].

Trong nghiên cứu này, các tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) để giải phương trình (3), nhằm xác định sự phân bố nhiệt độ trong kết cấu mặt đường bê tông nhựa (BTN). Quá trình mô phỏng số được thực hiện trên phần mềm Abaqus.

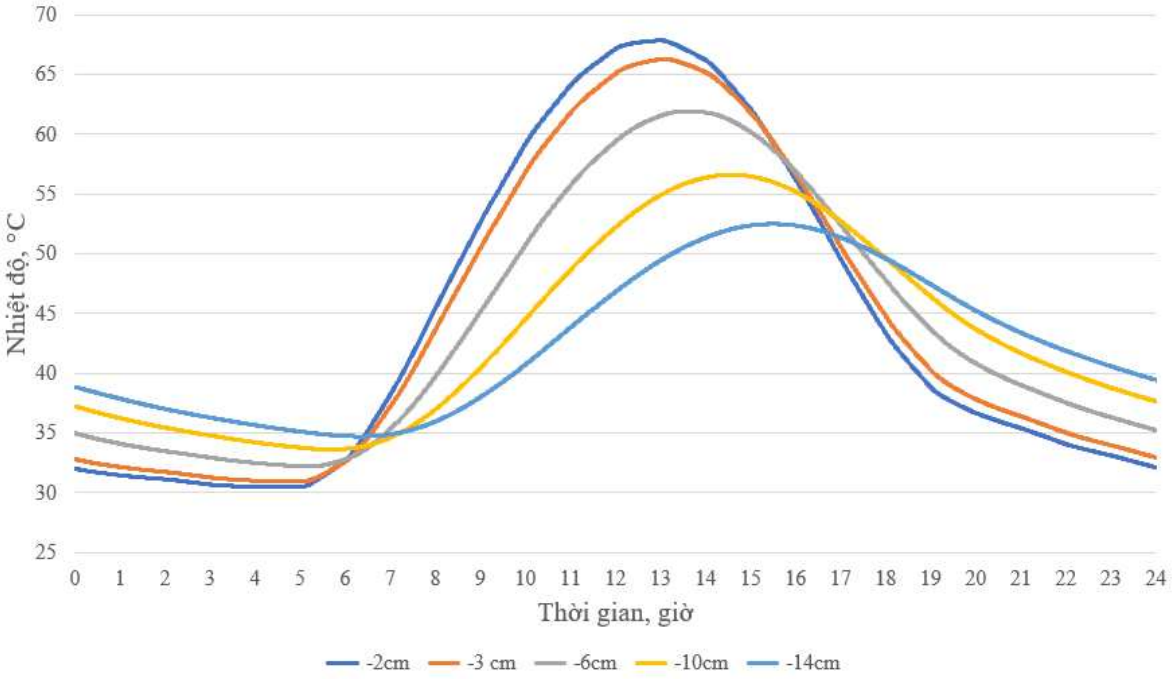
Trong mô hình, các lớp vật liệu của áo đường được gán phần tử truyền nhiệt loại Heat Transfer (thuộc Family: Heat Transfer), với kích thước phần tử được thiết lập là Approximate global size: 0,1. Phần tử tiếp xúc giữa các lớp áo đường được mô hình hóa với ràng buộc tie (constraint type: tie). Điều kiện biên phía dưới được thiết lập bằng cách sử dụng một khối đất đắp cao 6m với nhiệt độ cố định là 27°C [4].

Tính chất truyền nhiệt của BTN được giả định thay đổi theo nhiệt độ, với các giá trị tham khảo dựa trên nghiên cứu trước đó [1]. Ngoài ra, quá trình phân tích cũng tính đến hiện tượng bức xạ nhiệt ngược từ mặt đường vào không khí vào ban đêm, theo mô tả trong [7].

Sự biến thiên nhiệt độ theo chu kỳ ngày đêm tại các vị trí tính toàn bao gồm: nhiệt độ bề mặt (-2cm); nhiệt độ tại vị chính giữa của từng lớp (-3cm và -10cm); nhiệt độ tại vị trí tiếp xúc giữa các lớp (-6cm và -14cm) trong mùa nóng được minh họa rõ ràng trong Hình 3 và Hình 4, cho thấy ảnh hưởng của các điều kiện nhiệt độ đến quá trình truyền nhiệt trong kết cấu mặt đường.



Hình 3. Nhiệt độ tại các vị trí tính toán trong 1 chu kỳ ngày đêm theo kịch bản RCP4.5

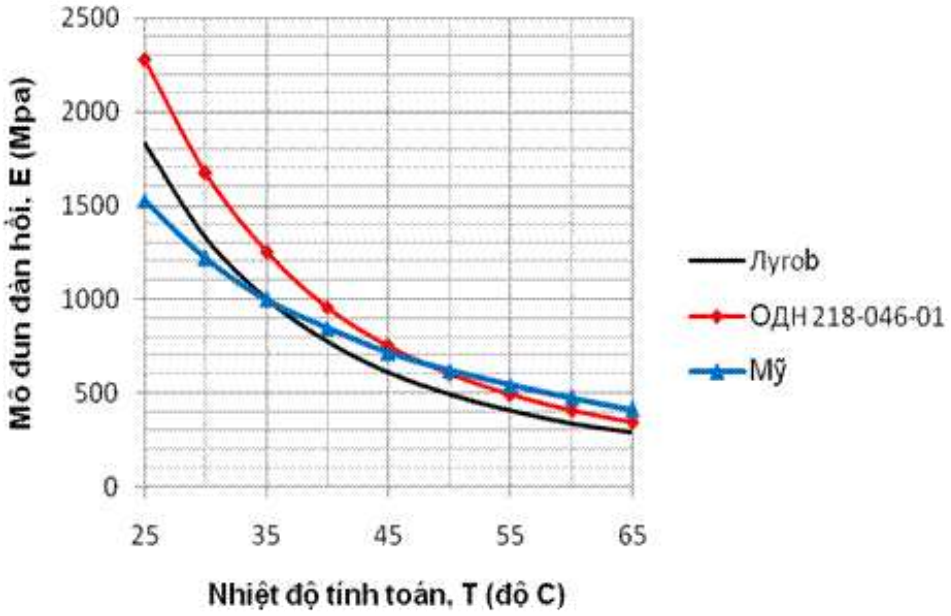


Hình 4. Nhiệt độ tại các vị trí tính toán trong 1 chu kỳ ngày đêm theo kịch bản RCP8.5

Quan sát Hình 3 và Hình 4 cho thấy, theo cả 2 kịch bản BĐKH tại khu vực Hà Nội,

nhiệt độ cao nhất trên bề mặt lớp bê tông nhựa có thể lên tới trên 67÷68°C, trong khi ở giữa lớp BTN, đặc biệt là lớp trên cùng nhiệt độ có thể đạt gần 65°C. Tuy nhiên, các giá trị nhiệt độ này được quy định trong tiêu chuẩn thiết kế hiện hành lần lượt là 60°C và 30°C [5]. Sự khác biệt này cho thấy dưới các điều kiện nhiệt độ khác nhau, đặc trưng cường độ của vật liệu bê tông nhựa thay đổi đáng kể. Để minh họa điều này, có thể tham khảo biểu đồ trong Hình 5 [4].

Điều này khẳng định rằng nhiệt độ có tác động lớn đến ứng xử của vật liệu bê tông asphalt. Vì vậy, trong quá trình tính toán và thiết kế, cần dựa trên kết quả nghiên cứu về trường nhiệt độ của vật liệu, tương ứng với điều kiện BĐKH từng khu vực và đặc điểm vật liệu địa phương, để lựa chọn các thông số đầu vào phù hợp. Đây là một vấn đề cần được quan tâm nghiêm túc trong việc rà soát, chỉnh sửa, bổ sung các quy phạm, tiêu chuẩn, chỉ dẫn thiết kế, thi công, và khai thác mặt đường bê tông nhựa trong tương lai.



Hình 5. Sự biến thiên mô đun đàn hồi của BTN theo nhiệt độ tính toán

Kết luận – kiến nghị

Dưới tác động của các kịch bản BĐKH, trong mùa nắng nóng tại Việt Nam nói chung và khu vực đồng bằng Bắc Bộ nói riêng, nhiệt độ cao nhất tại bề mặt và bên trong lớp BTN có thể vượt ngưỡng khuyến cáo của các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Điều này có thể dẫn đến những bất cập trong việc lựa chọn thông số đầu vào cho vật liệu, đòi hỏi cần có các nghiên cứu nghiêm túc, quy mô lớn để làm cơ sở cập nhật và bổ sung các tài liệu pháp lý chuyên ngành trong tương lai.

Các tính toán lý thuyết hiện nay chủ yếu mang tính định hướng ban đầu, do chưa tính đến đầy đủ tác động của các yếu tố thực tế như gió, mưa, độ ẩm và hiệu ứng đảo nhiệt đô thị. Vì vậy, để có được đánh giá chính xác hơn về trường nhiệt độ trong lớp BTN của mặt đường ô tô và sân bay, cần triển khai các nghiên cứu thực nghiệm quy mô lớn, dài hạn và toàn diện.

Tài liệu tham khảo

[1]. Nguyễn Hồng Hải, Trần Thị Thu Thảo, Hoàng Văn Tỉnh, Tôn Thất Bảo Nam, Huỳnh Ngọc Hùng, *Phân bố nhiệt trong mặt đường bê tông nhựa: thực nghiệm và mô phỏng số,* Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, Vol 20/2022.

[2]. TS. Nguyễn Thống Nhất, NCS. Trần Văn Thiện, *Phân bố nhiệt trong bê tông nhựa khu vực Nam Bộ,* Tạp chí GTVT số tháng 01/2016.

[3]. TS. Nguyễn Thống Nhất, ThS Trần Văn Thiện, *Nhiệt độ tính toán lớp mặt đường bê tông nhựa trong kết cấu áo đường mềm khu vực Nam Bộ và một số kiến nghị,* Tạp chí GTVT số tháng 8/2016.

[4]. GS.TS Phạm Cao Thăng, *Tính toán thiết kế các kết cấu mặt đường*, Nhà xuất bản Xây dựng, 2014.

[5]. Bộ Tài Nguyên và Môi trường, *Kịch bản biến đổi khí hậu 2020*, Năm 2020

[6]. TCCS 38:2022, *Áo đường mềm – các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế,* Bộ giao thông vận tải, 2022.

[7]. Usama B. Ayasrah, Laith Tashman, Aslam AlOmari, Ibrahim Asi, *Development of a temperature prediction model for flexible pavement structures*, Cases studies in Construction Materials, Elsevier 18/2023.

[8]. Nhiệt độ lấy từ nguồn: https://vi.weatherspark.com/

A study on the temperature field calculation in asphalt concrete pavement in hanoi under the 2020 Vietnam climate change scenario

Abtract: *Asphalt concrete (AC), also known as asphalt pavement, is a viscoelastic material whose mechanical properties vary depending on the environmental temperature. Therefore, to design pavement structures incorporating this material, it is essential to obtain mechanical property data corresponding to the design temperature. In other words, it is necessary to understand the temperature distribution along the depth of the material layer. Furthermore, climate change, particularly global warming, significantly impacts various aspects of societal activities, including infrastructure design. In this study, the authors collected and analyzed temperature data from the 7 hottest consecutive days recorded in the Hanoi area, based on the 2020 climate change scenario provided by Vietnam's Ministry of Natural Resources and Environment. This data served as the basis for solving the heat transfer problem within the AC pavement structure using the Finite Element Method (FEM), considering the temperature-dependent thermal properties of the material. Based on the resulting temperature field within the pavement structure, the authors propose several design temperatures for asphalt concrete pavements that are appropriate for the local climate conditions.*

Keyword: asphalt pavement, asphalt concrete, transfer heat, temperature fiels, finite element

Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến cường độ nén của vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC

Nguyễn Hoàng Long[1], Mai Viết Chinh[2], Phạm Đức Tiệp[3]

[1]Hệ quản lý học viên đào tạo sau đại học – Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2]Bộ môn XD Nhà & CTCN – Viện Kỹ thuật CTĐB – Học viện Kỹ thuật Quân sự

[3]Bộ môn Cơ sở Kỹ thuật Công trình – Viện Kỹ thuật CTĐB – Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: maivietchinh@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến cường độ chịu nén của vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC. Trên cơ sở lý thuyết về bê tông siêu tính năng và vai trò của cốt sợi trong việc cải thiện các tính chất cơ học của bê tông, nghiên cứu tiến hành thí nghiệm với các mẫu UHPC có hàm lượng cốt sợi khác nhau, bao gồm 0%, 0.5%, 1%, 2%, 2.5%, 3%, 4%. Từ đó, cường độ nén của UHPC với các trường hợp hàm lượng sợi khác nhau trong ma trận vật liệu đã được xác định. Kết quả cho thấy hàm lượng thể tích sợi từ 1-2% là khoảng tối ưu, nơi cường độ chịu nén của UHPC đạt mức cải thiện cao nhất cũng như tiết kiệm chi phí vật liệu sợi, vốn là thành phần đắt nhất trong bê tông UHPC. Nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế thành phần và ứng dụng vật liệu UHPC trong thực tế xây dựng.

***Từ khóa**: Bê tông siêu tính năng UHPC; cốt sợi; cường độ nén; thí nghiệm nén*

1. Đặt vấn đề

1.1. Mục đích, yêu cầu

Trong những năm gần đây, vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC đang dần khẳng định được vị thế trong ngành xây dựng với nhiều ứng dụng quan trọng [1-3]. Được coi là loại vật liệu bê tông tiên tiến nhất, với đặc tính vượt trội so với bê tông thường như cường độ kéo nén, khả năng chống thấm và chống ăn mòn cao, UHPC đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều dự án xây dựng lớn trên thế giới và cả ở Viêt Nam, đặc biệt ở những công trình yêu cầu khả năng chịu lực lớn, trong điều kiện ăn mòn hoặc xâm thực cao [4-6].

Bài báo có tiêu đề "Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến cường độ nén của vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC" được xây dựng với mục đích chính là xác định vai trò và ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi trong việc cải thiện cường độ nén của vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC. Trong thực tiễn xây dựng hiện đại, UHPC là một loại vật liệu tiên tiến có tính năng cơ học vượt trội, nhưng việc tối ưu hóa các thành phần trong hỗn hợp vật liệu, đặc biệt là cốt sợi, vẫn còn nhiều thách thức cần được nghiên cứu sâu hơn. Thông qua việc, đánh giá mức độ ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến đặc tính cường độ nén: Từ việc thay đổi tỷ lệ cốt sợi (0%, 0.5%, 1%, 2%, 2.5%, 3%, 4%), nghiên cứu sẽ đưa ra dữ liệu thực nghiệm nhằm xác định mối quan hệ giữa hàm lượng cốt sợi và cường độ nén của

UHPC. Kết quả nghiên cứu không những giúp nâng cao kiến thức về hàm lượng cốt sợi tối ưu mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế hỗn hợp UHPC phù hợp với các yêu cầu thực tiễn trong xây dựng và công trình xây dưng.

Để đạt được mục đích trên, nghiên cứu đặt ra một các yêu cầu cụ thể như sau: Xây dựng phương pháp thí nghiệm đáng tin cậy, thiết kế và tiến hành các thí nghiệm nén tiêu chuẩn với mẫu UHPC có hàm lượng cốt sợi khác nhau. Đảm bảo các thông số kỹ thuật, điều kiện thí nghiệm phù hợp với tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia hoặc quốc tế, ví dụ TCVN hoặc ASTM, nhằm đảm bảo tính chính xác và khách quan của kết quả. Việc thu thập dữ liệu thực nghiệm đươc thực hiện trên các mẫu bê tông UHPC. Ghi nhận kết quả từ mỗi mẫu thí nghiệm để đánh giá sự thay đổi cường độ nén theo hàm lượng cốt sợi. Từ các kết quả đạt được, tiến hành phân tích vai trò cụ thể của cốt sợi trong việc cải thiện đặc tính cơ học của UHPC, đồng thời lý giải các yếu tố ảnh hưởng như tương tác giữa cốt sợi và ma trận bê tông.

1.2. Mục tiêu nghiên cứu

Xác định ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến cường độ nén của UHPC, phân tích sự thay đổi về cường độ nén khi tăng hoặc giảm hàm lượng cốt sợi, từ đó hiểu rõ vai trò của cốt sợi trong việc tăng cường cường độ chịu nén của UHPC.

1.3. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm được sử dụng trong nghiên cứu này. Cụ thể, các mẫu bê tông UHPC được chế tạo với các hàm lượng cốt sợi khác nhau để đánh giá sự thay đổi về cường độ nén. Quy trình bao gồm việc chuẩn bị vật liệu, trộn hỗn hợp bê tông, đúc và bảo dưỡng mẫu theo tiêu chuẩn, sau đó tiến hành thí nghiệm nén trên các mẫu này. Dữ liệu thu thập được từ thực nghiệm giúp phân tích và đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến khả năng chịu nén của vật liệu UHPC, từ đó đưa ra các kết luận và khuyến nghị phù hợp.

2. Cơ sở lý thuyết

Cốt sợi thép đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường khả năng chịu lực của UHPC thông qua các cơ chế sau:

Hạn chế sự phát triển vết nứt: Khi UHPC chịu tải trọng nén cao, sự hình thành và phát triển của các vết nứt là nguyên nhân chính gây suy giảm cường độ. Cốt sợi thép phân tán đều trong hỗn hợp giúp "khâu" các vết nứt, làm chậm quá trình mở rộng và lan truyền của chúng. Điều này giúp duy trì tính toàn vẹn của kết cấu, đặc biệt khi tải trọng vượt ngưỡng nứt ban đầu [7, 8].

Phân tán ứng suất cục bộ: Trong quá trình chịu nén, các vùng ứng suất tập trung cục bộ có thể gây ra phá hủy tại chỗ. Sự có mặt của cốt sợi thép làm phân tán ứng suất này sang các vùng lân cận, giảm nguy cơ phá hủy đột ngột và cải thiện cường độ tổng thể của UHPC [9, 10].

Cải thiện sự gắn kết giữa các pha vật liệu: Cốt sợi thép tạo sự liên kết tốt hơn giữa các pha xi măng và hạt cốt liệu, từ đó làm tăng khả năng chịu lực của bê tông [11, 12].

3. Vật liệu và tạo mẫu

3.1. Vật liệu đầu vào

Tiêu chuẩn Xi măng Pooc lăng hỗn hợp thông dụng TCVN 6260 : 2009. PC40 có các tính chất cơ lý trình bày ở bảng 1, với đường kính hạt trung bình khoảng 14μm. Các tính chất cơ bản được trình bày trong bảng 1. Cốt liệu mịn bao gồm cát sông tự nhiên, được sàng lọc và phân loại, với mô đun độ mịn là 1,3.

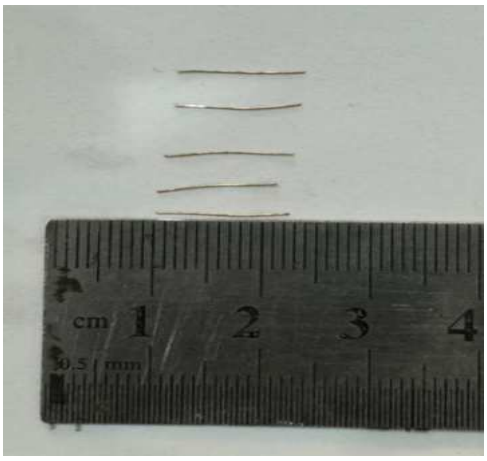
Bảng 1. Các tính chất cơ bản của xi măng Póc lăng PC40 dùng trong bê tông UHPC

Tính chất	Đơn vị	Giá trị	Quy phạm	Phương pháp thí ngiệm
Độ mịn				
Lượng sót sàng 0,09mm	%	2,1	≤ 10	
Độ mịn Blaine	cm^2/g	338,0	≥ 2800	TCVN 4030-2003
Độ dẻo tiêu chuẩn	%	29,0	-	TCVN 6017-1995
Giới hạn bền nén				
Sau 3 ngày	MPa	26,4	≥ 21,0	
Sau 28 ngày		49,6	≥ 40,0	TCVN 6016-1995

Các tính chất của sợi thép được trình bày chi tiết trong Bảng 2. Đây là thành phần quan trọng góp phần nâng cao cường độ của UHPC, đặc biệt trong các điều kiện chịu tải trọng động và tác động khắc nghiệt. Sợi thép SF13 có đường kính 0,2 mm, kích thước rất nhỏ giúp sợi thép phân bố đồng đều trong ma trận bê tông. Đường kính nhỏ giúp giảm hiện tượng kết tụ sợi khi trộn, tăng tính đồng nhất của hỗn hợp bê tông, từ đó cải thiện đáng kể các đặc tính cơ học của vật liệu UHPC. Sợi thép SF13 có chiều dài 13 mm, kích thước vừa đủ để đảm bảo khả năng neo và liên kết với ma trận bê tông. Độ dài này được lựa chọn cẩn thận để đạt hiệu quả gia cường tốt nhất, vừa giúp cầu nối các vết nứt vi mô, vừa không làm giảm tính công tác của bê tông khi trộn và đổ [13]. Sợi thép có cường độ kéo rất cao, đạt 2900 MPa, vượt xa so với các loại thép thông thường. Sợi thép SF13 có hình dạng thẳng (Hình 1), giúp dễ dàng trộn lẫn vào hỗn hợp bê tông mà không gây cản trở quá trình trộn hay làm giảm tính công tác của bê tông.

Bảng 2. Sợi thép đưa vào trong hỗn hợp bê tông siêu tính năng UHPC

Sợi thép	Đường kính (mm)	Chiều dài (mm)	Tỷ lệ chiều dài / đường kính	Cường độ kéo (MPa)	Hình dạng
SF13	0,2	13	65	2900	Thẳng



Hình 1. Minh họa sợi thép dùng trong bê tông UHPC

Trên Bảng 3 thể hiện tỉ lệ cấp phối UHPC với các hàm lượng sợi khác nhau. Hàm lượng cốt sợi thép được thay đổi theo các mức: 0%, 0,5%, 1%, 2%, 2,5%, 3%, và 4%. Lượng nước sử dụng là 162 kg/m³, đảm bảo tỷ lệ nước/xi măng rất thấp (dưới 0,3), giúp tạo ra cấu trúc bê tông đặc chắc, ít lỗ rỗng và cường độ cao. Xi măng chiếm 886 kg/m³, đây là thành phần chính giúp cung cấp cường độ nén cao cho UHPC. Tro bay với lượng 222 kg/m³ được sử dụng làm phụ gia khoáng hoạt tính, cải thiện tính chất lưu biến và giảm nhiệt hydrat hóa, đồng thời góp phần tăng tính bền lâu của bê tông. Cát hạt mịn chiếm 1109 kg/m³, đảm bảo hỗn hợp có độ đặc chắc cao và cải thiện tính công tác của bê tông UHPC. Phụ gia siêu dẻo được sử dụng với tỷ lệ 39,5% (theo khối lượng xi măng), giúp cải thiện đáng kể độ chảy lỏng của hỗn hợp bê tông, đảm bảo tính đồng nhất và dễ dàng trong quá trình đổ khuôn.

Bảng 3. Tỉ lệ cấp phối dùng cho bê tông UHPC với các hàm lượng sợi khác nhau

Hàm lượng cốt sợi theo thể tích	**Lượng vật liệu cho 1m³ bê tông UHPC**				
	Nước (kg)	**Xi măng (kg)**	**Tro bay (kg)**	**Cát hạt mịn (kg)**	**Phụ gia siêu dẻo (%)**
0%, 0.5%, 1%, 2%, 2.5%, 3%, 4%	162	886	222	1109	39,5

3.2. Quy trình tạo mẫu

Hỗn hợp UHPC dạng khô được cho vào trong máy trộn. Đầu tiên, các vật liệu khô bao gồm xi măng, cát mịn, tro bay, và các hạt độn được đưa vào máy trộn, như minh họa trên Hình 2.Trộn đều các thành phần khô trong khoảng 3-5 phút để đảm bảo sự phân bố đồng đều của các hạt và tránh vón cục. Sau khi các vật liệu khô đã trộn đều, từ từ cho nước và phụ gia siêu dẻo (superplasticizer) vào hỗn hợp (Hình 3). Tiếp tục trộn hỗn hợp với tốc độ chậm ban đầu, sau đó tăng dần tốc độ để đạt được độ đồng nhất và tính dẻo mong muốn. Giai đoạn này cần kiểm soát lượng nước cẩn thận để đảm bảo tỷ lệ nước/xi măng (w/c) thấp, đặc trưng cho UHPC. Sau khi đạt được hỗn hợp đồng nhất, cho sợi thép phân tán vào. Trộn ở tốc độ thấp để đảm bảo các sợi thép phân bố đều trong hỗn hợp mà không bị vón cục hay lắng đọng. Quá trình này cần thực hiện nhẹ nhàng để tránh làm hư hại hoặc gãy các sợi thép (Hình 4).



Hình 2. Trộn khô hỗn hợp UHPC



Hình 3. Bổ sung phụ gia siêu dẻo và nước vào hỗn hợp khô



Hình 4. Bổ sung sợi thép vào trong hỗn hợp UHPC



Hình 5. Minh họa hỗn hợp UHPC sau khi đạt độ dẻo cần thiết

Trộn hỗn hợp thêm 2-3 phút để kiểm tra độ đồng nhất lần cuối, như minh họa trên Hình 5. Sau đó, hỗn hợp bê tông UHPC đã sẵn sàng để đổ khuôn và tiến hành các bước tạo hình, bảo dưỡng tiếp theo (Hình 6). Thời gian và tốc độ trộn ở mỗi bước cần được điều chỉnh phù hợp với thiết bị trộn và yêu cầu của vật liệu. Quá trình phải đảm bảo không bị mất nước

hoặc làm thay đổi tỷ lệ phối trộn ban đầu. Tổng cộng có 14 mẫu lập phương 10x10x10cm được đúc.



Hình 6. Tạo mẫu kiểm tra cường độ nén

4. Kết quả thí nghiệm



Hình 7. Thí nghiệm kiểm tra cường độ nén của bê tông UHPC

Máy thí nghiệm nén: Sử dụng máy nén thủy lực đạt tiêu chuẩn, có độ chính xác cao, đảm bảo khả năng đo lực nén tối đa phù hợp với cường độ UHPC. Trước khi làm thí nghiệm

nén, bề mặt của mẫu và tấm ép của máy nén sạch được làm vệ sinh sạch, phẳng, và không có dị vật. Sau đó đặt mẫu lập phương vào vị trí trung tâm của bàn nén, như minh họa trên Hình 7. Mẫu được đặt đúng trục để đảm bảo lực nén tác dụng đều lên toàn bộ mẫu. Mẫu bắt đầu được nén với tốc độ tăng tải không đổi, thường khoảng 0.5 MPa/s đến 1 MPa/s. Lực nén lớn nhất tại thời điểm mẫu bị phá hủy.



Hình 8. Minh họa các mẫu điển hình sau thí nghiệm nén



Hình 9. Các sợi thép trong mẫu sau phá hoại

Hình 8 và 9 thể hiện mô hình phá hủy của mẫu lập phương kích thước 10x10x10 cm bằng bê tông siêu tính năng (UHPC) sau thí nghiệm nén. Bề mặt mẫu xuất hiện mạng lưới các vết nứt giao nhau lan rộng trên bề mặt. Các vết nứt này cho thấy mẫu đã chịu ứng suất lớn trong quá trình thí nghiệm. Các vết nứt thể hiện cơ chế phá hủy đồng nhất đặc trưng của

UHPC khi chịu nén. Các vết nứt bắt đầu từ các góc và cạnh của mẫu, sau đó lan vào phần lõi. Một số phần bề mặt đã bị phân mảnh, tạo thành các mảnh riêng biệt nhưng vẫn liên kết với nhau. Hiện tượng này phù hợp với tính chất cường độ cao và sự dẻo đặc trưng của UHPC. Một số sợi thép được nhìn thấy rõ ràng trong các vết nứt trên bề mặt mẫu. Các sợi này đóng vai trò như cầu nối giữa các vết nứt, thể hiện vai trò của chúng trong việc gia tăng khả năng chịu kéo và kiểm soát độ rộng của vết nứt. Hiện tượng này làm nổi bật đóng góp của sợi thép trong việc cải thiện tính dẻo sau nứt của vật liệu.

Công thức để tính cường độ chịu nén viên mẫu bê tông là:

$$f = \alpha(P/A) \quad (1)$$

Trong đó:

P: Là tải trọng phá hoại bê tông.

A: Diện tích chịu lực nén viên bê tông mẫu.

α: Hệ số tính đổi (với mẫu lăng trụ 10 cm × 10 cm × 10 cm thì α = 0.91)

f: Cường độ chịu nén viên bê tông mẫu.

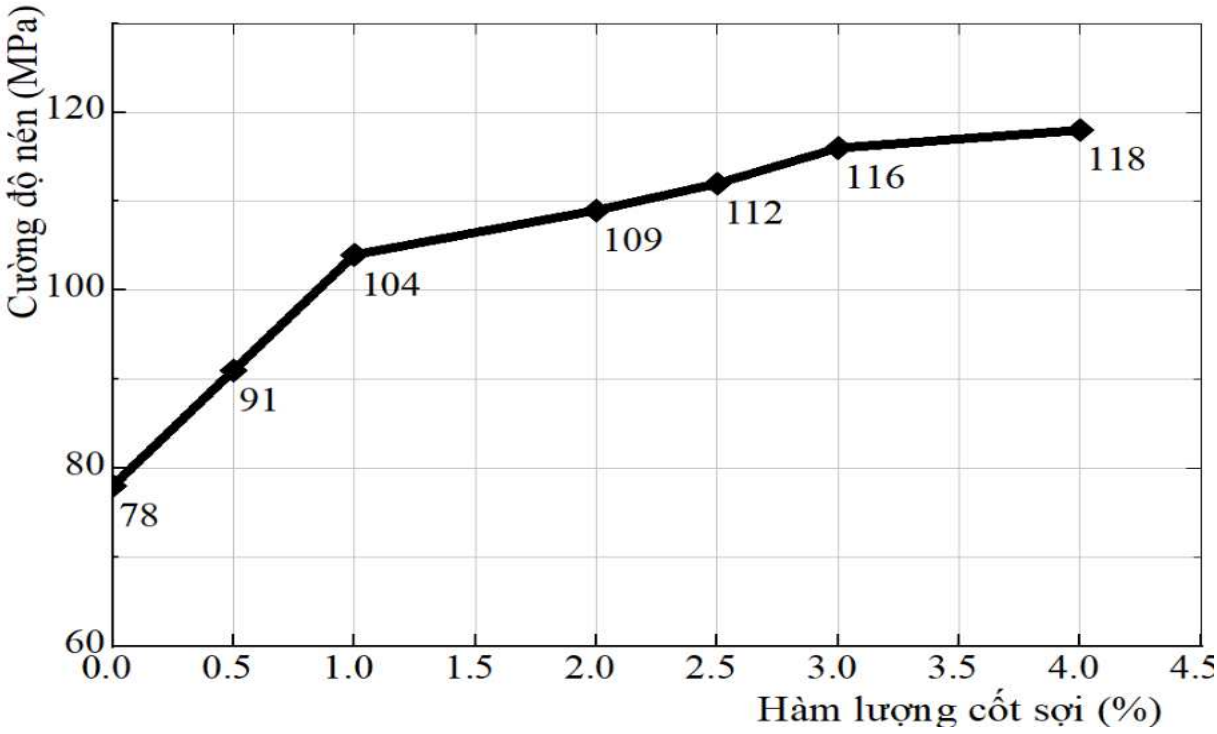
Bảng 4 thể hiện kết quả thí nghiệm cường độ nén bê tông UHPC. Hàm lượng cốt sợi (%) trong mỗi loại cấp phối mẫu, bao gồm các mức 0%, 0.50%, 1%, 2%, 2.50%, 3%, và 4%. Mỗi loại hàm lượng cốt sợi được thí nghiệm nén 2 mẫu. Giá trị cường độ trung bình được tính từ kết quả của hai mẫu. Cường độ chịu nén kể đến hệ số quy đổi α với mẫu lập phương kích thước 10 cm × 10 cm × 10 cm. Ngoài ra, độ chênh lệch giữa các mẫu (Mẫu 1 và Mẫu 2) trong cùng một hàm lượng cốt sợi là khá nhỏ, cho thấy sự đồng nhất trong quá trình thí nghiệm. Ví dụ, ở 0% cốt sợi: chênh lệch là 5.1 MPa (88.2 - 83.1). Ở 4% cốt sợi: chênh lệch là 8.4 MPa (133.9 - 125.5). Điều này chứng tỏ mẫu thí nghiệm được chuẩn bị tốt, và sai số giữa các mẫu nằm trong mức chấp nhận được.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm cường độ nén bê tông UHPC

STT	**Hàm lượng cốt sợi (%)**	**Cường độ chịu nén thu được từ thí nghiệm (MPa)**			**Cường độ chịu nén kể đến hệ số quy đổi α**
		Mẫu 1	**Mẫu 2**	**Trung bình**	
1	0%	83.1	88.2	85.7	78
2	0.5%	96.6	103.6	100.1	91
3	1%	109.3	118.5	113.9	104
4	2%	113.7	125.2	119.5	109
5	2.5%	118.5	128.3	123.4	112
6	3%	121.3	133.5	127.4	116
7	4%	125.5	133.9	129.7	118

Bảng 5. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến cường độ chịu nén của bê tông siêu tính năng UHPC

STT	Hàm lượng cốt sợi (%)	Cường độ chịu nén từ thí nghiệm (MPa)	Sự gia tăng cường độ (%)
1	0%	78	//
2	0.5%	91	17
3	1%	104	14
4	2%	109	5
5	2.5%	112	3
6	3%	116	3
7	4%	118	2



Hình 10. Đồ thị ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi thép đến cường độ nén của bê tông siêu tính năng UHPC

Bảng 5 và đồ thị Hình 10 minh họa ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi thép đến khả năng chịu nén của bê tông siêu tính năng UHPC. Khi hỗn hợp UHPC không có sợi thép, giá trị cường độ nén là 78 MPa. Cường độ nén của UHPC tăng 17%, lên 91 MPa khi hàm lượng sợi tăng lên 0.5%. Tuy nhiên mức tăng từ 1% đến 2% giảm xuống còn lần lượt là 14% và 5%. Khi tiếp tục tăng hàm lượng cốt sợi lên lần lượt là 2.5, 3 và 4%, mức tăng cường độ nén của

bê tông UHPC còn rất nhỏ, lần lượt là 3% và 2%. Ở hàm lượng cốt sợi thép thấp (khoảng 0.5% thể tích), sợi thép có tác dụng cải thiện đáng kể cường độ chịu nén của UHPC so với bê tông không sử dụng cốt sợi. Ở mức này, hiệu quả cải thiện chủ yếu do sự phân tán ứng suất và hạn chế các vết nứt nhỏ, thay vì tăng cường cấu trúc tổng thể. Khi hàm lượng cốt sợi thép tăng lên mức trung bình (khoảng 1-2% thể tích), cường độ chịu nén của UHPC đạt được mức cải thiện tối ưu. Ở giai đoạn này, sự kết hợp giữa các sợi thép tạo ra một mạng lưới hiệu quả, giúp ngăn chặn và kiểm soát tốt hơn sự lan rộng của các vết nứt. Đồng thời, các sợi thép ở mức này không gây ra hiện tượng giảm tính đồng nhất của hỗn hợp bê tông, giữ được cấu trúc chặt chẽ và hiệu quả truyền tải ứng suất cao. Nếu hàm lượng cốt sợi thép vượt ngưỡng 2% thể tích, hiệu quả cải thiện cường độ chịu nén có xu hướng giảm dần. Nguyên nhân chính là do khả năng phân tán kém. Khi lượng cốt sợi thép quá lớn, sự phân tán đồng đều trong hỗn hợp trở nên khó khăn, dẫn đến hiện tượng vón cục hoặc tập trung cục bộ. Điều này gây ra các điểm yếu trong cấu trúc vật liệu, làm giảm khả năng chịu lực tổng thể. Ngoài ra, khi hàm lượng cốt sợi quả lớn sẽ dẫn đến sự tăng lỗ rỗng trong hỗn hợp. Hàm lượng cốt sợi thép cao có thể làm tăng tỷ lệ lỗ rỗng trong bê tông do sự cản trở trong quá trình trộn và đổ khuôn. Các lỗ rỗng này làm giảm mật độ vật liệu và cản trở sự truyền ứng suất, dẫn đến giảm cường độ chịu nén. Hàm lượng sợi quá cao cũng làm giảm tính dẻo của hỗn hợp. Hàm lượng sợi thép quá cao cũng ảnh hưởng đến tính thi công của UHPC, khiến hỗn hợp trở nên cứng hơn, khó đầm và làm mất khả năng lấp đầy các khoảng trống trong khuôn. Sự cân bằng giữa hàm lượng cốt sợi thép và cường độ chịu nén để đạt được cường độ chịu nén tối ưu, hàm lượng cốt sợi thép thường dao động từ 1-2% thể tích. Ở mức này, UHPC có sự cân bằng tốt nhất giữa khả năng chịu nén và tính toàn vẹn cấu trúc, đồng thời giữ được tính đồng nhất và mật độ cao của vật liệu.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi thép đến cường độ chịu nén của bê tông siêu tính năng UHPC. Các kết quả đạt được cho thấy việc bổ sung cốt sợi ở mức 0.5% giúp tăng cường độ chịu nén lên 17% so với trường hợp không có cốt sợi. Với hàm lượng cốt sợi trung bình từ 1-2% là khoảng hàm lượng tối ưu, nơi cường độ chịu nén của UHPC đạt mức cải thiện cao nhất. Ở mức này, UHPC không chỉ đạt được cường độ nén tối đa mà còn đảm bảo tính đồng nhất và tính công tác. Khi hàm lượng cốt sợi vượt quá 2%, hiệu quả cải thiện cường độ nén giảm dần do các vấn đề như vón cục, tăng tỷ lệ lỗ rỗng, và giảm tính dẻo của hỗn hợp.

Tài liệu tham khảo

1. Việt, H.H., *Thực nghiệm và mô phỏng ứng xử chịu kéo của bê tông siêu tính năng.* Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 2023. **74**(6): p. 709-717.
2. Liêm, N.D., N.H.T. Tài, and P.Đ. Cường, *Nghiên cứu thực nghiệm và thiết lập các mô hình phá hoại khác nhau của bê tông tính năng cao dưới điều kiện nén hạn chế nở hông.* Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng -ĐHXDHN, 2022. **16**(2V): p. 65-76.
3. Duy, P.T., et al., *Nghiên cứu ứng xử cơ-điện của bê tông tính năng cao dưới tải trọng uốn trùng phục.* Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng -ĐHXDHN, 2023. **17**(4V): p. 34-48.
4. VIỆT, T.T.B., *Nghiên cứu công nghệ bê tông siêu tính năng (UHPC) ứng dụng để thiết kế chế tạo dầm cầu tiết diện chữ U, nhịp 50m.* 2022.

5. Thường, N.T. and H.V. Hải, *Nghiên cứu khả năng kháng uốn của bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép dưới tác dụng của tải trọng động.* Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2021. **63**(3).
6. Tấn, T.V., et al., *Hiệu quả ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao cho công trình cầu nghiên cứu cho cầu dân sinh An Thượng-Thành phố Hưng Yên.* Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng -ĐHXDHN, 2020. **14**(1V): p. 46-59.
7. Việt, T.B., *Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến các tính chất của bê tông tính năng siêu cao.* Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2015. **57**(7).
8. Thường, N.T., *Nghiên cứu áp dụng bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép vào các công trình giao thông.* 2024.
9. Que, Z., et al., *Predicting the tensile strength of ultra-high performance concrete: New insights into the synergistic effects of steel fiber geometry and distribution.* Construction and Building Materials, 2024. **444**: p. 137822.
10. Luo, X., et al., *Fiber content optimization of UHPC and R-UHPC oriented to tensile behavior and cost reduction.* Construction and Building Materials, 2023. **395**: p. 132314.
11. Khan, M., et al., *Influence of high temperatures on the mechanical and microstructural properties of hybrid steel-basalt fibers based ultra-high-performance concrete (UHPC).* Construction and Building Materials, 2024. **411**: p. 134387.
12. Gong, J., et al., *Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review.* Composites Part B: Engineering, 2022. **241**: p. 109995.
13. Yoo, D.-Y., N. Banthia, and Y.-S. Yoon, *Recent development of innovative steel fibers for ultra-high-performance concrete (UHPC): A critical review.* Cement and Concrete Composites, 2024. **145**: p. 105359.

Experimental investigation on the influence of steel fiber content on the compressive strength of ultra high performance concrete (UHPC)

Abstract: *Current work investigates the effect of steel fiber content on the compressive strength of ultra high performance concrete (UHPC). Grounded in the theoretical principles of UHPC and the role of fibers in enhancing the mechanical properties of concrete, the study conducted experiments on UHPC specimens with varying fiber content, including 0%, 0.5%, 1%, 2%, 2.5%, 3%, and 4%. The compressive strength of UHPC was determined for each fiber content variation within the material matrix. The findings indicate that a fiber volume content of 1-2% represents the optimal range, achieving the highest improvement in compressive strength while simultaneously minimizing the cost of steel fibers, the most expensive component in UHPC. This study offers significant insights for the design and application of UHPC materials in construction practices.*

Keywords: Ultra high performance concrete (UHPC), steel fiber, compressive strength, compression test

Analysis of Stress-Strain State of Airport Pavement Concrete Slab Under Simultaneous Load and Temperature Effects in Vietnamese Conditions

Nguyễn Hữu Lâm[1], Nguyễn Văn Hiếu[2]

[1]Institute of Techniques Special for Engineering, [2]Le Quy Don Technical University

Email: nguyenhuulam1995@lqdtu.edu.vn; Tel: 0964603638

Abstract:

Cement concrete pavement is the primary choice for airports in Vietnam due to its advantages in strength, durability, and resistance to temperature effects. During operation, concrete slabs are subjected to simultaneous impacts from aircraft wheel loads and environmental temperature variations, including air temperature and solar radiation. Given Vietnam's climatic conditions, characterized by high annual average temperatures and significant day-night temperature fluctuations, thermal stresses generated within concrete slabs can significantly affect the stress-strain state and lifespan of the pavement. This study employs Abaqus software to analyze the stress-strain state of airport concrete pavement slabs under the combined effects of load and temperature. The research findings provide a scientific basis for the design, evaluation, and maintenance of airport pavements in Vietnam's specific climatic conditions.

Keywords: *stress-strain state, airport pavement, Abaqus.*

1. Introduction

Cement concrete pavement (CCP) is widely used at airports in Vietnam due to its superior advantages in strength and operational lifespan. Compared to other pavement types, CCP has a high load-bearing capacity, does not develop rutting, and has a long service life, reducing maintenance and repair costs during operation.

However, during operation, CCP is simultaneously subjected to multiple factors, with two primary ones being wheel load and temperature variations. Wheel loads induce mechanical stresses in the concrete slab, while temperature differentials generate thermal stresses. During the day, the combined effect of air temperature and solar radiation causes the surface temperature to rise significantly higher than the bottom of the slab, leading to upward curling. Conversely, at night, the surface temperature drops below that of the slab bottom, causing downward curling. The thermal expansion and contraction of the concrete slab are constrained by self-weight, subgrade friction, and foundation resistance, leading to the development of thermal stresses within the slab.

According to [1], the maximum surface temperature of CCP slabs can reach 65°C, resulting in a temperature gradient between the top and bottom surfaces of approximately 20°C to 25°C, which generates significant bending stresses within the slab.

In the design of CCP pavements in Vietnam, bending stresses due to temperature gradients are primarily calculated using analytical methods based on Westergaard's plate theory on a Winkler foundation [2][3][4]. However, due to the use of various simplifying assumptions, this method does not account for several critical factors in the computational model, specifically:

- Three-dimensional behavior of the system;
- Base layers between the concrete pavement slab and the subgrade;
- Contact interaction between the underside of the concrete slab and the base layer;
- The contribution of dowel bars at the joints between slabs.

To incorporate these factors into the analysis of concrete pavement, we can approach the problem using finite element modeling (FEM).

2. Numerical Simulation Model

2.1. Model Construction

The structural analysis of the cement concrete pavement (CCP) system (with dowel bars) subjected to the simultaneous effects of aircraft load and temperature is conducted through the following steps:

Step 1: The entire structural system is subjected to gravitational load.

Step 2: The entire system is subjected to the calculated aircraft load and temperature effects in two cases (the surface temperature is higher than the bottom temperature and vice versa).

The parameters of model in simulation:

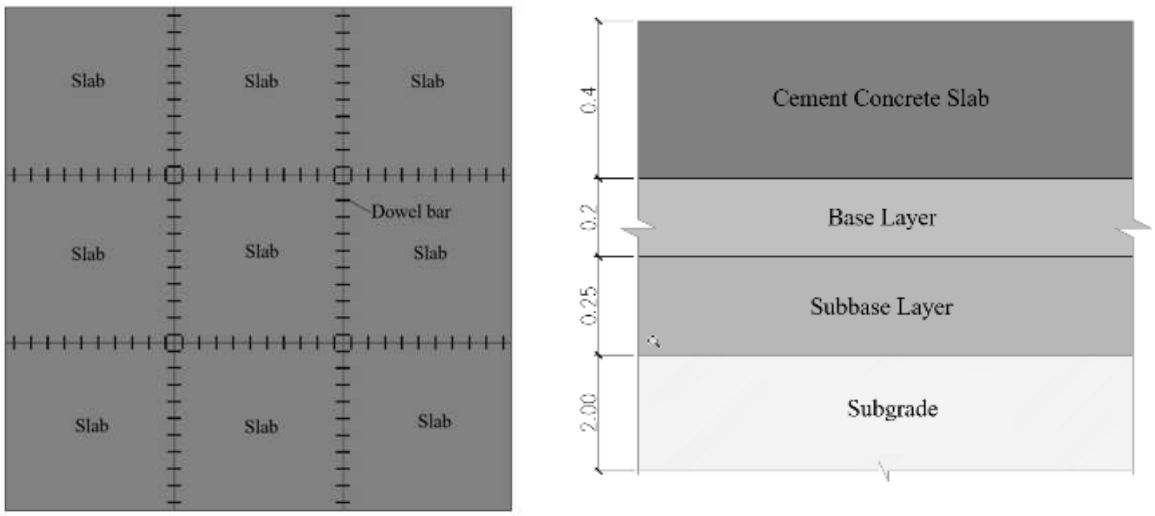


Figure 1. Plan View and Cross-Section of the Utilized Cement Concrete Pavement Structure

Table 1: Material properties

Layer	Thickness (cm)	Conductivity (J/m.h.^{o}C)	Specific heat (J/kg.^{o}C)	Density (kg/m3)
Concrete slab	40	1.8	1000	2400
Base	20	1.2	800	1500
Subbase	25	0.7	600	1800
Subgrade	200	0.2	300	1800

2.2. Model Declaration in Abaqus

a. Material Behavior

Elastic, linear, and isotropic material behavior with the following material parameters: Elastic modulus (E) and Poisson's ratio (υ) representing the material characteristics of the pavement system, including the cement concrete slab, dowel bars at the joints, and the base layers.

b. Meshing

The pavement base layers are assumed to exhibit elastic material behavior, characterized by two parameters: E (elastic modulus) and υ (Poisson's ratio). The finite element type used is C3D20R, a three-dimensional continuum element with 20 nodes, second-order displacement interpolation, and reduced integration.

For the cement concrete pavement (CCP) slab, in addition to the elastic mechanical behavior, thermal deformation effects are also considered. Therefore, the C3D20RT element type is used.

Dowel bars and tie bars are modeled using beam elements, either B31 (first-order beam elements) or B32 (second-order beam elements), depending on the displacement order of the solid elements to which they are connected. Beam elements have six degrees of freedom (translation and rotation) at each node.

When meshing the elements, node compatibility between the beam elements and the solid elements of the CCP slab must be ensured to maintain accurate force transfer across joints by aligning the three displacement components of the two different element types.

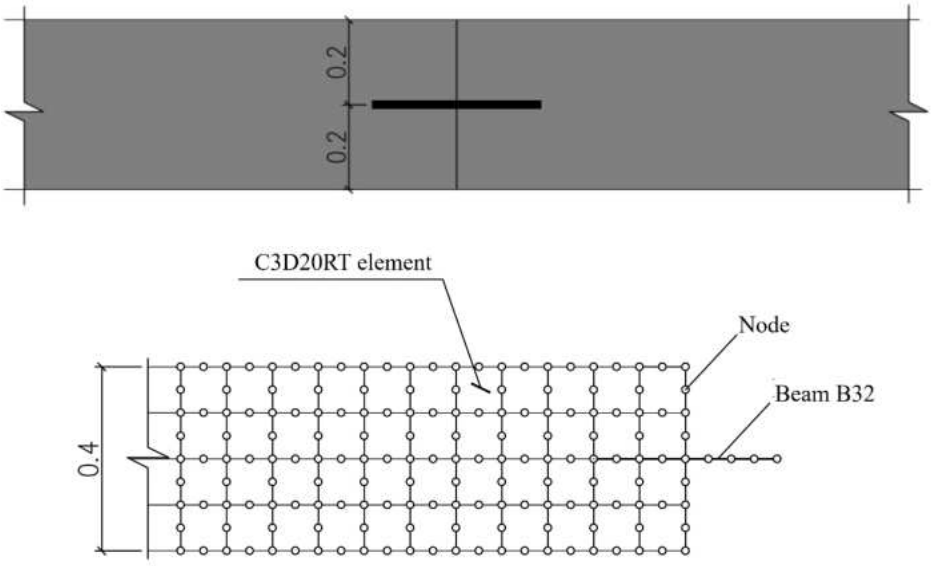


Figure 2. Finite Element Model of the Cement Concrete Pavement Slab

c. Load

The wheel load is calculated for the A321-200 aircraft, which has a maximum takeoff weight of 93,500 kg. The load distribution factor for the main landing gear is 0.475, with a four-wheel gear system and a tire pressure of 200 psi. Based on these parameters, the equivalent tire footprint radius is determined as follows:

$$R = \sqrt{\frac{P}{\pi.q}} = 0.22(m)$$

Where:

R: Equivalent tire footprint radius, m;

P: Load per wheel, N;

q: Tire pressure, N/m².

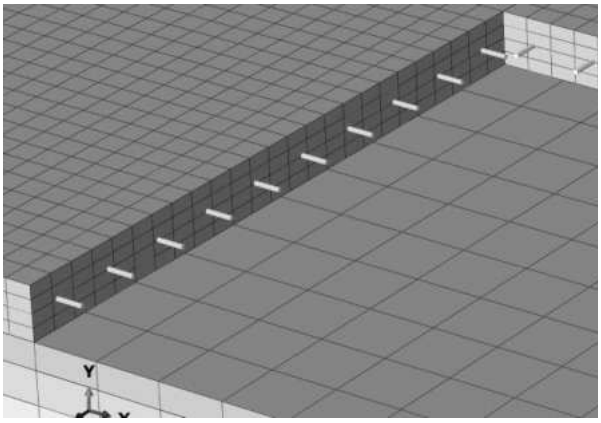


Figure 3. Dowel Bars in the Slab

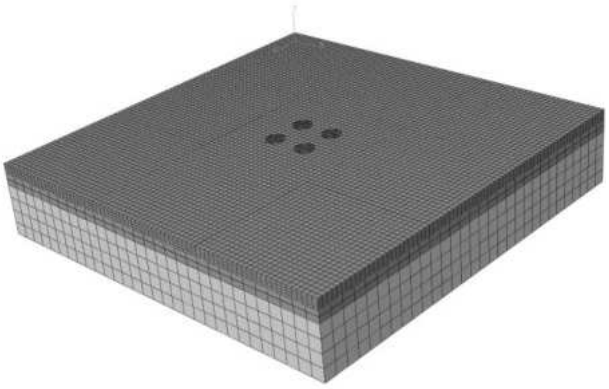


Figure 4. Load Application on the Slab

d. Interaction

The interaction between the cement concrete pavement (CCP) slab and the base layer is modeled using tangential and normal contact behavior at the interface. The contact behavior employs the "Coulomb friction" model for tangential direction and the "hard contact" model for the normal direction.

The contact behavior is characterized by the friction coefficient (μ) between the CCP slab and the base layer. According to AASHTO, the friction coefficient (μ) between two material layers typically ranges from 0.9 to 2.2. However, due to the presence of an oil-paper layer between the two materials, friction is significantly reduced, and the selected friction coefficient is 0.5.

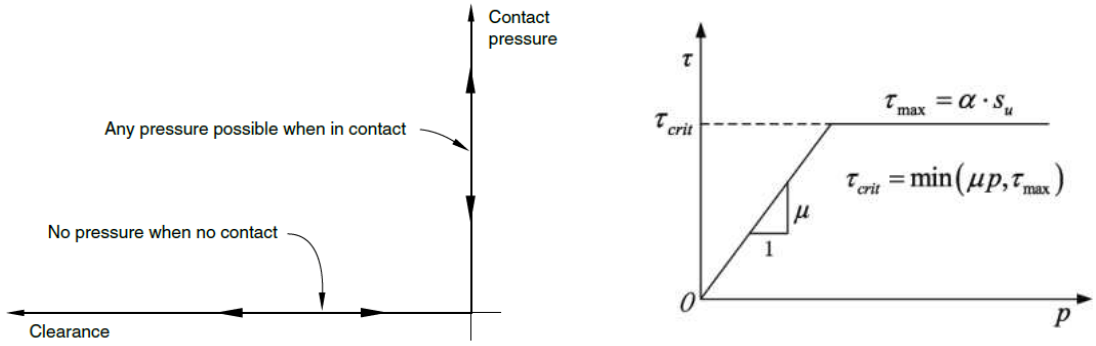


Figure 5. Interaction illustration Between the Cement Concrete Pavement Slab and the Base

e. Temperature

The temperature within the cement concrete pavement (CCP) slab is specified in layers along the slab's depth. The temperature amplitude is set at 47.6°C on the slab's surface and 20.0°C at the bottom. The temperature distribution across the CCP slab's thickness is implemented in the finite element model by assigning temperature values to all nodes. Nodes located on the same plane at any depth have identical temperature values, which are considered as temperature boundaries.

3. Result and Discussion

3.1. Temperature effect

Setting up a simulation analysis problem for a system of 09 cement concrete pavement slabs at an airport, with dowel bar connections, subjected only to temperature effects. The purpose of the simulation is to independently assess the impact of temperature on the stress-strain state of the pavement in the two most unfavorable temperature conditions: when the surface temperature is higher than the bottom temperature of the slab.

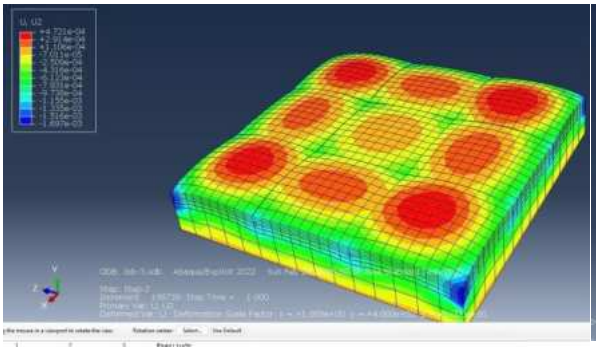


Figure 6. Case surface temperature is higher than bottom's

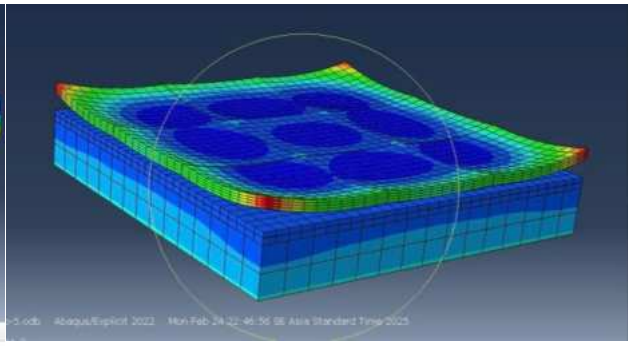


Figure 7. Case surface temperature is lower than bottom's

The analysis results indicate that the cement concrete pavement (CCP) slab experiences upward curling when the surface temperature is higher than that at the bottom of the slab. The CCP slab located at the center, connected by dowel bars to four surrounding slabs, exhibits less curling compared to slabs connected on only two or three sides.

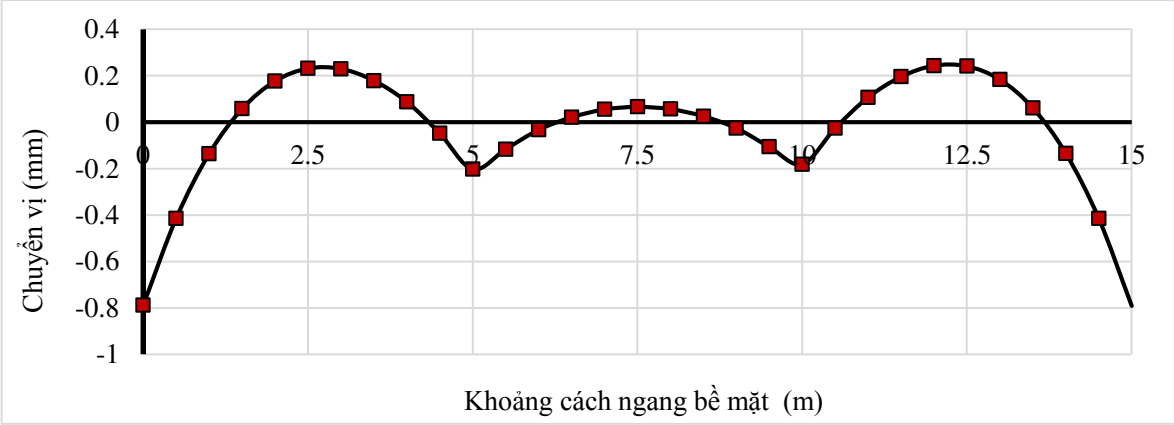


Figure 8. Graph of surface strain of the slab when surface temperature is higher than the bottom's

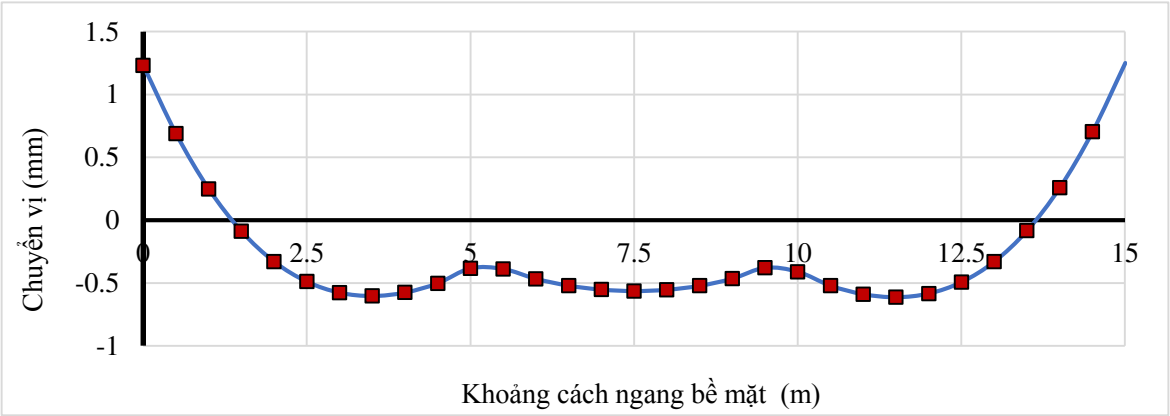


Figure 9. Graph of surface strain of the slab when surface temperature is lower than the bottom's

3.2. Load-Temperature Coupling

Perform the analysis as described in Section 3.1, while additionally incorporating the aircraft load on the concrete slab surface. The analysis results aim to assess the actual impact during the operation of the concrete slab. The most unfavorable condition occurs when the surface temperature of the concrete slab is lower than the bottom temperature and the aircraft load is applied.

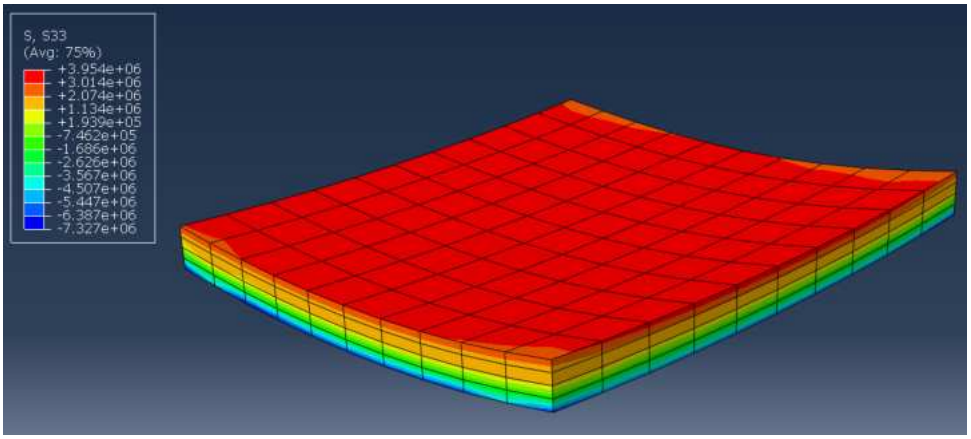


Figure 10. Stress distribution in concrete slab

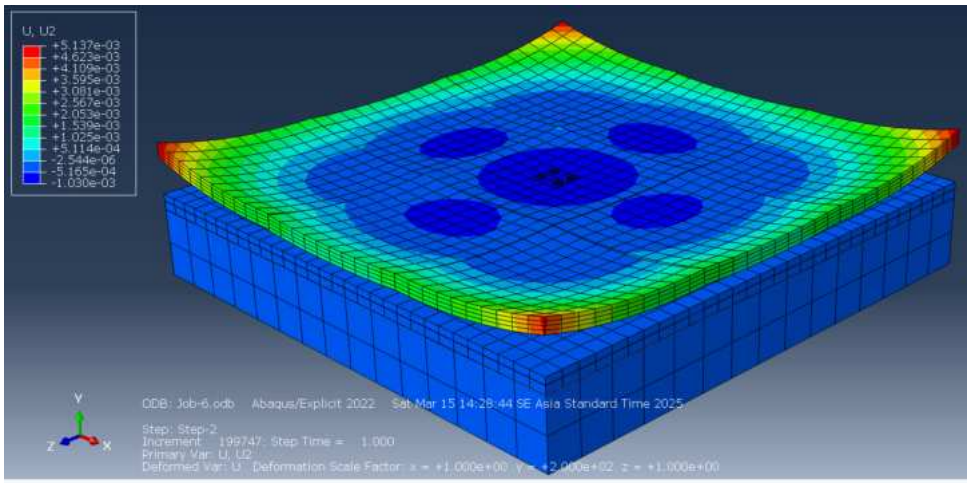


Figure 11. Vertical strain of whole model

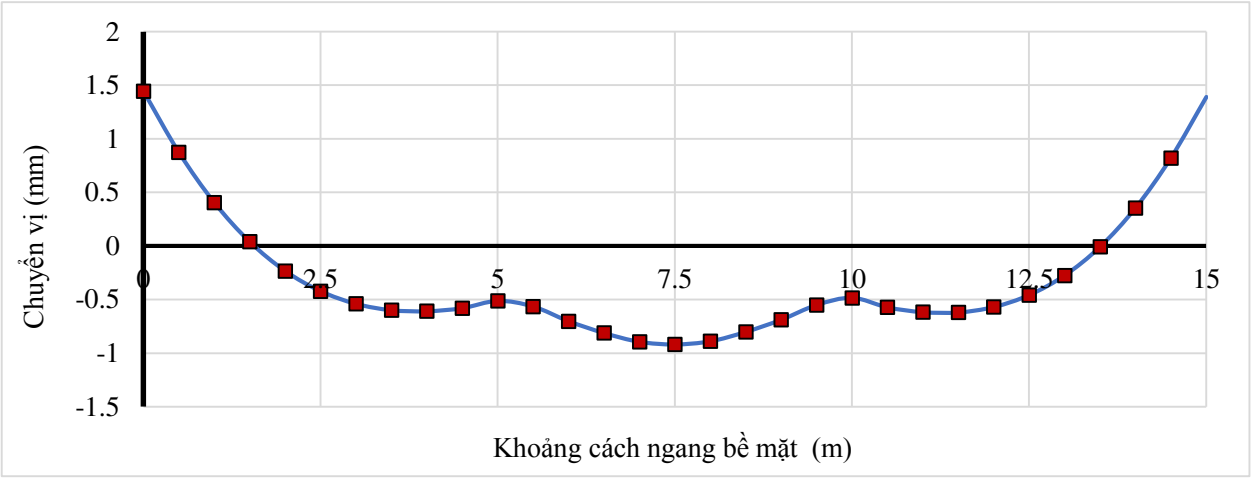


Figure 12. Graph of surface strain of whole model

When subjected to both load and temperature effects simultaneously, the cement concrete slab deflects significantly more compared to when only temperature effects are applied. At the center of the slab, the displacement value increases from approximately 0.5mm to 1mm.

4. Conclusion

This paper introduces a finite element simulation method to analyze the behavior of cement concrete pavement (CCP) slabs under the simultaneous effects of loads and temperature gradients, specifically for airport pavements. This method considers several complex factors, including: three-dimensional behavior to more accurately capture deformations and stresses within the CCP slab; the inclusion of base layers, which affect the slab's load-bearing capacity and deformation; contact interactions to elucidate the mechanisms of thermal stress development; and dowel bars, which play a crucial role in force transmission and reducing stress concentrations.

References

1. Hoang, Tuan & Thạch, Phạm. (2022). Mô phỏng ứng xử của tấm mặt đường bê tông xi măng do chênh lệch nhiệt độ giữa hai bề mặt tấm (Numerical simulation of concrete pavement response to temperature gradients). 11. 24-33. 10.55228/JTST.11(2).24-33.
2. Maitra, Swati & Reddy, K. & Ramachandra, Ls. (2013). Estimation of Critical Stress in Jointed Concrete Pavement. Procedia - Social and Behavioral Sciences.
3. Balbo, Jose & Severi, Andréa. (2002). Thermal Gradients in Concrete Pavements in Tropical Environment: Experimental Appraisal. Transportation Research Record.
4. Vietnam Directorate for Roads. (2022). "Design of Conventional Jointed Cement Concrete Pavement in Transportation Construction." TCCS 39:2022. Vietnam Directorate for Roads.
5. Ministry of Transport. (1995). "22TCN 233-95: Procedure for Designing Rigid Pavement for Roads." Hanoi, Vietnam: Transport Publishing House.
6. Chiêu, N. Q. (2004). "Cement Concrete Pavement." Hanoi, Vietnam: Transport Publishing House.
7. Vy, P. N. T., & Tuấn, N. M. (2016). "Behavior of Jointed Cement Concrete Pavement Due to Temperature Differences Using Abaqus Software." Journal of Transport. May issue, 56-59.
8. Gedafa, D. S., Hossain, M., Siddique, Z. Q., Fredrichs, K., & Meggers, D. (2012). "Curling of New Concrete Pavement and Long-Term Performance." Journal of Civil Engineering and Architecture, 6(2), 121-131.
9. Dassault Systèmes Simulia Corp. (2016). "Abaqus Theory Manuals." RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp.
10. Belytschko, T., Liu, W., Moran, B., & Elkhodary, K. (2014). "Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures." Second Edition. USA: John Wiley & Sons.
11. AASHTO. (1993). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures." Washington, D.C., USA: AASHTO.

Phân tích trạng thái ứng suất – biến dạng của tấm bê tông xi măng mặt đường sân bay chịu tác dụng đồng thời của tải trọng và nhiệt độ trong điều kiện việt nam

Tóm tắt: *Mặt đường bê tông xi măng (BTXM) là lựa chọn chính cho các sân bay tại Việt Nam nhờ các ưu điểm về cường độ, tuổi thọ và khả năng chịu tác động của nhiệt độ. Trong quá trình khai thác, các tấm bê tông xi măng chịu tác động đồng thời của tải trọng bánh lốp tàu bay và nhiệt độ môi trường, bao gồm nhiệt độ không khí và bức xạ mặt trời. Với điều kiện khí hậu Việt Nam, nơi nhiệt độ trung bình năm cao và chênh lệch nhiệt độ ngày đêm lớn, ứng suất nhiệt phát sinh trong các tấm bê tông xi măng có thể ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái ứng suất – biến dạng và tuổi thọ của mặt đường. Nghiên cứu này sử dụng phần mềm Abaqus để phân tích trạng thái ứng suất – biến dạng của tấm bê tông xi măng mặt đường sân bay dưới tác dụng đồng thời của tải trọng và nhiệt độ. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế, đánh giá và bảo trì mặt đường sân bay trong điều kiện khí hậu đặc thù của Việt Nam.*

Từ khóa*:* trạng thái ứng suất-biến dạng, mặt đường bê tông xi măng, Abaqus.

Xác định tham số mô hình Hoek- Brown cho mẫu đá từ thí nghiệm nén đơn trục và ép chẻ mẫu Brazil

Nguyễn Huy Hiệp[1*], Nguyễn Quý Đạt[1], Vũ Quang Anh[1], Vũ Tùng Lâm[1]

[1]*Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Đại học kỹ thuật Lê Quý Đôn*

Email: huyhiepnguyen@lqdtu.edu.vn; Tel:0979794384

Tóm tắt

Mô hình Hoek- Brown áp dụng cho mẫu đá. Tuy nhiên, để thí nghiệm ra mô hình dùng cho mẫu đá cần thí nghiệm nén ba trục đá đắt tiền và tốn kém. Dựa trên các công thức chuyển đổi và các thiết bị tự chế, nhóm tác giả đã sử dụng thí nghiệm thí nghiệm nén đơn trục và ép chẻ mẫu Brazil xác định tham số mẫu đá theo mô hình Hoek- Brown.

Từ khóa: *Hoek- Brown, nén ép, ép chẻ Brazil, nén đơn trục, ba trục đá.*

1. Đặt vấn đề

Tiêu chuẩn phá hoại Hoek-Brown (HB) còn gọi là chuẩn bền HB là một tiêu chuẩn được lập từ kinh nghiệm cho phép xác định quan hệ tương quan giữa các thành phần ứng suất ở trạng thái giới hạn của khối đá. Để xác định đường bao độ bền của khối đá nứt nẻ, các tác giả đã đưa thêm các hệ số vào phương trình đường bao độ bền của đá liền khối. Theo Hoek- Brown, độ bền khối đá nứt nẻ có thể xác định được từ kết hợp kết quả thí nghiệm trong phòng với quan sát, mô tả và đo đạc hiện trường [2, 3, 4].

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b\sigma_3/\sigma_{ci} + s\right)^a \quad (1)$$

Trong đó:

σ_1, σ_3 - ứng suất chính lớn nhất và nhỏ nhất tại thời điểm phá hủy trong thí nghiệm nén 3 trục;

σ_{ci} - cường độ kháng nén một trục của vật liệu đá nguyên vẹn lấy từ khối đá được tạo thành;

s, a- hằng số phụ thuộc vào đặc tính của khối đá; giá trị s nằm trong khoảng từ 0 với khối đá nứt nẻ đến 1 với vật liệu đá nguyên vẹn. s được tính như sau:

- với GSI > 25 thì: $s = exp\left[\left(GSI - 100\right)/\left(9 - 3D\right)\right]$; a = 0.5
- với GSI < 25 thì: $s = 0$; $a = 0.65 - GSI/200$
- với GSI = 100 thì: $s = 1$ (khi khối đá nguyên trạng);

$$a = 1/2 + 1/6\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$$

GSI (Geological Strengh Index)- chỉ số độ bền địa chất khối đá, sử dụng cho việc đánh giá độ bền khối đá trong các điều kiện địa chất khác nhau.

D- hệ số xáo động hay hệ số tác động của biện pháp thi công đối với mức độ nguyên vẹn của khối đá. D chạy từ 0 (khối đá nguyên vẹn) đến 1 (khối đá bị xáo động mạnh).

m_b- hệ số Hoek-Brown cho khối đá phụ thuộc từng loại đá (theo hệ số vật liệu m_i):

$$m_b = m_i exp\left[\left(GSI - 100\right)/\left(28 - 14D\right)\right] \quad (2)$$

Như vậy, để xác định mô hình Hoek- Brown cần làm thí nghiệm nén ba trục đá. Thí nghiệm ba trục đá đòi hỏi thiết bị hiện đại, đắt tiền, chi phí lớn, mỗi thí nghiệm ba trục cần vật tư tiêu hao và giá thành khoảng trên 10 triệu đồng. Để giảm giá thành thí nghiệm, tác giả Nguyễn Huy Hiệp đã chế tạo thiết bị nén đơn trục và ép chẻ mẫu Brazil, dùng công thức quy đổi để xác định tham số mô hình Hoek- Brown và quy đổi ra khối đá.

2. Thí nghiệm nén đơn trục và ép chẻ mẫu Brazil

2.1. Thí nghiệm nén đơn trục mẫu đá

Thí nghiệm nén mẫu thẳng đứng nở hông tự do: tiến hành gia tải lên bề mặt mẫu tăng dần đều theo thời gian, ta xác định được khả năng chịu tải của mẫu vật liệu thí nghiệm khi chịu nén là lực nén lớn nhất tại thời điểm mẫu bị phá hủy. Ứng suất nén của mẫu xác định theo biểu thức [1]:

$$\sigma_N = \frac{4F_1}{\pi D^2} \tag{3}$$

trong đó:

σ_N - ứng suất nén lớn nhất.

F_1- lực nén dọc lớn nhất.

D- đường kính mẫu.

Mẫu thí nghiệm bị phá hủy từ đó kết hợp với các công thức thực nghiệm đưa ra các tham số của mẫu: modun biến dạng E, hệ số Poisson ν.

2.2. Thí nghiệm ép chẻ mẫu Brazil

Biểu hiện của đất đá khi chịu nén và chịu cắt ít được chú ý nghiên cứu, một mặt là do kĩ thuật thí nghiệm , mặt khác là do các biểu hiện này thường xảy ra trong phạm vi nhỏ trước khi mẫu bị phá hủy. Đồng thời các biểu hiện đó chỉ là các trường hợp riêng, cho phép có thể dẫn giải từ các thí nghiệm nén đơn giản hơn. Thí nghiệm kéo và cắt trên mẫu đá thường chỉ nhằm xác định khả năng chịu tải của đá khi chịu kéo và khi chịu cắt. Các kết quả công bố về biểu hiện biến dạng rất hạn chế, sau đây đơn cử kết quả điển hình: thí nghiệm nén tách (kéo tách) hay phương pháp Brazil, được F.Carneire và A.Barcellos (Brazil) đề xuất sử dụng năm 1949. Khi bị nén theo đường sinh trong mẫu hình thành các thành phần ứng suất tác dụng dọc theo đường kính σ_3.Tại tâm của mẫu ứng suất kéo đạt giá trị lớn nhất, xác định theo biểu thức:

$$\sigma_K = \frac{2F_2}{\pi DL}\left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1\right] \approx \frac{2F_2}{\pi DL} \tag{4}$$

Trong đó:

σ_k- ứng suất kéo.

F_2- lực nén mẫu nằm ngang.

L- Chiều dài mẫu thí nghiệm.

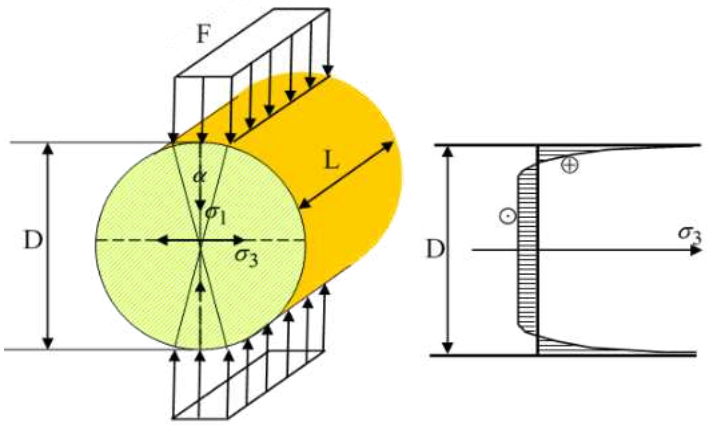
Biến dạng của mẫu theo phương vuông góc với hướng tác dụng của tải trọng là biến dạng do kéo, vì vậy được xác định mối quan hệ với ứng suất kéo σ_3. Khi ứng suất kéo tại tâm mẫu đạt độ bền kéo đơn trục của đá, mẫu bị phá hủy và vết nứt kéo phát triển dọc theo đường kính mẫu, tách mẫu ra làm 2 phần. Độ bền kéo của đá được xác định theo lực gây ra phá hủy mẫu, cụ thể:

$$\sigma_K^* = \frac{2F_{2\max}}{\pi.D.L} \tag{5}$$

Trong đó:

σ_K*- Ứng suất kéo lớn nhất.

F_{2max}- Lực nén mẫu nằm ngang lớn nhất.



Hình 1. Mô tả ép chẻ Brazil

Xử lý kết quả thí nghiệm:

Lực dính:

$$c' = \frac{1}{2}.\sqrt{\sigma^*_N.\sigma^*_K} \tag{6}$$

Góc ma sát:

$$\phi' = \arcsin\left(\frac{\sigma^*_N - \sigma^*_K}{\sigma^*_N + \sigma^*_K}\right) \tag{7}$$

Như vậy, từ thí nghiệm nén đơn trục và ép chẻ Brazil xác định được tham số mô hình Mohr- Coulomb: E, ν, c', ϕ'

3. Quy đổi từ mô hình Mohr- Coulomb sang mô hình Hoek- Brown

Phần lớn các phần mềm địa kỹ thuật thường viết theo tiêu chuẩn phá hủy Mohr - Coulomb, nên cần phải xác định được góc ma sát trong (ϕ') và lực dính kết (c') tương ứng cho từng loại khối đá và miền ứng suất. Để xác định giá trị của ϕ' và c' chúng ta xác định giá trị trung bình của đường cong theo phương trình (1) trong khoảng giá trị ứng suất chính $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$ như trên hình 2. Giải phương trình cân bằng sẽ nhận được kết quả sau [5]:

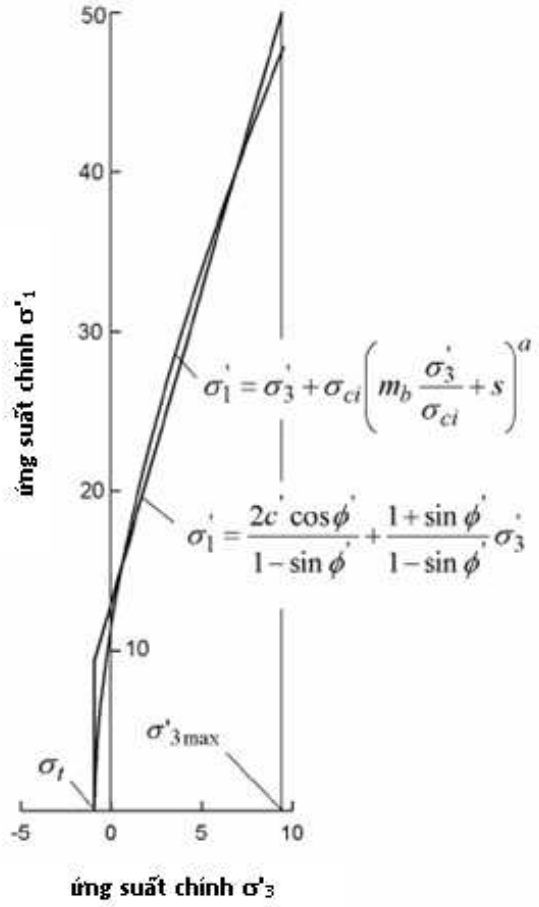
$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6a.m_b\left(s + m_b.\sigma'_{3n}\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6a.m_b.\left(s + m_b.\sigma'_{3n}\right)^{a-1}}\right] \tag{8}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)s + (1-a)m_b.\sigma'_{3n}\right]\left(s + m_b.\sigma'_{3n}\right)^{a-1}}{(1+a)(2+a).\sqrt{\frac{1+6a.m_b.\left(s + m_b.\sigma'_{3n}\right)^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \tag{9}$$

trong đó:

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}}$$

Chú ý giá trị của σ'_{3max} là giới hạn trên của ứng suất mà dựa vào đó để xác định mối quan hệ giữa hai tiêu chuẩn Hoek-Brown và Mohr-Coulomb, được xác định cho từng trường hợp cụ thể: lựa chọn giá trị này cho trường hợp bờ dốc và đường hầm.



Hình 2. Mối quan hệ giữa các thành phần ứng suất theo tiêu chuẩn Hoek-Brown và Mohr-Coulomb

Các quy trình xác định tham số Hoek- Brown từ thí nghiệm ép chẻ mẫu và nén đơn trụ:

- Bước 1: Xác định góc mát trong và lực dính kết c', ϕ' từ thí nghiệm nén đơn trục và ép chẻ.

- Bước 2: Dựa vào công thức (8), (9) và phần mềm Rocdata tính các tham số m_b, m_i và a theo mô hình Hoek- Brown, lấy $m_i=m_b$ trong trường hợp mẫu đá nguyên dạng.

- Bước 3: Xử lý số liệu đo biến dạng xác định mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của đá.

4. Thực nghiệm xác định tham số mô hình Hoek- Brown từ thí nghiệm nén đơn trục và ép chẻ mẫu Brazil

Sử dụng thí nghiệm nén chẻ Brazil kết hợp với thí nghiệm nén đơn trục thẳng đứng, kết quả thu được bao gồm các ứng suất nén thẳng đứng, nén ngang mẫu thí nghiệm khi mẫu bị phá hủy từ đó kết hợp với các công thức thực nghiệm đưa ra các tham số của mẫu gia cố: lực dính c, góc ma sát φ, modun biến dạng E, hệ số Poisson ν.



Hình 3. Gia công mẫu và đặt tải, đồng hồ đo chuyển vị, lực nén

Mẫu đá thí nghiệm được lấy từ Mỏ than ở Quảng Ninh với độ sâu trên 100m, được gia công và thí nghiệm tại phòng thí nghiệm ở ngõ 443, đường Phạm Văn Đồng, phường Cổ Nhuế 1.



Hình 4. Kết quả nén phá hủy mẫu và khuôn nén ép chẻ mẫu Brazil

Tham số đầu vào:

Khối lượng riêng tự nhiên, γ_{max} = 2,5 T/m^3

Chiều cao mẫu, H= **6** cm

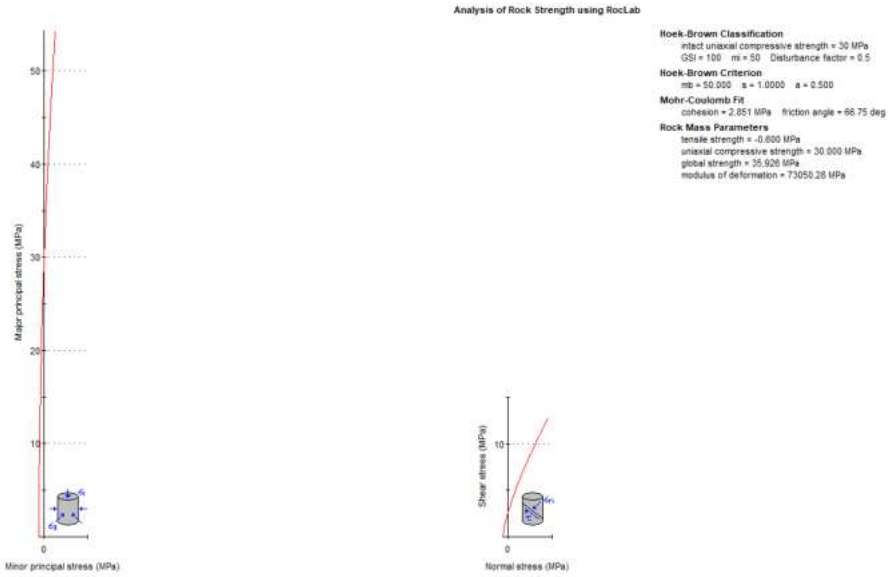
Đường kính mẫu, D = **3** cm

Bảng 1. Các tham số nén ép chẻ mẫu Brazil và nén đơn trục theo công thức (8) và (9)

Thông số	Đơn vị	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Trung bình
σ^*_N	MPa	29	29,1	32,07	30
σ^*_K	MPa	0,77	0,78	0,85	0,8
Lực dính c’	MPa	2,362	2,382	2,61	2,45
Góc ma sát ϕ’	Độ	71,52	71,44	71,54	71,5˚

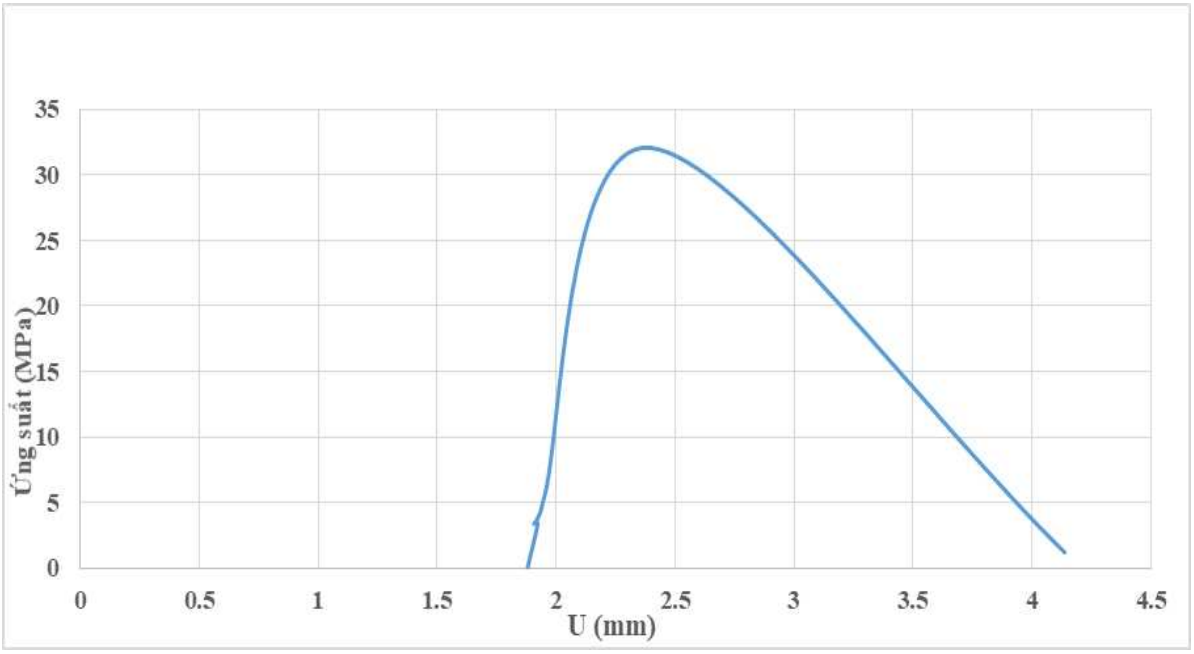
Bảng 2. Thông số biến dạng sau khi xử lý dữ liệu

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
01	Mô đun biến dạng E	MPa	2300
02	Hệ số Poisson		0,25



Hình 5. Kết quả xử lý chuyển đổi mô hình Hoek- Brown trên phần mềm Rocdata 5.0

Sử dụng phần mềm Roclab để quy đổi tham số mẫu đá từ mô hình Mohr-Coulom sang mô hình Hoek-Brown:



Hình 6. Quan hệ giữa ứng suất- biến dạng đứng

Bảng 2. Thông hình Hoek Brown mẫu đá, sau khi xử lý trên phần mềm Rocdata 5.0

Độ bền nén đơn trục (Mpa)	Chỉ số địa chất GSI	Chỉ số m_i	Hệ số thi công	Hệ số m_b	Hệ số s	Hệ số a
30	100	50	0,5	50	1	0,5

5. Kết luận

Trong nội dung bài báo đã phân tích lý thuyết và làm thí nghiệm xác định các tham số cơ học của mẫu đá theo mô hình Mohr- Coulomb từ các thí nghiệm: nén đơn trục và ép chẻ mẫu đá. Các tham số thí nghiệm có thể chuyển đổi từ Mohr- Coulomb sang mô hình Hoek- Brown dựa vào tính năng tự động của phần mềm Rocdata: m_b, m_i và a được xác định từ các phương trình (8) và (9) với giả định trường hợp mẫu đá m_b=m_i. Mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của mẫu đá cũng được xác định trên cơ sở đo biến dạng của mẫu đá từ thí nghiệm nén đơn trục mẫu đá.

Tài liệu tham khảo

1. Trần Tuấn Minh (2010). *Giáo trình Cơ học đá*. Nhà xuất bản Xây dựng.

2. Evert Hoek (2006), Practical Rock Engineering

3. Hoek E. and Brown E.T (1983), Strengh of jointed rock masses, bài giảng Rankine năm 1983.

4. Hoek-Brown Failure Criterion (2006) Edition by Evert Hoek, Carlos Caranza-Torres and Brent Corkum.

5. Rocdata - User's guide for Rock mass Strength analysis using the Hoek-Brown criterion software, 2002.

Determination of Hoek-Brown model parameters for rock samples by uniaxial compression test and brazilian test

Abstract: *The Hoek-Brown model is applied to rock samples. However, to obtain a model suitable for rock samples, expensive triaxial compression tests were necessary. By using uniaxial compression tests and Brazilian tests based on conversion equations, the research team determined the parameters for rock samples under the Hoek-Brown model.*

Keywords: Hoek- Brown, compression, Brazilian test, uniaxial compression test, triaxial rock

Nghiên cứu tải trọng sóng lên cọc thẳng đứng có xét tới ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm cọc bằng mô hình toán flow 3D

ThS. Lê Văn Tú

Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: levantucauduong@gmail.com; Tel: 0965228255

Tóm tắt:

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm cọc tới tải trọng sóng lên cọc bằng mô hình toán Flow -3D. Các kịch bản được mô phỏng trên mô có kích thước dài x rộng x cao = 70mx18mx11m với 02 nhóm kịch bản khảo sát: biến đổi về khoảng cách theo phương truyền sóng $\Delta X / D = 2 \div 5$ và biến đổi về phương vuông góc với phương truyền sóng $\Delta Y / D = 0 \div 3$. Kết quả mô phỏng được kiểm chứng với phương pháp lý thuyết cho thấy sự phù cao (trong trường cọc đơn). Nghiên cứu đã làm sáng tỏ cơ chế lan truyền, phản xạ, nhiễu xạ sóng qua hệ cọc và ảnh hưởng của nhóm cọc tới sự tải trọng sóng lên các cọc riêng lẻ trong nhóm cọc. Kết quả cho thấy hiệu ứng nhóm cọc có ảnh hưởng lớn tới tải trọng sóng lên cọc thông qua hệ số $P_2/P_1 = 0.6 \div 0.8$. Mô hình toán Flow-3D được áp dụng trong nghiên cứu này đóng vai trò là công cụ phân tích biến dạng sóng qua hệ cọc, tính toán loại tải trọng sóng lên hệ hệ kết cấu phương pháp này có ý nghĩa quan trọng trong thực tế thiết kế, xây dựng công trình đặc biệt trong điều kiện với hệ cọc phức tạp.

Từ khóa: *Tải trọng sóng, nhóm cọc, phần mềm Flow-3D.*

1. Đặt vấn đề

Các kết cấu được hỗ trợ bằng cọc thường thấy ở cả ngoài khơi (ví dụ như các giàn khoan dầu khí ngoài khơi) và môi trường ven biển (ví dụ như cầu biển, cầu tàu và cầu cảng) thường được xây dựng bằng một nhóm cọc có cách sắp xếp khác nhau. Việc dự đoán chính xác tải trọng sóng của các cọc được bố trí gần nhau của các kết cấu này là rất quan trọng đối với cả quan điểm về an toàn và kinh tế.[1]

Không giống như các cọc đơn lẻ bị cô lập, nơi có nhiều nghiên cứu có sẵn cùng với phương trình Morison nổi tiếng vẫn được áp dụng rộng rãi để tính toán lực do sóng gây ra, ít nghiên cứu hơn được thực hiện về tương tác giữa sóng và nhóm cọc. Trên thực tế, vẫn chưa có công thức tải trọng sóng đáng tin cậy nào để dự đoán lực do sóng gây ra trên một cọc mảnh, trong đó đường kính cọc (D) thường nhỏ hơn khoảng 0,2 lần chiều dài sóng (L), trong một nhóm cọc.[2]

Đối với các cọc được bố trí gần nhau trong các nhóm tiếp xúc với sóng, hiệu ứng giao thoa giữa các cọc có thể làm thay đổi đáng kể dòng chảy xung quanh các cọc và do đó làm thay đổi tải trọng sóng so với tải trọng trên một cọc đơn lẻ bị cô lập. Trong các kết cấu như vậy, tải trọng sóng trên một cọc mảnh duy nhất bị ảnh hưởng đáng kể bởi các cọc lân cận và do đó không thể ước tính bằng các công thức thường được áp dụng cho một cọc đơn lẻ bị cô lập, thường dựa trên khái niệm của Morison. Theo góc của đường kết nối giữa các tâm cọc so với hướng sóng, các nhóm cọc thường được phân loại thành ba cách sắp xếp cơ bản. Ba cách sắp xếp này bao gồm (i) song song, trong đó góc của đường kết nối giữa hình trụ so với hướng sóng là 0°, (ii) cạnh nhau, trong đó hướng sóng tới vuông góc với đường nối của các cọc nằm cạnh nhau và (iii) so le trong đó góc nằm giữa 0° và 90°. Trong trường hợp các cọc mảnh mà cả lực cản và lực quán tính gây ra bởi dòng chảy hỗn loạn phức tạp cao đều quan trọng, thì giải pháp phân tích khó có thể khả thi. Do tính phức tạp cao của tương tác giữa sóng và nhóm cọc trong các sắp xếp khác nhau, các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm vẫn là giải pháp thay thế đáng tin cậy nhất. Một số nghiên cứu trong phòng thí nghiệm đã được tiến hành

để điều tra các hiệu ứng giao thoa của các cọc lân cận. Các phương pháp thường được sử dụng trong các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm để xác định tải trọng sóng trên một nhóm cọc có thể được phân loại thành hai loại chính: "phương pháp tiếp cận hệ số lực sóng" và "phương pháp tiếp cận lực sóng".[3]

2. Thiết lập mô hình

2.1.Kịch bản nghiên cứu

Trong nghiên cứu này các cách sắp xếp cọc khác nhau bao gồm đơn, cạnh nhau, song song 2 × 2 và sắp xếp so le đã được thực hiện và khoảng cách tương đối S_G/D thay đổi từ 0,5 đến 5,0 như mô tả trong. Sóng không vỡ đều đặn với các tổ hợp khác nhau về chiều cao sóng và chu kỳ đã được thử nghiệm để bao phủ nhiều điều kiện thủy động lực học.

2.2. Phương trình cơ bản

Mô hình toán Flow -3D sử dụng phương trình Navier- Stoker làm phương trình chủ đạo, được giải bằng sử dụng kỹ thuật thể tích khối (volume of fluid (VOF)). Phương trình này là sự kết hợp của hai phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng, trong hệ tọa độ không gian 3 chiều Descartes(x,y,z). Phương trình khối lượng liên tục được biểu diễn dưới công thức sau [4]:

2.2.1. Phương trình liên tục

Dạng tổng quát của phương trình liên tục khối lượng có dạng:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho u A_x\right) + R\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v A_y\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho \mathrm{w} A_z\right) + \xi\frac{\rho u A_x}{x} = R_{\mathrm{DIF}} + R_{\mathrm{SOR}} \qquad (1)$$

Trong đó:

V_F: là thể tích đoạn đầu của dòng chảy;

ρ : là mật độ của dòng chảy;

R: là hệ số liên quan tới khuếch tán rối của chất lỏng;

u, v, w: là các thành phần vận tốc của chất lỏng theo các phương x,y,z;

Ax, Ay, Az: Diện tích phân tố chất lỏng theo các phương tương ứng vuông góc với trục x,y,z trong hệ tọa độ Descartes;

Với phép tính gần đúng, phương trình liên tục được viết gọn dưới dạng sau:

$$\frac{V_F}{\rho c^2}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R\frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathrm{w} A_z}{\partial z} + \xi\frac{u A_x}{x} = \frac{R_{\mathrm{SOR}}}{\rho} \qquad (2)$$

2.2.2. Phương trình động lượng

Trong hệ tọa độ Descartes phương trình chuyển động của các thành phần chất lỏng (u,v,w) theo ba phương tọa độ là phương trình Navier – Stokes với một số điều kiện bổ sung được trình thể hiện như sau[4]:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial x}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}-\xi\frac{Av^2}{xV_F}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_x+f_x-b_x-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}\left(u-u_w-\delta u_s\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial x}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}+\xi\frac{A_y uv}{xV_F}=-\frac{1}{\rho}\left(R\frac{\partial p}{\partial y}\right)+G_y+f_y-b_y-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}\left(v-v_w-\delta v_s\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial x}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+G_z+f_z-b_z-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}\left(w-w_w-\delta w_s\right)$$

Tác giả sử dụng mô hình RNG để giải các phương trình dòng rối cho tất cả các kịch bản. RNG được biết đến với khả năng mô phỏng các vùng chịu cắt mạnh của dòng chảy một cách chính xác hơn phù hợp với đặc điểm của các kịch bản mô phỏng. Mô hình RNG sử dụng kỹ thuật tích phân, tính toán động năng rối k_t và tốc độ tiêu tán động năng ε_t. Mô hình RNG ít dựa vào các hằng số thực nghiệm cố định mà thay vào đó sử dụng thang chảy rối để xác định các tham số biến thiên theo các trường hợp[5]. Tốc độ tối thiểu của tốc độ tiêu tán năng lượng rối ε_T được giới hạn theo phương trình sau:

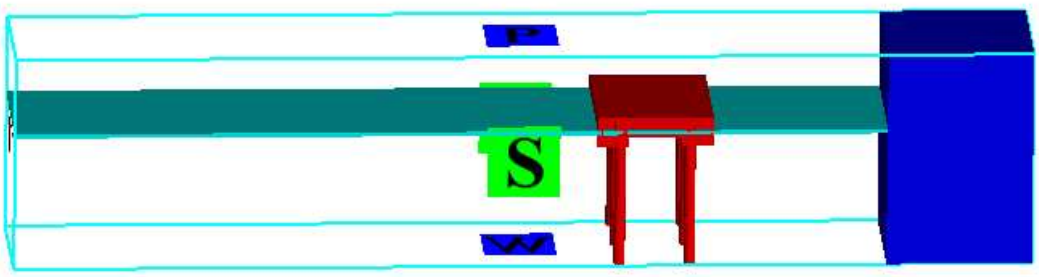
$$\varepsilon_{T,\min}=C_v\sqrt{\frac{3k_T^{3/2}}{2T_{LEN}}} \quad (4)$$

Trong đó C_v là một tham số (giá trị mặc định là 0.09), K_t là động năng rối và T_{LEN} là thang chiều dài rồi. Giá trị không đổi cho thang chiều dài này được chọn theo quy tắc 7% kích thước của vật thể chuyển động chiếm ưu thế. Thông tin chi tiết về các mô hình nhiễu loạn và các mô hình phương trình tương ứng có trong (FLOW-3D, 2009)[4]

2.3. Miền và lưới tính

Kích thước của mô hình được lựa chọn tối ưu vừa phải đủ lớn để trường sóng ổn định bên cạnh đó cũng cần đảm bảo khả năng mô phỏng của máy tính. Trên cơ sở đó tác giả lựa chọn xây dựng kích thước cụ thể của mô hình như sau:

70x18x11m, 01 khối hấp phụ sóng được bố trí tại cuối mô hình để giảm thiểu ảnh hưởng của sóng phản xạ tại biên mô hình tới kết quả mô phỏng.



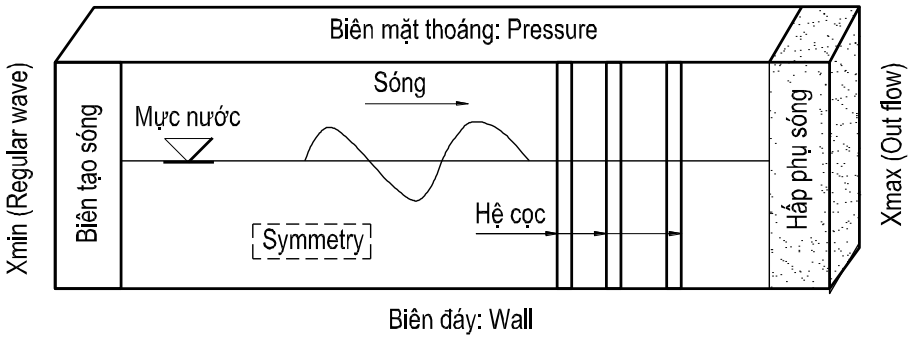
Hình 1: Mô hình tính

Việc lựa chọn kích thước lưới mô hình hợp lý cho ô tính toán là nhiệm vụ rất quan trọng. Giá trị này được xác định dựa trên độ chính xác của mô hình và thời gian tính toán mô phỏng nhằm đảm bảo số lượng ô tính toán ít nhất có thể nhưng vẫn đảm bảo đủ độ phân giải và sai số chấp nhận được. Trong nghiên cứu này kích thước ô lưới được lựa chọn theo từng vùng khác nhau theo mức độ ảnh hưởng khác nhau, trong phạm vi hệ cọc lựa chọn ô lưới đồng nhất với kích thước 0.05m.

2.4. Điều kiện biên

Điều kiện biên trong mô hình thể hiện trên Hình 2, sóng và dòng chảy được tính toán trên hệ tọa độ đề các 6 mặt trong đó: theo phương X biên tạo sóng X_{min} – Wave, biên của dòng chảy ra X_{max} – Outflow; theo phương Y gồm tường bên trái với Ymin – Symmetry và tường bên phải với Y_{max} – Symmetry; theo phương Z biên thấp nhất trên được gán Z_{min} – Wall, biên lớn nhất được gán Z_{max} – Specified pressure.

Trạng thái ban đầu tại thời điểm t=0 được thiết lập để xác định điều kiện ban đầu của kịch bản mô phỏng, tác giả sử dụng tham số cao độ mực nước như trên hình;



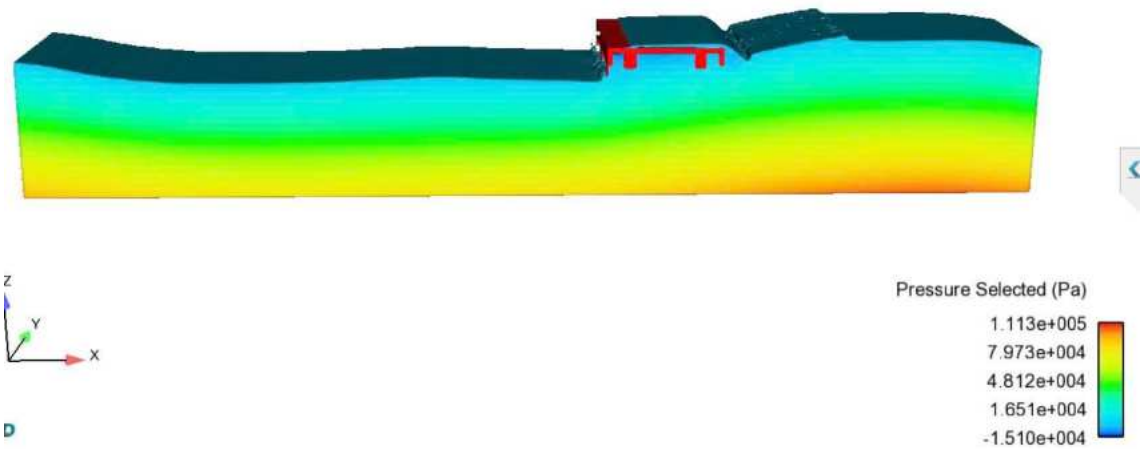
Hình 2: Điều kiện biên của mô hình

2.5. Điều kiện sóng

Biên sóng của mô hình được thiết lập tại mặt phẳng X_{min}. Sóng bề mặt được truyền thẳng theo phương X tới biên mô hình tính. Sử dụng dạng sóng Stoke và Cnoidal.

2.6. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

3. Kết quả và thảo luận



Hình 3: Sóng truyền qua hệ cọc

Qua kết quả nghiên cứu nhận thấy:

Hiệu ứng nhóm cọc tăng lên bằng cách giảm khoảng cách giữa các cọc trong cách sắp xếp cạnh nhau;

Sự khuếch đại của tải trọng sóng trên cọc giữa trong cách sắp xếp cạnh nhau dễ nhận thấy hơn so với cọc bên do ảnh hưởng của hai cọc lân cận từ cả hai bên hoặc sóng đều đã thử nghiệm, tải trọng sóng kết quả trên cọc giữa trong cách sắp xếp cạnh nhau tăng lên đến 60% so với tải trọng trên cọc đơn lẻ bị cô lập;

Đối với cách sắp xếp nhóm cọc này, hiệu ứng nhóm cọc trở nên không đáng kể đối với SG/D = 3 và tất cả các cọc đều hoạt động giống như một cọc đơn lẻ bị cô lập về mặt tải trọng sóng;

Đối với cách sắp xếp song song với SG/D = 1, là khoảng cách tương đối nhỏ nhất được thử nghiệm trong, không quan sát thấy hiệu ứng che chắn đáng kể đối với sóng đều đã thử nghiệm.

[1] L. Bonakdar, H. Oumeraci, and A. J. C. E. Etemad-Shahidi, "Wave load formulae for prediction of wave-induced forces on a slender pile within pile groups," vol. 102, pp. 49-68, 2015.

[2] L. Bonakdar and H. Oumeraci, "Interaction of waves and pile group-supported offshore structures: a large scale model study," in *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2012, pp. ISOPE-I-12-551: ISOPE.

[3] N. Haritos and D. Smith, "The effect of spacing transverse to the wave direction on the Morison force coefficients in two cylinder groups," American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States)1995.

[4] Flow-3D, "Flow-3D User Manual," Version 11.2. Flow Science ed. USA: Flow Science, Inc., 2014.

[5] H. A. H. MOHAMMED A. IBRAHIM, ZIAD TARK ABD ALI, "INVESTIGATING THE EFFECT OF INLET APERTURE AND BAFFLE POSITION IN IMPROVING THE EFFICIENCY OFPRIMARY SETTLING TANKS," (in English), *Journal of Engineering Science and Technology,* no. Special Issue on DMPCE2021, pp. 38 - 49, 2021.

Investigations on the effectiveness of reducing the wave overtopping volume of the recurve seawall in the coastal island of Vietnam

Abstract: *This article presents the results of research on the overtopping per wave for various common sections of seawall structures applied in offshore areas of Vietnam: slope, vertical, and recurve under typical conditions. The authors use the 3-dimensional software Flow-3D model to simulate the interaction between structure and environment, thereby determining the amount of overtopping volume in research scenarios. Through analysis of simulation results, it was found that the recurve is highly effective in reducing wave overtopping. Thereby, this finding highlights the value of employing this kind of structure for seawalls that serve development, economic growth, and national security and defense.*

Keywords: *Seawall, wave overtopping value, flow 3D-software, computational fluid dynamics.*

Nghiên cứu đánh giá giải pháp cơ động bán lắp ghép để nâng cao trình đỉnh đê, giảm lượng sóng tràn qua đê cho các đảo xa bờ

Nguyễn Thanh Sang[1*], Nguyễn Quý Thành[1]

[1]*Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

[*]*Email: thanhsang.ktqs@lqdtu.edu.vn; Contact number: 0986.536.190*

Tóm tắt

Các công trình bảo vệ đã và đang được xây dựng trên đảo xa bờ thuộc vùng biển Nam Biển Đông có ý nghĩa quan trọng về chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, đồng thời củng cố an ninh - quốc phòng, bảo vệ chủ quyền biển đảo. Tuy nhiên, trong quá trình khai thác dưới tác động của biến đổi khí hậu cực đoan, đặc biệt là điều kiện hải văn phức tạp trên biển đông, nên đã có hiện tượng nước biển tràn qua và xâm nhập vào các công trình, ảnh hưởng đến khả năng khai thác kỹ - chiến thuật của công trình đó. Nguyên nhân là do giải pháp thiết kế công trình chưa chống lại được hết các tác động của điều kiện hải văn bất thường và sự ảnh hưởng khó lường của hiện tượng nước biển dâng, làm cho nước tràn qua hệ thống đê chắn sóng đổ về công trình, gây ảnh hưởng lớn đến hiệu quả khai thác theo công năng thiết kế. Báo cáo trình bày phương pháp phân tích tổng hợp kết hợp phương pháp chuyên gia để đánh giá hiện trạng và đề xuất giải pháp nâng cao trình đỉnh đê chắn sóng bằng kết cấu lắp ghép, kết quả đã xây dựng được đồ thị tương quan và các hàm tương quan bậc 3 giữa lưu lượng sóng tràn tính toán với cao trình đỉnh đê chắn sóng đề xuất tại 05 điểm dọc theo tuyến đê ở 01 đảo xa bờ của Việt Nam.

Từ khóa: *công trình, bán lắp ghép, hải văn, mô hình toán, sóng tràn, lưu lượng.*

1. Đặt vấn đề

Hệ thống các công trình có ý nghĩa quan trọng về an ninh - quốc phòng trên đảo nổi xa bờ của Việt Nam đang khai thác đã xảy ra hiện tượng thấm và ngập nước do ảnh hưởng của mực nước biển dâng cao và lưu lượng sóng tràn qua đê chắn sóng lớn ở cả 2 thời điểm gió mùa Tây Nam và Đông Bắc đổ về công trình. Đây là vấn đề làm ảnh hưởng lớn đến tuổi thọ của công trình cũng như khả năng khai thác hiệu quả trong mọi thời điểm (hình 1):



Hình 1. Công trình dưới tác động của điều kiện thuỷ hải văn

Nguyên nhân của thực trạng này được tác giả đánh giá khái quát, bao gồm: Chiều cao đỉnh đê chắn sóng hạn chế nhưng lượng sóng tràn qua đê lớn: Hiện trạng công trình đã xây dựng trên các đảo cho thấy, cao trình đỉnh đê chắn sóng thay đổi từ +3,8 m đến +5,0 m (hệ hải đồ). Vào các thời điểm có gió mùa Đông Bắc và Tây Nam thường xuất hiện sóng tràn qua đê chắn sóng với lưu lượng khác nhau; hiện tượng mực nước biển dâng: Cao độ mặt nền san lấp từ +3,5 mHĐ đến +4,3 mHĐ, cao trình đáy các công trình do yêu cầu kỹ-chiến thuật nên khá thấp từ +0,4 mHĐ đến +2,35mHĐ. Trong khi đó mực nước biển thay đổi từ +0,3 mHĐ đến +2,4 mHĐ ngay cả khi chưa xét đến dâng trong gió mùa và bão và các kịch bản nước biển dâng

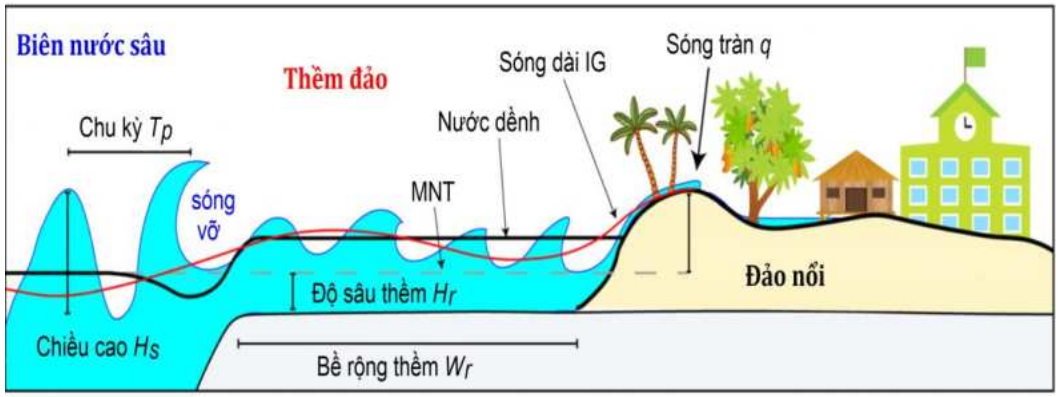
trong tương lai. Trong khi đó mực nước biển thay đổi từ +0,3 mHĐ đến +2,4 mHĐ cả khi chưa xét đến hiện tượng dâng trong gió mùa và bão và các kịch bản nước biển dâng trong tương lai.

Có nhiều giải pháp hạn chế sóng tràn đã được đề xuất: như sử dụng các khối phá sóng trước đê chắn sóng (đê mềm phá sóng), sử dụng đê chắn sóng nổi (floating breakwater) hay nâng cao độ tường đê chắn sóng. Tuy nhiên, các giải pháp này phần bị hạn chế bởi điều kiện tác chiến (tuyến đê chắn sóng không thể quá cao), chi phí đầu tư lớn (địa hình trước tuyến đê sâu, khối phá sóng không hiệu quả) hay điều kiện thi công vận hành phức tạp (đê nổi nơi sóng nước sâu). Các giải pháp này tỏ ra không hiệu quả và đôi khi gây lãng phí cũng như chưa đạt được được yêu cầu đặt ra. Do vậy, nghiên cứu tương quan lưu lượng sóng tràn với cao trình đỉnh đê chắn sóng và đề xuất giải pháp kết cấu công trình theo hướng nâng cao trình đỉnh đê nhằm hạn chế lưu lượng sóng tràn tới mức cho phép, đồng thời đảm bảo tính năng kỹ-chiến thuật của các công trình phía sau đê chắn sóng, có thể tháo lắp nhanh, sử dụng các vật liệu bền vững trước tác động của môi trường, chi phí đầu tư hợp lý là vấn đề có ý nghĩa khoa học và thực tiễn lớn.

2. Cơ sở lý thuyết vấn đề nghiên cứu

2.1. Sóng tràn và tác động của nó đến công trình

Có thể định nghĩa đơn giản theo hướng nước bị đẩy tràn qua đỉnh đê do động năng của sóng khi mà đỉnh đê vẫn còn cao hơn mực nước biển [1]. Mô hình dạng sóng tràn cơ bản được thể hiện như hình 2 dưới đây:



Hình 2. Mô hình sóng tràn cơ bản lên một thềm đảo nổi

Sóng tràn qua đê chắn sóng xuống các công trình gây bất lợi và là nguyên nhân gây ra những phá hoại đối với kết cấu công trình. Do vậy, nhằm tránh các tác hại do tràn gây ra phải có các biện pháp chống tràn hay hạn chế trong phạm vi cho phép và có biện pháp chống xói lở gây hư hại công trình. Để có giải pháp phù hợp, cần xác định chính xác lưu lượng sóng tràn, đây là vấn đề phức tạp đã được các tác giả trên thế giới cũng như ở Việt Nam đầu tư nghiên cứu và đã đạt được kết quả nhất định [2]. Các tiêu chuẩn của Châu âu và Việt Nam cũng đã chỉ dẫn và tiếp cận tính toán sóng tràn theo phương pháp giải tích khi xác định lượng sóng tràn [3], [4].

2.2. Một số giải pháp công trình tại Việt Nam và trên thế giới đã thực hiện

Tác động của sóng tràn là rất lớn đến sự làm việc và khai thác của công trình đê chắn sóng, cũng như các công trình cần bảo vệ. Do vậy, đã có nhiều giải pháp được đề xuất, thi công xây dựng trên thế giới và tại Việt Nam [1], [2], [6]. Để lựa chọn một giải pháp cụ thể và hợp lý cần căn cứ vào đặc điểm địa hình, điều kiện thuỷ hải văn, loại công trình cần bảo vệ để có giải pháp công trình giảm tác động của sóng tràn phù hợp. Tác giả tổng hợp một số giải

pháp kết cấu đã được sử dụng trên thế giới và tại Việt Nam như sau:

- Xây dựng kết cấu đê phá sóng liên tục bằng đá đổ tại Tây Ban Nha:



Hình 3. Giải pháp đê phá sóng chủ động dạng liên tục

- Giải pháp kết cấu đê phá sóng phân đoạn bằng đá hộc đổ tại Mỹ:



Hình 4. Giải pháp đê chủ động dạng không liên tục

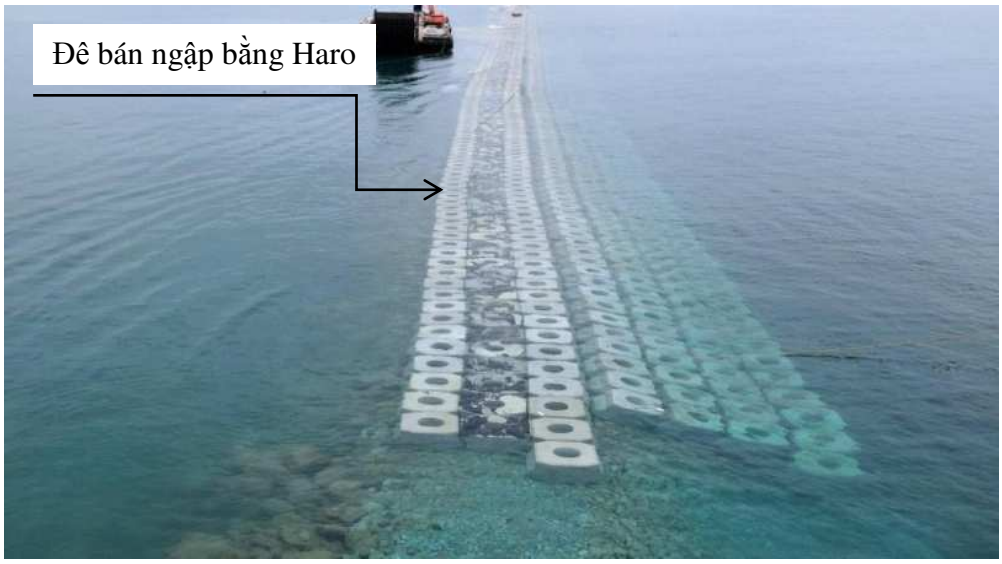
- Xây dựng đê giảm sóng bảo vệ bờ biển bằng cọc kết hợp lõi đá đổ tại Cà Mau:



Hình 5. Giải pháp đê chủ động bằng hệ cọc đóng

- Kết cấu đê bán ngập phá sóng dạng đá đổ phủ mặt bằng các khối dị hình Haro tại Hội

An – Quảng Nam.



Hình 6. Giải pháp đê bán ngập phá sóng bằng các khối dị hình Haro

- Giảm pháp bổ sung kết cấu thụ động bằng đá hộc xếp mở rộng cơ đê phía trước, tạo cao độ thềm cao để ép sóng bị vỡ phía trước đê tại Thanh Hóa:

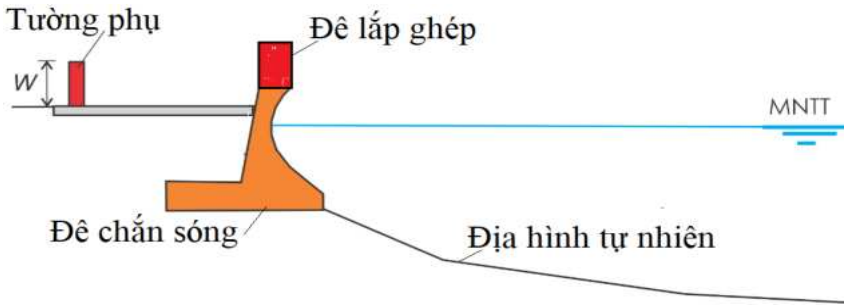


Hình 7. Giải pháp kết cấu đá hộc xếp mở rộng cơ đê

2.3. Đề xuất giải pháp thích ứng với hiện tượng sóng tràn

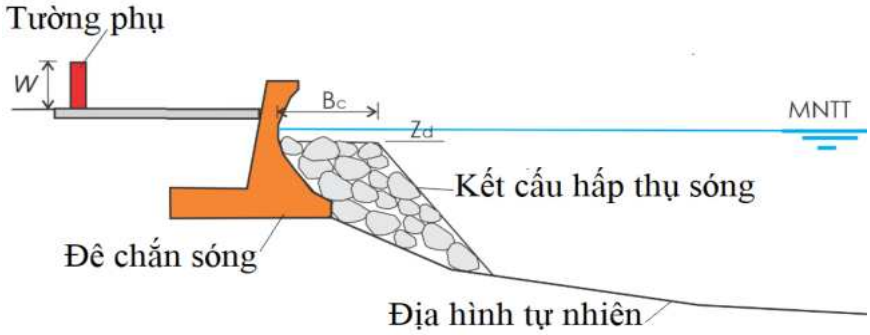
Giải pháp thích ứng với hiện tượng sóng tràn có thể chia thành 2 dạng cơ bản là giải pháp chủ động theo nguyên lý làm giảm sóng tới và dạng thụ động theo nguyên tắc điều chỉnh cấu hình bản thân công trình. Trên cơ sở đó, tác giả đề xuất một số giải pháp cơ bản sau:

- Sử dụng giải pháp nâng cao trình đê chắn sóng có kết cấu bằng bê tông xi măng đối với các công trình xây dựng mới, nhưng theo hướng thích nghi nhằm bảo đảm yêu cầu tiết kiệm chi phí đầu tư. Đối với đê chắn sóng trên các đảo hiện trạng đã xây dựng mà cao trình thấp (+3,8 đến +4,5 mHĐ), có thể nâng cao đỉnh đê chắn sóng hiện hữu này bằng cách sử dụng các khối lắp ghép di động trên đỉnh đê khi cần thiết, vật liệu có thể bằng Composite hoặc tương đương, chiều cao các khối cần đảm bảo giảm lượng sóng tràn trong giới hạn cho phép tùy từng vị trí, kết quả tính mô hình toán và mục tiêu giới hạn lượng tràn. Chiều dài các khối phải thỏa mãn sao cho tổng trọng lượng mỗi khối tối đa từ 60 kg đến 80 kg. Để giảm hiệu quả sóng tràn, có thể kết hợp với tường phụ phía sau đê bằng các khối lắp ghép khác.



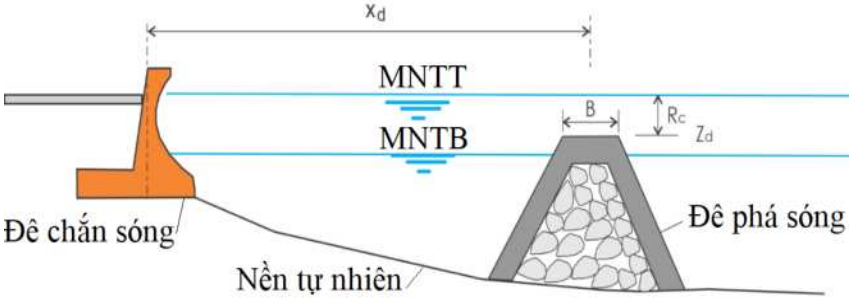
Hình 8. Giải pháp công trình nâng cao đỉnh đê kết hợp tường phụ

- Điều chỉnh cấu trúc đỉnh tường đê chắn sóng nhằm ngăn và tiêu thoát năng lượng sóng tràn qua. Theo đó, có thể sử dụng giải pháp hấp thụ sóng ngay phía trước, trên đỉnh và kết hợp tường phụ phía sau đê chắn sóng. Kết cấu hấp thụ sóng này có thể dùng các khối định hình Tetrapod hoặc đá hộc đổ trước đê.



Hình 9. Giải pháp tường phụ kết hợp kết cấu hập thụ sóng

- Xây dựng các đê phá sóng chủ động để tiêu giảm năng lượng sóng từ xa. Theo phương pháp này, chiều cao sóng tới giảm đáng kể trước khi tương tác lên đê chắn sóng, do đó giảm lưu lượng sóng tràn qua. Giải pháp phổ biến là sử dụng khối Haro hoặc Tetrapod định hình.



Hình 10. Giải pháp công trình bằng đê phá sóng chủ động

2.4. Tính toán lưu lượng sóng tràn theo phương pháp giải tích

Để tính toán lưu lượng sóng tràn theo phương pháp giải tích cần khảo sát, mô hình toán nhằm xác định số liệu hải văn. Đồng thời, căn cứ tiêu chuẩn ngành tính toán chiều cao đỉnh đê chắn sóng cần thiết và lựa chọn chiều cao phù hợp. Do tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9901:2023 [4] chưa đề cập đến công thức tính toán sóng tràn đỉnh kè chắn sóng cho kết cấu tường đứng. Đồng thời, đặc điểm địa hình độ dốc tự nhiên tại khu vực tính toán có sự thay đổi đột ngột từ độ sâu lớn đến độ sâu nhỏ (tại mép xanh), nên tính toán sóng tràn dạng xung kích tại mỗi điểm dọc đê chắn sóng được tác giả vận dụng công thức tính sóng tràn của Eurotop 2018, xác định như sau [3]:

- Trường hợp đê chắn sóng có tường đỉnh thấp:

$$q = 0,0155\left(\frac{H_{m0}}{h.s_{m-1,0}}\right)^{0,5} \exp(-2,2\frac{R_c}{H_{m0}})\sqrt{gH_{m0}^3} \quad (1)$$

- Trường hợp đê chắn sóng có tường đỉnh cao:

$$q = 0,002\left(\frac{H_{m0}}{h.s_{m-1,0}}\right)^{0,5}\left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3}\sqrt{gH_{m0}^3} \quad (2)$$

trong đó:

q – lưu lượng sóng tràn tính toán;

H_{m0} – Chiều cao sóng có nghĩa tại điểm tính toán, có thể xác định theo mô hình toán hoặc mô hình thực nghiệm;

h – Độ sâu nước, phụ thuộc mực nước tính toán và cao trình địa hình tự nhiên, xác định thông qua số liệu khảo sát định hình và hải văn;

$s_{m-1,0}$ – độ dốc sóng thiết kế, xác định theo biểu thức sau;

$$s_{m-1,0} = H_{m0} / L_{m-1,0} \quad (3)$$

R_c – độ lưu không, xác định phụ thuộc cao trình đỉnh đê và mực nước tính toán;

$L_{m-1,0}$ – chiều sài sóng trung bình, xác định theo biểu thức sau:

$$L_{m-1,0} = gT_{m-1,0}^2 / (2\pi) \quad (4)$$

$T_{m-1,0}$ – chu kỳ sóng trung bình, xác định từ kết quả mô hình toán hoặc mô hình thực nghiệm.

3. Đề xuất giải pháp công trình và đánh giá hiệu quả thích ứng

Có nhiều giải pháp nhằm hạn chế ảnh hưởng của yếu tố hải văn là điều kiện sóng tràn thích ứng với điều kiện hải văn thực tế. Trong nghiên cứu này, tác giả để xuất giải pháp công trình thụ động bằng biện pháp thay đổi cao trình đê chắn sóng xunh quanh bằng kết cấu bán lắp ghép có thể cơ động nhanh, sử dụng các vật liệu nhẹ, thân thiện môi trường nhằm thích ứng với hiện tượng sóng tràn tại 01 đảo nổi khu vực đảo xa bờ vùng phía Nam Biển Đông.

Số liệu hải văn để tính toán lưu lượng sóng tràn được tác giả tham khảo từ kết quả khảo sát và mô hình toán nhiệm vụ Điều tra, khảo sát, lập cơ sở dữ liệu chi tiết về điều kiện tự nhiên phục vụ cho quy hoạch, thiết kế và thi công các công trình quốc phòng, an ninh, kinh tế - xã hội ở khu vực đến năm 2025, tầm nhìn đến 2050; giám sát và đánh giá tác động của môi trường tự nhiên, xã hội đến mục tiêu phát triển bền vững của quần đảo và một số nhiệm vụ tương đồng khác: Mực nước trung bình với tần suất 50% là +1,34 mHĐ; Mực nước cao với tần suất 1% là +2,1 mHĐ (mực nước tính toán trong điều kiện gió mùa: +2,3 mHĐ); Mực nước thấp thiết kế: (tần suất 98%): +0,3 mHĐ.

Chiều cao sóng có nghĩa, chu kỳ sóng trung bình trong điều kiện gió mùa được tác giả tham khảo từ kết quả báo cáo mô hình toán tại 05 điểm tính toán dọc theo tuyến đê chắn sóng ở 01 đảo nổi xa bờ của Việt Nam và tổng hợp chi tiết trong bảng 1 sau (cao độ tự nhiên tương ứng mỗi vị trí mặt cắt đê chắn sóng khảo sát):

Bảng 1. Số liệu chiều cao, chu kỳ sóng trong điều kiện gió mùa tại điểm tính toán [5]

Điểm tính toán	Cao độ tự nhiên,	Chiều cao sóng có nghĩa (m)		Chu kỳ sóng trung bình (m)	
		Gió mùa	Gió mùa	Gió mùa Đông	Gió mùa

	(mHĐ)	Đông Bắc	Tây Nam	Bắc	Tây Nam
Điểm 01	-0,72	0,95	0,94	12,29	10,98
Điểm 02	-0,28	0,62	0,79	12,46	10,95
Điểm 03	-0,16	0,39	0,33	12,37	11,00
Điểm 04	-5,41	0,32	0,46	12,40	10,97
Điểm 05	-4,70	0,28	0,40	12,39	10,96

(Ghi chú: Điểm 01; 02; 03 tại đê chắn sóng loại 1; điểm 04 và 05 tại đê chắn sóng loại 4)

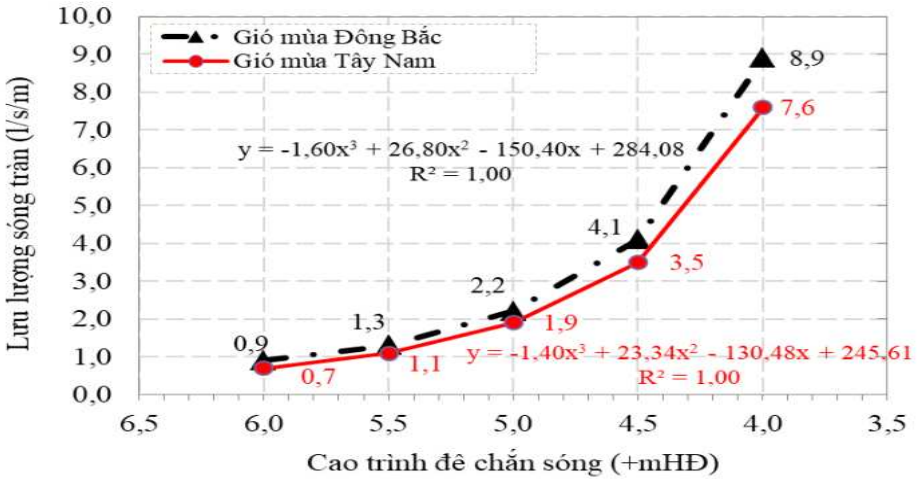
Vận dụng phương pháp giải tích tính toán sóng tràn đã được trình bày trên phần 2, trong bài toán nghiên cứu này tác giả tham khảo số liệu hải văn trong bảng 1, đề xuất giải pháp công trình theo hướng thay đổi cao trình đỉnh đê chắn sóng. Từ đó, xây dựng các đồ thị tương quan giữa lưu lượng sóng tràn tính toán với cao trình đỉnh đê chắn sóng ở cả 2 điều kiện gió mùa Đông Bắc và gió mùa Tây Nam tại 05 vị trí dọc đê chắn sóng của 01 đảo.

Kết quả tính toán được tác giả tổng hợp và trình bày trên bảng 2 sau:

Bảng 2. Bảng lưu lượng sóng tràn tính toán tại 05 vị trí đê chắn sóng khảo sát

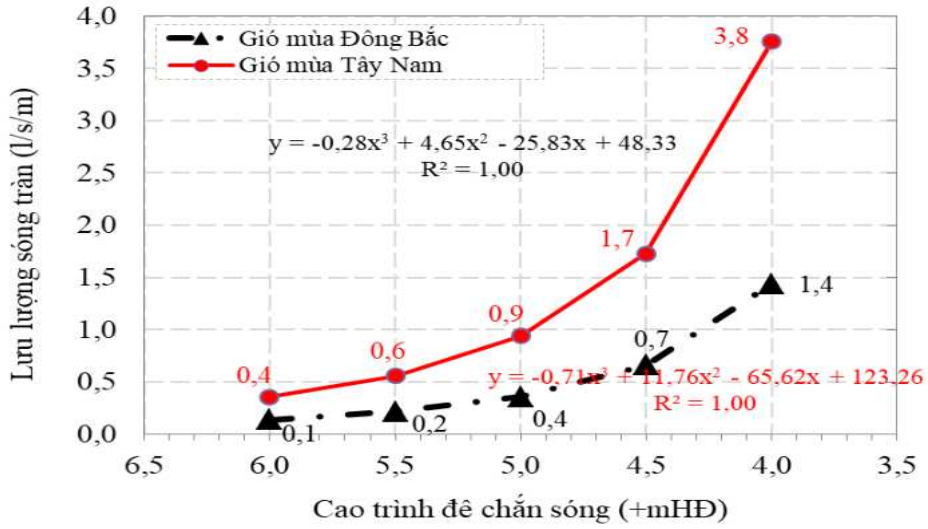
Cao trình đỉnh đê (mHĐ)	Lưu lượng sóng tràn (l/s/m)									
	Vị trí 01		Vị trí 02		Vị trí 03		Vị trí 04		Vị trí 05	
	Gió mùa Đông Bắc	Gió mùa Tây Nam	Gió mùa Đông Bắc	Gió mùa Tây Nam	Gió mùa Đông Bắc	Gió mùa Tây Nam	Gió mùa Đông Bắc	Gió mùa Tây Nam	Gió mùa Đông Bắc	Gió mùa Tây Nam
6,00	0,90	0,70	0,14	0,36	0,02	0,01	0,004	0,020	0,002	0,010
5,50	1,30	1,10	0,22	0,56	0,03	0,01	0,006	0,030	0,004	0,020
5,00	2,20	1,90	0,36	0,94	0,05	0,02	0,010	0,050	0,006	0,030
4,50	4,10	3,50	0,66	1,73	0,08	0,04	0,020	0,090	0,010	0,050
4,00	8,90	7,60	1,44	3,76	0,18	0,08	0,040	0,190	0,020	0,110

Từ kết quả tính toán tổng hợp, xây dựng các đồ thị tương quan giữa lưu lượng sóng tràn với cao trình đỉnh đê chắn sóng đề xuất, được thể hiện trên các đồ thị hình 11 đến hình 15.



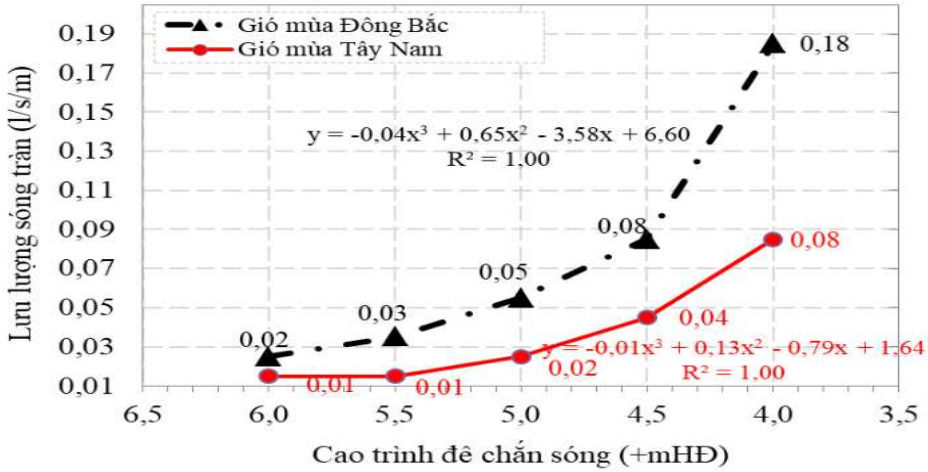
Hình 11. Đồ thị tương quan lưu lượng sóng tràn với cao trình đỉnh đê tại điểm 01

- Tại vị trí điểm tính toán 02:



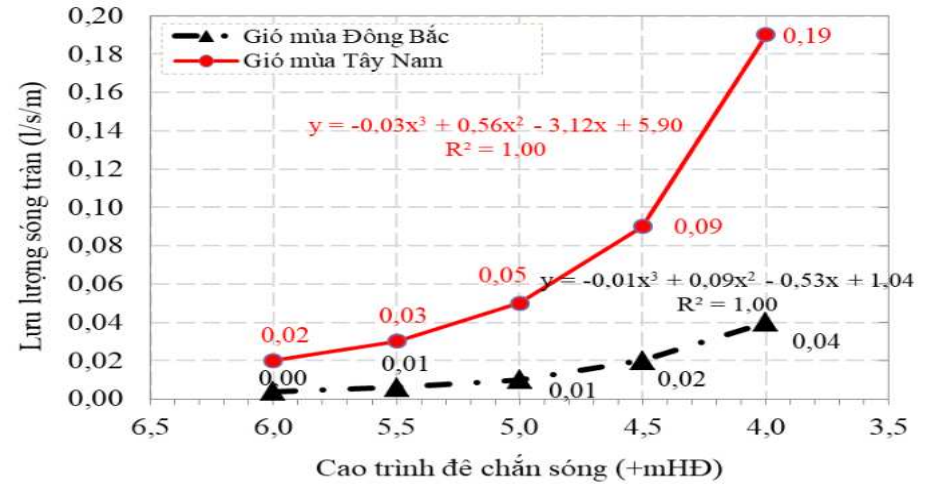
Hình 12. Đồ thị tương quan lưu lượng sóng tràn với cao trình đỉnh đê tại điểm 02

- Tại vị trí điểm tính toán 03:



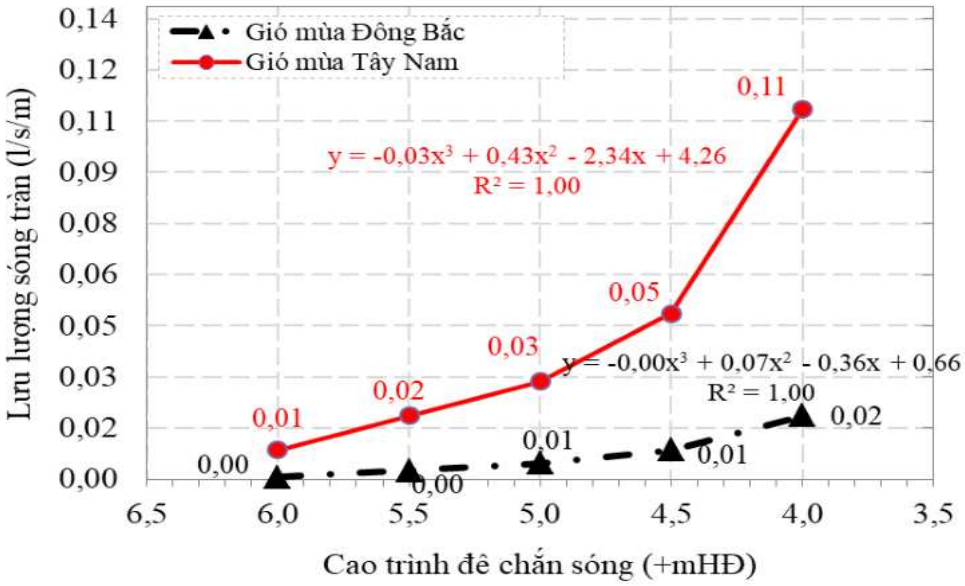
Hình 13. Đồ thị tương quan lưu lượng sóng tràn với cao trình đỉnh đê tại điểm 03

- Tại vị trí điểm tính toán 04:



Hình 14. Đồ thị tương quan lưu lượng sóng tràn với cao trình đỉnh đê tại điểm 04

- Tại vị trí điểm tính toán 05:



Hình 15. Đồ thị tương quan lưu lượng sóng tràn với cao trình đỉnh đê tại điểm 05

Các kết quả tương quan trên đồ thị hình 11 đến hình 15 cho thấy, lưu lượng sóng tràn giảm khá nhanh khi nâng cao trình đỉnh đê chắn sóng và ngược lại, đặc biệt là trường hợp gió mùa Tây Nam. Từ đó, căn cứ vào khả năng thoát nước hiện hữu của công trình trên đảo, có thể xác định lưu lượng sóng tràn cho phép và tương ứng lựa chọn cao trình đỉnh đê chắn sóng theo các đồ thị tương quan trên. Có thể đề xuất giải pháp hạn chế sóng tràn theo hướng nâng cao trình đỉnh đê bằng khối tường đỉnh composite gia cường hoặc vật liệu nhẹ khác, lắp ghép nhanh trên các tuyến đê chắn sóng hiện hữu phục vụ trực tiếp cho việc khai thác hiệu quả, gắn với điều kiện thực tiễn công trình của quân và dân trên đảo.

4. Kết luận và kiến nghị

Báo cáo đã đánh giá khái quát thực trạng sự tác động của điều kiện thuỷ hải văn lên công trình hiện hữu trên một số đảo xa bờ. Đồng thời tổng hợp một số giải pháp công trình hiện nay ở Việt Nam và trên thế giới đã, đang áp dụng. Phân tích cơ sở lý thuyết và đề xuất một số giải pháp nhằm thích ứng với điều kiện thực tế;

Xây dựng đồ thị và các hàm tương quan bậc 3 giữa lưu lượng sóng tràn tính toán với cao trình đỉnh đê chắn sóng đề xuất trong điều kiện gió mùa Đông Bắc và gió mùa Tây Nam. Đây là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn lớn nhằm căn cứ vào điều kiện và khả năng thoát nước do sóng tràn cụ thể tại mỗi điểm trên các đảo để xác định lưu lượng sóng tràn cho phép và từ đó đề xuất nâng cao đỉnh đê chắn sóng tại các đảo hiện hữu bằng kết cấu bán lắp ghép cơ động, sử dụng các vật liệu nhẹ, thân thiện môi trường và lực lượng trên đảo có thể tháo lắp nhanh theo điều kiện thực tiễn khai thác công trình, có triển vọng nâng cao tính hiệu quả ngăn sóng tràn khi điều kiện thủy hải văn bất lợi và tăng khả năng thích ứng cho các công trình sau đê;

Báo cáo vận dụng phương pháp giải tích khi tính sóng tràn theo tiêu chuẩn Eurotop 2018 có sơ đồ dạng tường đứng, trong khi đó kết cấu đê chắn sóng ở các đảo xa bờ của Việt Nam dạng mái nghiêng với tường đỉnh có mặt cong hắt sóng. Nên, cần cần tiếp tục nghiên cứu theo phương pháp mô phỏng số kết hợp thực nghiệm để đánh giá đầy đủ và sát thực tiễn, làm căn cứ đề xuất các nhiệm vụ theo hướng thích nghi với điều kiện tự nhiên thực tế, đặc biệt là điều kiện hải văn trên các đảo xa bờ của Việt Nam thuộc vùng Nam Biển Đông.

Tài liệu tham khảo

[1]. Thiều Quang Tuấn, *Tổng quan về các nghiên cứu và phương pháp tính toán sóng tràn qua đê biển,* 2010;

[2]. T. Schoonees, *Impermeable recurve seawalls to reduce wave overtopping," MEng(Research)* , Faculty of Engineering, Stellenbosch University, 2014;

[3]. EurOtop, *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*, 2018;

[4]. Bộ Khoa học và công nghệ, *TCVN 9901:2023: Công trình đê biển – Yêu cầu thiết kế, 2023;*

[5]. Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, *Báo cáo khảo sát thuỷ hải văn, địa hình và mô hình toán thuộc nhiệm vụ KTS tại 01 đảo nổi xa bờ của Việt Nam,* 2023;

[6]. Trần Thanh Tùng, *"Nghiên cứu chế tạo cấu kiện tường biển có mũi hắt sóng phục vụ xây dựng công trình bảo vệ bờ đảo và bờ các khu vực đô thị, khu du lịch ven biển",* Đề tài KHCN thuộc Bộ Xây dựng, mã số TĐ 145-17, 2020.

Research on Evaluating Semi-Prefabricated Mobile Solutions to Raise Dike Crest Levels and Reduce Overtopping Waves for Offshore Islands

Abstract: *The protective structures that have been and are being built on offshore islands in the southern East Sea play a crucial role in the strategic development of sustainable marine economics by 2030, with a vision to 2045. At the same time, they contribute to strengthening national security and defense, as well as protecting maritime sovereignty. However, during operation, under the impact of extreme climate change—especially the complex oceanographic conditions of the East Sea—there have been instances of seawater overtopping and infiltrating these structures, affecting their technical and tactical operational capabilities. The cause is that the structural design solutions have not fully mitigated the impacts of abnormal oceanographic conditions and the unpredictable effects of sea level rise. This has led to seawater overtopping the breakwater system and flowing into the structures, significantly affecting their operational efficiency as intended in the design. The report presents an integrated analytical approach combined with expert methods to evaluate the current condition and propose a solution for raising the crest elevation of breakwaters using prefabricated structures. The results include the development of correlation graphs and third-degree correlation functions between the computed overtopping wave flows and the proposed breakwater crest heights at five locations along the breakwater on one offshore island in Vietnam.*

Keywords: Structures, adaptation, impact, oceanographic conditions, mathematical model, overtopping waves, flow rate

❑

Đánh giá sự suy giảm mức cường độ tiếng ồn bằng thực nghiệm khi sử dụng tấm cách âm nỉ Acoustic Sonic

KS. Nguyễn Văn Hợi[1], Nguyễn Văn Ý, Hoàng Minh Hà, Nguyễn Đăng Hiển

[1]. Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: Nguyenhoimta0209@gmail.com

Tóm tắt

Bài báo trình bày những nghiên cứu thực nghiệm xác định sự suy giảm mức cường độ tiếng ồn khi sử dụng tấm màn chắn bằng nỉ Acounstic Sonic. Cường độ tiếng ồn được tạo ra từ máy nổ điện, khi sử dụng tấm màn chắn bằng nỉ có chiều dày khác nhau sẽ tạo ra hiệu quả cách âm khác nhau. Qua nghiên cứu có thể xác định quy luật suy giảm mức cường độ tiếng ồn theo công suất nguồn gây ồn và chiều dày tấm màn chắn, làm cơ sở đề xuất biện pháp giảm thiểu mức cường độ tiếng ồn hàng không.

Từ khóa: *Tiếng ồn hàng không; máy nổ điện; động cơ máy bay;*

1. Đặt vấn đề

Ô nhiễm tiếng ồn ảnh hưởng đến cả sức khỏe và hành vi con người. Ô nhiễm tiếng ồn có thể gây tăng huyết áp, căng thẳng, ù tai, giảm thính lực, rối loạn giấc ngủ và các tác hại khác. Tổ chức y tế Thế giới WHO khuyến cáo tiếng ồn trung bình không vượt quá 40 decibel tại các khu vực dân cư vào ban đêm để phòng tránh sự tác động đến sức khỏe. Sự tiếp xúc thường xuyên với tiếng ồn có độ lớn trên 80 decibel có thể làm giảm thính lực. Tiếng ồn giao thông nói chung và tiếng ồn hàng không nói riêng là một dạng của dao động âm thanh, là sóng âm lan truyền trong môi trường không khí, phụ thuộc vào môi trường truyền âm có những đặc trưng vật lý, âm học riêng. Điều này đặt ra các vấn đề nghiên cứu nhằm xác định cường độ tiếng ồn từ đó đề ra các giải pháp giảm thiểu cường độ tiếng ồn cho khu vực công trình trong cảng hàng không và vùng lân cận.

Khi nghiên cứu đánh giá cường độ tiếng ồn tại các cảng hàng không, ICAO [1] đã quy định 03 điểm quan trắc đánh giá cường độ tiếng ồn như bảng sau:

Bảng 1: Quy định vị trí quan trắc cường độ tiếng ồn hàng không

Tên loại máy bay	**Điểm đo ồn**		**Vị trí đo**
Máy bay phản lực cận âm	Tại điểm đo tiếng ồn bên		Điểm trên đường song song và cách tim đường CHC hoặc tim đường CHC kéo dài 650 m, tại đó mức ồn lớn nhất trong quá trình cất cánh
	Tại điểm đo tiếng ồn cầu vượt		Điểm trên tim kéo dài của đường CHC và cách điểm bắt đầu lăn bánh 6,5km
	Tại điểm đo tiếng ồn tiếp cận		Điểm trên mặt đất, trên đường tâm kéo dài của đường CHC, cách đường CHC 120 m (394 ft) theo chiều thẳng đứng bên dưới đường đi xuống 3° xuất phát từ điểm cách ngưỡng 300 m.
Máy bay phản lực	Tại điểm đo tiếng ồn bên	Đối với MB ĐC phản lực	Điểm trên đường song song và cách tim đường CHC 450 m, tại đó độ ồn lớn nhất trong quá trình cất cánh
		Đối với máy bay cánh quạt	Điểm trên tim đường CHC kéo dài 650 m theo phương thẳng đứng bên dưới đường bay lấy độ cao khi cất cánh hoàn toàn.
	Tại điểm đo tiếng ồn cầu vượt		Điểm trên tim đường CHC kéo dài và cách 6,5 km kể từ khi bắt đầu lăn bánh
	Tại điểm đo tiếng ồn tiếp cận		Điểm trên mặt đất, trên tim kéo dài của đường CHC, cách ngưỡng đường CHC 2 000 m. Trên mặt đất bằng phẳng, điều này tương ứng với vị trí 120 m (394 ft) theo phương thẳng đứng bên dưới đường đi xuống 3° xuất phát từ một điểm cách ngưỡng 300 m.

Trực thăng	Các điểm đo tiếng ồn tham chiếu khi cất cánh	- Một điểm tham chiếu đường bay nằm trên mặt đất theo chiều dọc bên dưới đường bay được xác định trong quy trình tham chiếu cất cánh và 500 m theo chiều ngang theo hướng bay tính từ điểm bắt đầu quá trình chuyển đổi sang bay lấy độ cao trong quy trình tham chiếu - Hai điểm khác trên mặt đất được bố trí đối xứng ở hai bên đường bay được xác định trong quy trình cất cánh quy định ở độ cao 150 m và nằm trên đường thẳng đi qua điểm quy chiếu đường bay.
	Các điểm đo tiếng ồn tham chiếu trên không	- Điểm tham chiếu đường bay nằm trên mặt đất 150 m (492 ft) theo phương thẳng đứng bên dưới đường bay được xác định trong quy trình tham chiếu bay qua - Hai điểm khác trên mặt đất được bố trí đối xứng ở 150 m ở cả hai phía của đường bay được xác định trong quy trình tham chiếu bay qua và nằm trên đường thẳng đi qua điểm tham chiếu đường bay.
	Tiếp cận các điểm đo tiếng ồn chuẩn	- Điểm tham chiếu đường bay nằm trên mặt đất 120 m (394 ft) theo phương thẳng đứng bên dưới đường bay được xác định trong quy trình tham chiếu tiếp cận. Trên mặt đất bằng phẳng, vị trí này tương ứng với vị trí 1 140 m tính từ giao điểm của đường tiếp cận 6,0° với mặt phẳng mặt đất; - Hai điểm khác trên mặt đất được bố trí đối xứng ở hai bên đường bay 150 m được xác định trong phương thức chuẩn tiếp cận và nằm trên đường thẳng đi qua điểm chuẩn đường bay.

Tuy nhiên việc thường xuyên có mặt tại các sân bay để nghiên cứu đánh giá cường độ tiếng ồn hàng không là một điều hết sức khó khăn do các yêu cầu về thủ tục, an toàn an ninh hàng không... Do vậy nhóm nghiên cứu tạo ra cường độ tiếng ồn tương đương mức cường độ tiếng ồn một số loại máy bay, từ đó xây dựng được mô hình đo ồn và sử dụng tấm màn chắn nỉ acounstic sonic làm tấm màn chắn, từ đó làm cơ sở đề xuất giải pháp sử dụng tấm màn chắn nhằm giảm thiểu cường độ tiếng ồn mà thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm, giảm thiểu chi phí, thủ tục khi giảm cường độ thí nghiệm ngoài sân bay.

2. Cơ sở lý thuyết quy luật truyền âm thanh

Khi nghiên cứu về âm thanh, người ta thường sử dụng đại lượng mức cường độ âm (L), là giá trị logarit thập phân của tỉ số giữa cường độ âm đang xét I so với một giá trị cường độ âm chuẩn I_0 ($I_0 = 10^{-12}$ W/cm^2).

$$L = \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) (\text{B}) \quad \text{hoặc} \quad L = 10.\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) (\text{dB}) \tag{1}$$

Trong đó cường độ âm I là đại lượng đặc trưng cho năng lượng của sóng âm truyền qua một đơn vị diện tích đặt vuông góc với phương truyền sóng trong một đơn vị thời gian.

$$I = \frac{W}{t.S} = \frac{P}{S} \left(\frac{W}{m^2}\right) \tag{2}$$

Trong đó: W: năng lượng của sóng âm (J);

P: Công suất phát âm của nguồn (W)

S: Diện tích mặt vuông góc với phương truyền âm (m^2)

t: Thời gian truyền sóng âm (s)

Trong không gian hở (sóng âm chạy) còn gọi là không gian tự do, cường độ âm phụ thuộc vào khoảng cách tới nguồn gây ồn theo quy luật:

$$I_r = \frac{I}{4\pi r^2} \tag{3}$$

Trong đó: I_r là cường độ âm cách nguồn bằng 1 khoảng cách r.

Như vậy, mức cường độ âm phụ thuộc vào công suất (cường độ) âm và khoảng cách tới nguồn âm, đây là cơ sở đặt ra bài toán nghiên cứu thực nghiệm tạo tiếng ồn.

Nguyên lý cách âm.

Nói nguyên lý cách âm tức là nói nguyên nhân gây ra tổn thất năng lượng âm khi kết cấu tiếp xúc với trường năng lượng âm.

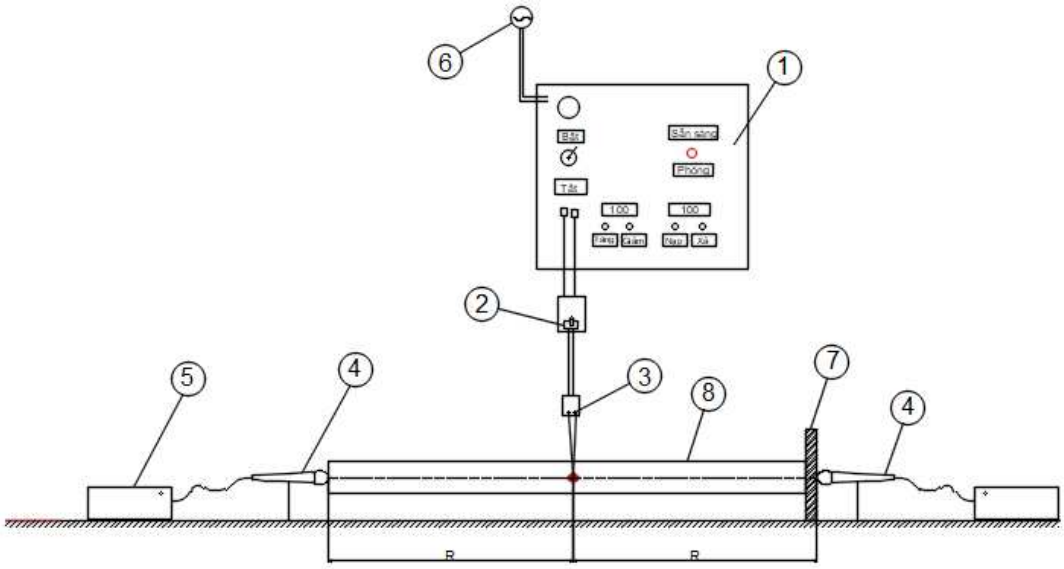
Khi sóng âm tới trên bề mặt vật liệu sẽ gây ra một áp lực, cưỡng bức vật liệu (hay kết cấu) dao động uốn cong, năng lượng âm phải tiêu hao để thắng sức cản nội bộ duy trì dao động, kết quả năng lượng âm biến thành năng lượng cơ, và cuối cùng biến thành nhiệt năng. nếu vật liệu rỗng trong quá trình sóng âm xuyên qua khe rỗng phải sử dụng năng lượng để thắng trở lực ma sát và tính nhớt của không khí, gây cho các sợi xơ và không khí dao động lui tới, trong khe rỗng, kết quả biến năng lượng âm thành năng lượng nhiệt.

Để cách âm, người ta dùng vật liệu hoặc kết cấu chặn sự truyền đi của âm thanh tạo ra môi trường yên tĩnh. Khi âm thanh đi vào vật liệu, năng lượng xuyên qua mặt bên kia của vật liệu rất nhỏ, chứng tỏ vật liệu có khả năng cách âm tốt. Chênh lệch decibel giữa năng lượng âm thanh đi vào và năng lượng âm thanh xuyên qua ở một mặt khác chính là lượng cách âm của vật liệu.

3. Mô hình và thiết bị thí nghiệm

3.1. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm được thiết lập như trên hình vẽ theo các công suất khác nhau từ nguồn gây ồn là các đầu nổ điện (3) đến thiết bị đo ồn.



Hình 1. Sơ đồ thử nghiệm bằng mô hình nổ điện
1. Thiết bị nổ điện; 2. Công tắc đóng, ngắt mạch điện, 3. Dây điện tạo nổ;
4. Micro thu tiếng ồn, 5. Thiết bị đo cường độ tiếng ồn; 6.Nguồn điện 220V;
7. Tấm giảm ồn; 8. Hộp cách âm kích thước 40x40x100 cm

3.2. Các thiết bị thí nghiệm

- Hệ thống thiết bị nổ điện với đầu nổ điện làm từ dây đồng, dựa trên nguyên lý tích điện và phóng qua đầu hàn thiếc, tạo tiếng nổ đơn (hình 2). Cường độ tiếng nổ được thay đổi thông

qua công suất máy nổ điện (công suất cho phép từ 10 – 500 J). Quá trình nổ điện được thực hiện thông qua công tắc đóng ngắt mạch 200 A.



a) Máy nổ điện b) Đầu nổ điện c) Công tắc

Hình 2. Bộ thiết bị máy nổ điện tạo tiếng ồn

- Thiết bị đo cường độ tiếng ồn: Máy đo Minimate Pro của hãng Instatel - Canada (với các thông số kỹ thuật: Nhà sản xuất: Instatel; xuất xứ: Canada; phạm vi đo: 30-140dB (max 160dB); đáp ứng tần số: 10 Hz - 20 kHz) và thiết bị đo ồn cầm tay Total TETSL01 của Trung Quốc để đo kiểm chứng (hình 3).



Hình 3. Máy đo độ ồn

- Hộp cách âm:

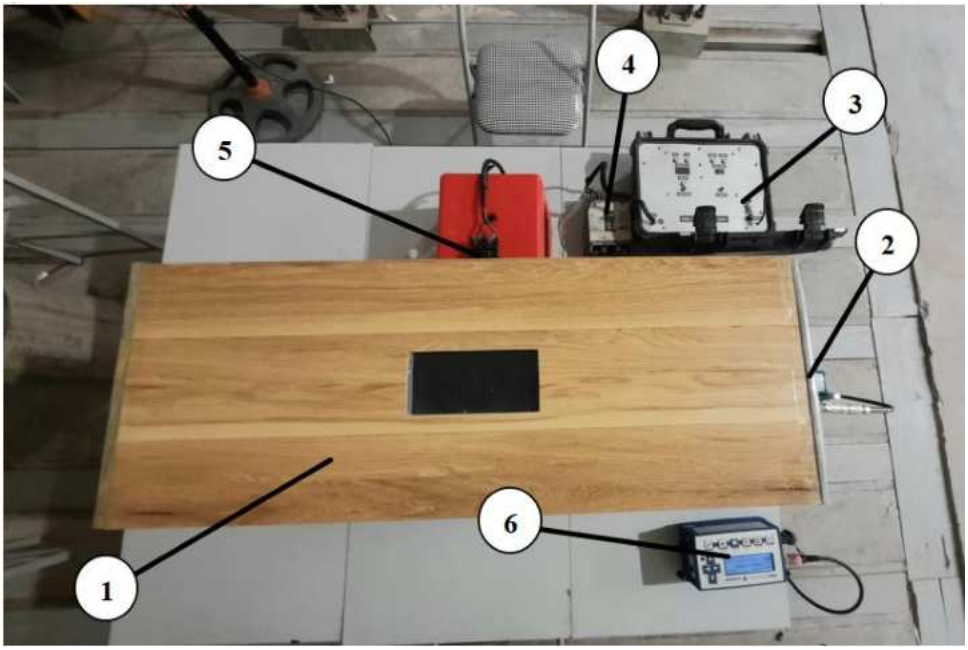
Hộp cách âm làm bằng vật liệu gỗ có kích thước 40x40x100 cm 2 đầu được để hở, bên trong được đệm một lớp sợi thủy tinh để giảm thiểu tối đa việc phản xạ âm thanh, ảnh hưởng đến kết quả đo. Bên trên hộp cách âm là có 1 lớp kính dày trong suốt, để quan sát và kiểm tra vị trí kíp nổ. Mặt bên hộp cách âm ở vị trí trọng tâm hộp cách về 2 bên hộp theo chiều dài mỗi bên 50cm có 1 lỗ nhỏ để đưa kíp nổ điện vào hộp cách âm (hình 4).



Hình 4. Hộp cách âm kích thước 40x40x100 cm

- Tấm chắn giảm ồn: Dựa vào đặc tính và tính chất cách âm **c**ăn cứ vào lý thuyết mà nhóm nghiên cứu đã xây dựng. Nhóm nghiên cứu đã chọn tấm nỉ acounstic sonic để tiến hành thí nghiệm đánh giá quy luật suy giảm của chúng với sự thay đổi của mức cường độ âm thanh từ đó đưa ra kết luận về độ chính xác của mô hình.

- Sơ đồ bố trí thí nghiệm được bố trí như hình 4



Hình 4. Mô hình thí nghiệm xác định quy luật giảm ồn khi sử dụng màn chắn

1.Hộp cách âm kích thước 40x40x100 cm; 2. Màn chắn nỉ acounstic sonic; 3. Thiết bị nổ điện; 4. Công tắc; 5. Kíp nổ điện;6. Máy đo ồn Minimate Pro (máy đo ồn 1); 7. Đầu Micro của máy đo ồn 1; 8. Máy đo ồn Total (máy đo ồn 2)

3.3. Trình tự thí nghiệm:

Bước 1: Chuẩn bị các dụng cụ để tiến hành thí nghiệm: Kíp nổ điện; hộp cách âm kích thước 40x40x100 cm; các màn chắn thực nghiệm; 2 đầu đo tiếng ồn gồm máy đo ồn *Minimate Pro và* máy đo ồn Total TETSL01*;* 1 Micro*;* 1 Thiết bị nổ điện; 1 Nguồn điện xoay chiều 220V.

Bước 2: Lắp mô hình thí nghiệm như mô hình 3.10 đã nêu trên: 1 bên hộp cách âm được bịt kín lại đảm bảo cách âm tốt; Bên còn lại của hộp cách âm liên kết màn chắn thực nghiệm.

Sau đó tiến hành liên kết kíp nổ giả đã chế tạo vào thiết bị nổ điện và đưa kíp nổ vào bên trong hộp cách âm qua 1 lỗ nhỏ nằm ở giữa hộp cách âm sau cho ngồi nổ nằm ở vị trí trung tâm của hộp cách âm và nằm thẳng hướng so với 2 đầu đo (lúc này máy nổ điện ở trạng thái nghỉ chưa được cắm nguồn công tắc an toàn ở trạng thái *"off").*

Các máy đo ồn ở trạng thái mở và sẵn sàng đo tiếng ồn; đầu micro của máy đo ồn Total TETSL01 được đặt vào bên trong hộp cách âm, còn đầu micro của máy đo ồn Minimate được đặt bên ngoài hộp cách âm nằm ở giữa tâm đo.

Lưu ý đầu micro được đặt thẳng hướng so với đầu kíp nổ và cùng độ cao để đo được chính xác và hạn chế sai số.

Bước 3: Kiểm tra độ kín của hộp cách âm và màn chắn sau đó cung cấp nguồn điện 220V cho thiết bị nổ điện, chuyển công tắc an toàn sang trạng thái *"on"* và tiến hành đặt công suất gây nổ và nạp điện cho máy nổ điện.

Khi máy nổ điện đã nạp đầy điện ta tiến hành kiểm tra trạng thái làm việc của các thiết bị và đảm bảo công tác an toàn xung quanh môi trường thí nghiệm, và tiến hành gây nổ kíp nổ điện bằng cách nhấn nút " PHÓNG" trên thiết bị nổ điện.

Bước 4: Khi kíp nổ điện nổ xong ta đưa công tắc an toàn về trạng thái "off", và đồng thời ngắt nguồn điện 220V ra khỏi thiết bị nổ điện và tiến hành ghi số liệu.

Bước 5: Tháo dây nổ điện ra khỏi máy, chuẩn bị cho lần thí nghiệm tiếp theo.

Lưu ý: Trong quá trình thí nghiệm phải luôn đảm bảo công tác an toàn, Trong quá trình nạp điện cho thiết bị nổ điện và lúc tiến hành gây nổ không được lại gần kíp nổ giả để tránh gây mất an toàn.

4. Kết quả thí nghiệm

Từ file số liệu thu được, xử lý các số liệu thô, lưu file số liệu dưới dạng file excel gồm các cột theo mẫu sau:

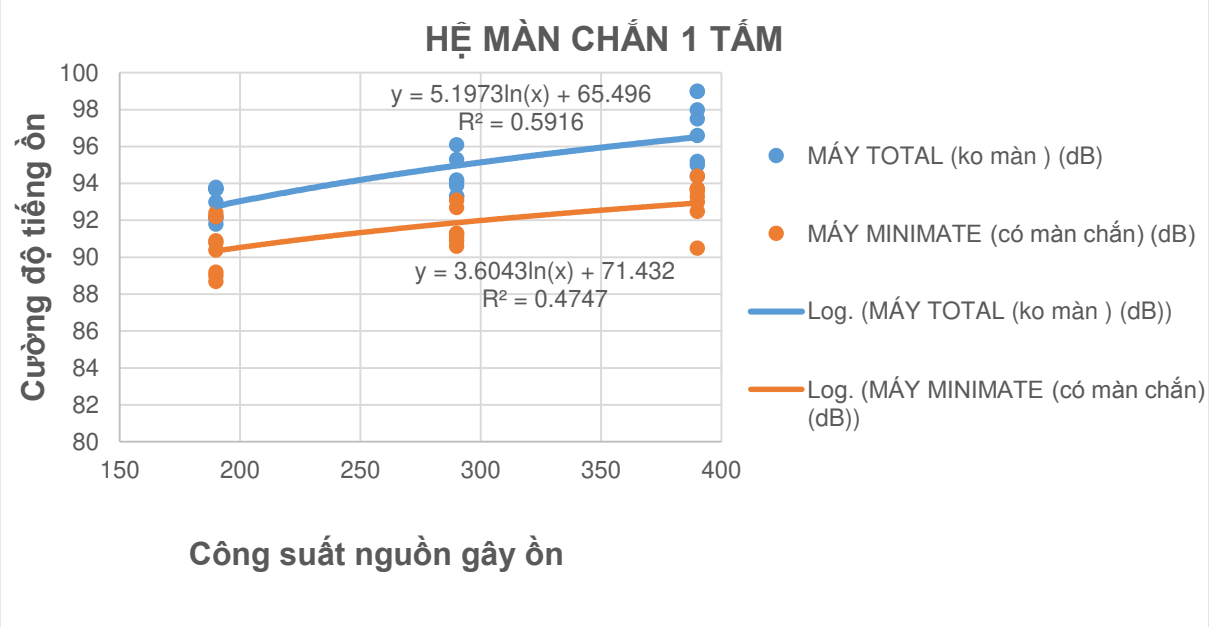
- ***Xác định độ giảm mức cường độ âm khi sử dụng hệ 1 tấm nỉ Acounstic Sonic dày 8mm:***

Bảng 2. Số liệu đo mức cường độ tiếng ồn khi dùng 1 tấm nỉ Acounstic Sonic

Lần đo	Công suất (j)	Máy total (không có màn) (db)	Máy minimate (có màn chắn) (db)	Độ giảm âm (db)	Độ giảm âm trung bình (db)
1	190	91.8	89.2	2.6	2.55
2	190	93	90.4	2.6	
3	190	93.7	92.4	1.3	
4	190	92.2	90.8	1.4	
5	190	92.1	89	3.1	
6	190	93.7	88.7	5	
7	190	93.7	90.9	2.8	

Lần đo	Công suất (j)	Máy total (không có màn) (db)	Máy minimate (có màn chắn) (db)	Độ giảm âm (db)	Độ giảm âm trung bình (db)
8	190	93.8	92.2	1.6	
9	290	96.1	92.7	3.4	2.74
10	290	94.1	91.3	2.8	
11	290	94.2	90.6	3.6	
12	290	93.3	91.1	2.2	
13	290	93.3	90.9	2.4	
14	290	93.9	91.3	2.6	
15	290	95.3	93.1	2.2	
16	390	95.2	93.7	1.5	3.75
17	390	96.6	90.5	6.1	
18	390	99	93.3	5.7	
19	390	99	93.7	5.3	
20	390	95	93.6	1.4	
21	390	98	93	5	
22	390	97.5	94.4	3.1	
23	390	94.4	92.5	1.9	

Căn cứ vào bảng số liệu kết quả đo, ta thiết lập được các đồ thị thể hiện sự giảm cường độ tiếng ồn khi sử dụng hệ 1 tấm nỉ Acounstic Sonic cùng khoảng cách đến nguồn gây ồn theo các công suất 190J, 290J, 390J. Đồ thị có dạng như sau:



Hình 5. Đồ thị thể hiện sự giảm cường độ tiếng ồn khi sử dụng hệ 1 tấm nỉ Acounstic Sonic

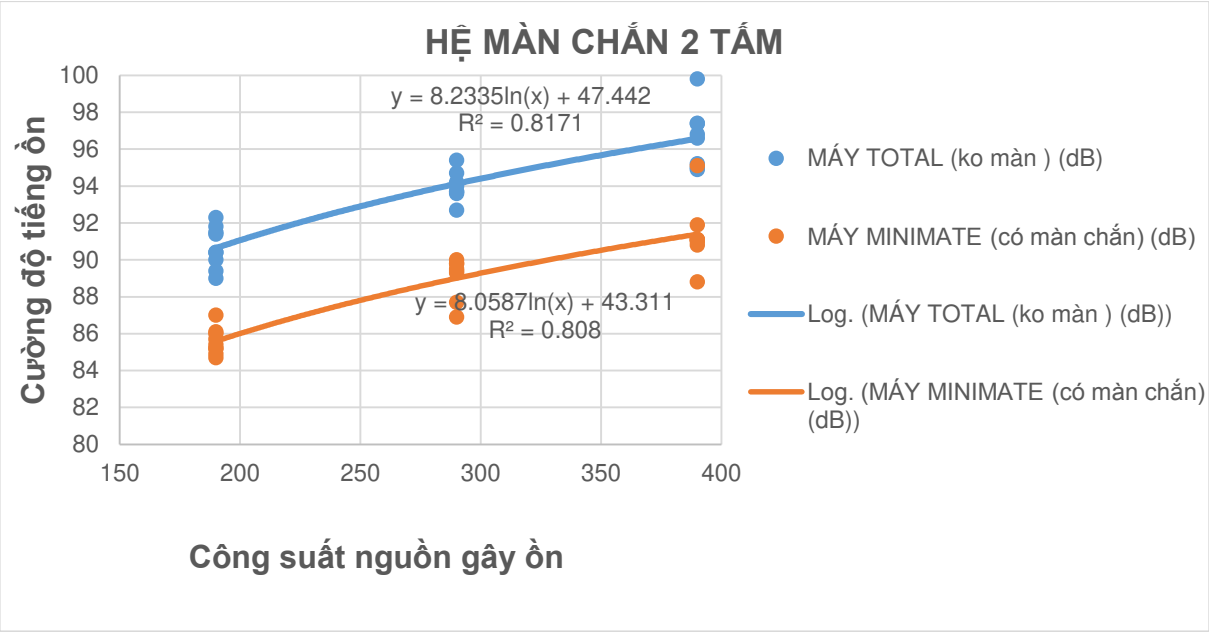
Đối với hệ 1 tấm màn chắn thì độ giảm ồn trung bình là 3.01Db. Độ giảm ồn tăng khi tăng công suất nguồn gây ồn.

- ***Xác định độ giảm mức cường độ âm khi sử dụng hệ 2 tấm nỉ Acounstic Sonicdày 8mm:***

Bảng 3. Số liệu đo mức cường độ tiếng ồn khi dùng 2 tấm nỉ Acounstic Sonic

Lần đo	**Công suất (j)**	**Máy total (ko màn) (db)**	**Máy minimate (có màn chắn) (db)**	**Độ giảm âm (db)**	**Độ giảm âm trung bình (db)**
1	190	90	85.7	4.3	5.11
2	190	91.4	87	4.4	
3	190	89.4	85.2	4.2	
4	190	91.8	86.1	5.7	
5	190	92.3	85.4	6.9	
6	190	91.5	86	5.5	
7	190	90.4	84.7	5.7	
8	190	90.4	85.2	5.2	
9	190	89	84.9	4.1	
10	290	93.6	87.7	5.9	4.95
11	290	93.7	89.3	4.4	
12	290	92.7	86.9	5.8	
13	290	94.2	89.4	4.8	
14	290	95.4	90	5.4	
15	290	93.7	89.5	4.2	
16	290	94.7	89.8	4.9	
17	290	94	89.8	4.2	
18	390	97.4	91.1	6.3	5.28
19	390	96.6	91.1	5.5	
20	390	96.8	91.9	4.9	
21	390	99.8	95.1	4.7	
22	390	94.9	90.8	4.1	
23	390	95	88.8	6.2	
24	390	97.4	91.1	6.3	
25	390	95.2	91	4.2	

Căn cứ vào bảng số liệu kết quả đo, ta thiết lập được các đồ thị thể hiện sự giảm cường độ tiếng ồn khi sử dụng hệ 2 tấm nỉ Acounstic Sonic cùng khoảng cách đến nguồn gây ồn theo các công suất 190J, 290J, 390J. Đồ thị có dạng như sau:



Hình 6. Đồ thị thể hiện sự giảm cường độ tiếng ồn khi sử dụng hệ 2 tấm nỉ Acounstic Sonic

Khi sử dụng 2 tấm màn chắn thì độ giảm âm trung bình là 5.11 và độ giảm âm ổn định khi thay đổi công suất nguồn gây ồn. Đây là hệ tấm màn chắn khá hiệu quả trong việc giảm ồn.

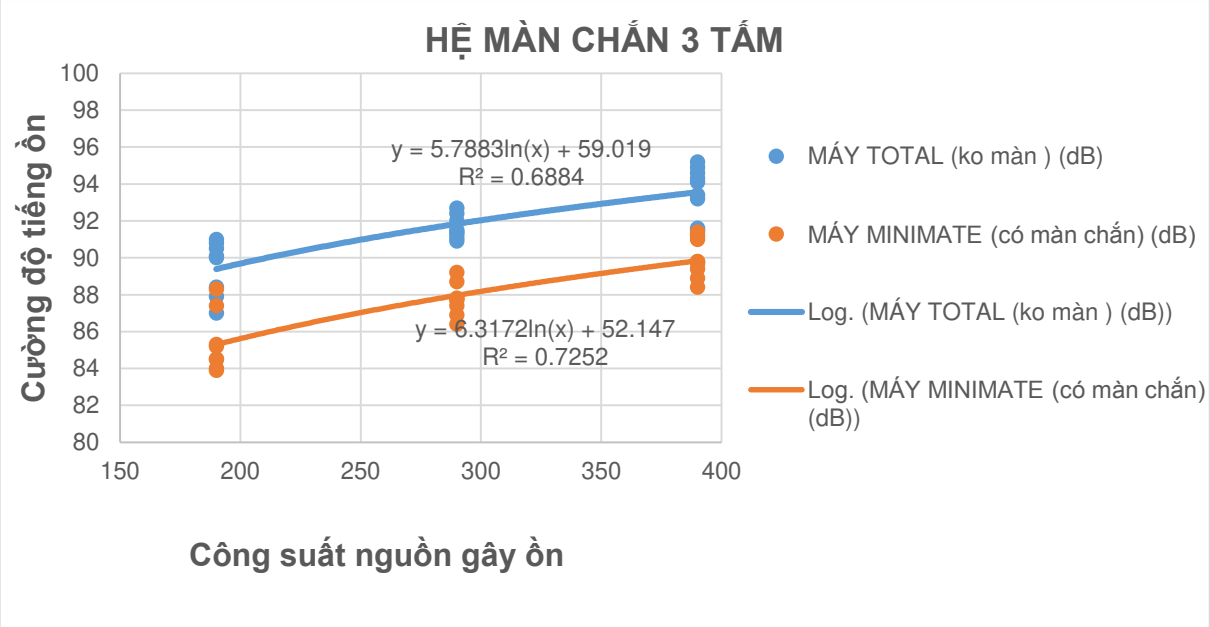
- Xác định độ giảm mức cường độ âm khi sử dụng hệ 3 tấm nỉ Acounstic Sonicdày 8mm:

Bảng 4. Số liệu đo mức cường độ tiếng ồn khi dùng 3 tấm nỉ Acounstic Sonic

Lần đo	Công suất (j)	Máy total (ko màn) (db)	Máy minimate (có màn chắn) (db)	Độ giảm âm (db)	Độ giảm âm trung bình (db)
1	190	90.5	87.4	3.1	4.08
2	190	90.1	84.5	5.6	
3	190	90	84	6	
4	190	87	84.5	2.5	
5	190	88.4	85.3	3.1	
6	190	90.8	83.9	6.9	
7	190	87.9	85.2	2.7	
8	190	91	88.3	2.7	
9	290	92.4	87.4	5	3.93
10	290	91.4	86.9	4.5	
11	290	90.9	87.7	3.2	
12	290	91.5	87.8	3.7	
13	290	91.3	87.8	3.5	
14	290	92	86.4	5.6	
15	290	92.7	88.7	4	

Lần đo	Công suất (j)	Máy total (ko màn) (db)	Máy minimate (có màn chắn) (db)	Độ giảm âm (db)	Độ giảm âm trung bình (db)
16	290	91.1	89.2	1.9	
17	390	94.6	89.8	4.8	3.63
18	390	94.3	88.4	5.9	
19	390	94.1	89.8	4.3	
20	390	93.2	89.4	3.8	
21	390	91.5	88.9	2.6	
22	390	94.9	91.2	3.7	
23	390	93.4	91.4	2	
24	390	91.6	89.7	1.9	

Căn cứ vào bảng số liệu kết quả đo, ta thiết lập được các đồ thị thể hiện sự giảm cường độ tiếng ồn khi sử dụng hệ 3 tấm nỉ Acounstic Sonic cùng khoảng cách đến nguồn gây ồn theo các công suất 190J, 290J, 390J. Đồ thị có dạng như sau:



Hình 7. Đồ thị thể hiện sự giảm cường độ tiếng ồn khi sử dụng hệ 3 tấm nỉ Acounstic Sonic

Đối với hệ này độ giảm mức cường độ âm trung bình là 3.88 dB, khi thay đổi công suất nguồn gây ồn thì độ giảm âm có thay đổi nhưng không đáng kể. Công suất nguồn gây ồn càng tăng thì hiệu quả giảm ồn càng giảm.

Trong đó đường tuyến tính được xác định theo quy luật hàm logarit (phù hợp với quy luật lý thuyết). Hệ số tương quan R được xác định theo hàm số trong chương trình Microsoft Excel.

Với từng công suất nguồn gây ồn khác nhau và hệ tấm màn chắn có chiều dày khác nhau, ta thu được bảng tổng hợp kết quả thực nghiệm đánh giá sự suy giảm mức cường độ âm khi sử dụng tấm màn chắn nỉ Acounstic Sonic như sau:

STT	Công suất nguồn gây ồn	Độ giảm ồn khi sử dụng 1 tấm màn chắn (dB)	Độ giảm ồn khi sử dụng 2 tấm màn chắn (dB)	Độ giảm ồn khi sử dụng 3 tấm màn chắn (dB)
1	190J	2.55	5.11	4.08
2	290J	2.74	4.95	3.93
3	390J	3.75	5.28	3.63
Trung bình		3.01	5.11	3.88

Như vậy, việc thiết lập, đưa ra các quy luật thực nghiệm về sự suy giảm mức cường độ tiếng ồn cho phép có thể sơ bộ lựa chọn chiều dày của tấm màn chắn, công suất nguồn gây ồn phù hợp với cường độ tiếng ồn của một số loại máy bay dân dụng và quân sự có mức cường độ tiếng ồn cần nghiên cứu tại các điểm quan trắc từ 85 dB đến 108 dB.

Hệ màn chắn 2 tấm nỉ Acounstic Sonic (mỗi tấm dày 8mm) là hệ có hiệu quả nhất trong việc giảm ồn và có độ giảm ồn ổn định khi thay đổi công suất nguồn gây ồn.

5. Kết luận

Qua nghiên cứu thực nghiệm, ta thấy việc xây dựng mô hình thí nghiệm xác định quy luật suy giảm cường độ âm thanh khi sử dụng tấm màn chắn với máy nổ điện, buồng đo ồn, các máy đo mức cường độ âm thanh là hoàn toàn khả thi trong điều kiện phòng thí nghiệm.

Bằng thực nghiệm, chúng ta có thể thấy khi sử dụng tấm nỉ Acounstic Sonic làm tấm màn chắn giảm ồn thì mức cường độ âm đo được đã giảm rõ rệt.

Tuy nhiên khi thay đổi chiều dày tấm màn chắn thay đổi thì độ suy giảm mức cường độ âm cũng thay đổi. Như kết quả thu thập được thì hệ màn chắn 2 tấm nỉ Acounstic Sonic (mỗi tấm dày 8mm) là hệ có hiệu quả nhất trong việc giảm ồn và có độ giảm ồn ổn định khi thay đổi công suất nguồn gây ồn.

Sự thay đổi mức độ giảm ồn không biến đổi tuyến tính với sự thay đổi công suất nguồn gây ồn.

Sử dụng tấm màn chắn giảm tiếng ồn tại sân bay quân sự là một giải pháp hiệu quả, tiết kiệm và khả thi. Việc áp dụng cần được kết hợp với các biện pháp kỹ thuật khác như quản lý thời gian thử nghiệm và sử dụng động cơ ít ồn hơn để đảm bảo giảm thiểu tối đa tác động tiêu cực của tiếng ồn đến con người và môi trường xung quanh.

Tài liệu tham khảo

1. KTS Việt Hà - Nguyễn Ngọc Giả. Giáo trình âm học kiến trúc, 1993.
2. ồ Phước Lộc - Nghiên cứu đặc tính cách âm của tấm sơ khoáng (Rockwool), Hà Nội, 2015.
3. Hoàng Đình Đạm, Nguyễn Văn Hiếu, Võ Tiến Dũng, Đỗ Văn Thùy, Giáo trình thiết kế tổng mặt bằng Cảng hàng không, sân bay, NXB QĐND - 2019.
4. QCVN 26:2010/BTNMT, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về tiếng ồn - ban hành theo Thông tư số 39/2010/TT-BTNMT ngày 16/12/2010 của Bộ trưởng Bộ Tài nguyên và môi trường.
5. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, International Civil Aviation Organization, Sixth Edition July 2011.
6. DOC 9911/ICAO: Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports - First Edition - 2008.

7. ГОСТ 22283-2014. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения.
8. Егоров В.Н., Хабаров Д.А. Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Безопасность жизнедеятельности» - Измерение уровней Шума - Московский Государственный Университет Геодезии И Картографии - Москва 2016.

Evaluating the reduction of noise level intensity through experimentation using Acoustic Sonic soundproofing panels

Abstract: *The article presents experimental studies that determine the reduction in noise intensity when using Acoustic Sonic fabric sound barriers. The noise intensity generated by the electric generator, when using sound barriers of different thicknesses, results in varying soundproofing effects. The research identifies the pattern of noise intensity reduction based on the power of the noise source and the thickness of the sound barrier, providing a basis for proposing measures to mitigate aircraft noise intensity.*

Keywords: Aviation noise; electrical explosive device; aircraft engine.

Mô hình hóa công trình ngầm chịu tải trọng động đất với môi trường nền có ứng xử HS small - trường hợp nghiên cứu tại đường hầm tuyến Metro số 3 (Nhổn- Ga Hà Nội)

Nguyễn Xuân Hai[1], Vũ Ngọc Anh[1], Phạm Đức Tiệp[1]

[1]Học viện Kỹ thuật Quân sự

Tel:0326078227

Tóm tắt:

Mô hình HS Small vượt trội so với HS trong thiết kế công trình ngầm chịu tải trọng động đất nhờ khả năng mô phỏng chính xác hơn ứng xử của đất ở điều kiện biến dạng nhỏ, nơi các thay đổi nhỏ về độ cứng có thể ảnh hưởng lớn đến sự ổn định công trình. HS Small sử dụng độ cứng đàn hồi thay đổi theo biến dạng, trong khi HS giả định độ cứng không đổi, dẫn đến sai số ở các bài toán động đất. Ngoài ra, HS Small mô phỏng tốt hơn hiệu ứng giảm chấn và sự lan truyền sóng địa chấn, cung cấp kết quả đáng tin cậy hơn so với HS, vốn phù hợp hơn cho bài toán biến dạng lớn hoặc tải trọng tĩnh. Những ưu điểm này làm cho HS Small trở thành lựa chọn tối ưu, giúp thiết kế công trình ngầm an toàn, bền vững hơn trong các khu vực có nguy cơ địa chấn cao. Trong báo cáo này tác giả mô hình hóa công trình ngầm chịu tải trọng động đất với môi trường có ứng xử HS Small tại đường hầm tuyến Metro số 3 (Nhổn – Ga Hà Nội) từ đó so sánh, đánh giá kết quả với mô hình HS hiện đang sử dụng để thiết kế và tính toán cho dự án.

Từ khóa: Mô hình HS Small; Động đất, ...

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, với sự phát triển không ngừng của các đô thị lớn tại Việt Nam, việc xây dựng các công trình ngầm như hầm giao thông, hầm metro đang trở thành một xu hướng tất yếu nhằm giảm tải áp lực giao thông trên mặt đất. Tuy nhiên, do Việt Nam nằm trong khu vực có hoạt động địa chấn phức tạp, việc thiết kế và xây dựng các công trình ngầm này đòi hỏi phải nghiên cứu kỹ lưỡng về ứng xử của công trình dưới tác động của tải trọng động đất.

Dự án Metro số 3 (Nhổn - Ga Hà Nội) là công trình trọng điểm, góp phần phát triển giao thông công cộng và giảm ùn tắc. Tuy nhiên, đặc điểm địa chất khu vực đặt ra thách thức lớn trong việc đảm bảo an toàn cho đường hầm trước tải trọng động đất.

Mô hình hóa công trình ngầm khi chịu động đất là bài toán phức tạp, đòi hỏi tích hợp nhiều yếu tố kỹ thuật. Việc sử dụng mô hình HS Small giúp mô phỏng chính xác hơn sự biến dạng và ứng xử phi tuyến của đất, nâng cao độ an toàn thiết kế.

Do đó, bài báo cáo này tập trung vào việc:

- Mô hình hóa công trình ngầm tuyến Metro số 3 (Nhổn - Ga Hà Nội) trong điều kiện nền đất sử dụng mô hình HS Small.

- Đánh giá so sánh kết quả mô hình HS Small với mô hình HS mà dự án thực tế đang áp dụng.

2. Mô hình cấu tạo đất HS Small

2.1. Mô tả mô hình HS Small

Mô hình đất với độ cứng biến dạng nhỏ (HSsmall) là sự phát triển của mô hình đất (HS), do Schanz và cộng sự đề xuất [3], được mở rộng bởi mô hình chồng biến dạng nhỏ đàn hồi, do Benz và cộng sự phát triển [4, 5]. Mô hình HSsmall cho phép mô tả hành vi para-đàn hồi trễ của đất ở các biến dạng rất nhỏ, bằng cách đưa vào mô đun độ cứng cắt ban đầu G_0 và sự phát

triển của tỷ lệ độ cứng cắt G_S / G_0 với biến dạng cắt γ. Đường cong suy giảm mô đun được triển khai như một phiên bản sửa đổi của định luật Hyperbolic đơn giản do Hardin và Drnevich đề xuất [6]:

$$\frac{G_S}{G_0} = \frac{1}{1+0.385\dfrac{\gamma}{\gamma_{0.7}}} \tag{1}$$

trong đó $\gamma_{0.7}$ là độ biến dạng mà tại đó mô đun cắt cắt giảm xuống còn khoảng 70% G_0 .

Bất kỳ sự thay đổi nào trong hướng gia tăng biến dạng đều được tính đến bằng giá trị γ_{Hist} phụ thuộc vào lịch sử biến dạng vô hướng, ghi nhớ lịch sử biến dạng lệch của vật liệu. Thông qua giá trị biến dạng γ_{Hist}, một giá trị duy nhất của độ cứng tiếp tuyến được xác định bởi (công thức 2), mô tả mối quan hệ ứng suất-biến dạng dọc theo mọi hướng tải trọng điều kiện tải đa trục.

$$\frac{G_t}{G_0} = \frac{G_0}{\left(1+0.385\dfrac{\gamma}{\gamma_{0.7}}\right)^2} \tag{2}$$

Mô đun độ cứng cắt tiếp tuyến G_t công thức (2) bị giới hạn bởi giá trị cắt thấp hơn G_{ur} . Khi mức độ biến dạng đạt đến ngưỡng cắt giới hạn γ công thức (2) mô đun độ cứng cắt tiếp tuyến G_t trở nên không đổi và bằng mô đun độ cứng cắt dỡ tải - tải lại $G_{ur} = \dfrac{E_{ur}}{1+2\nu_{ur}}$. Kết quả là:

$$\gamma_{cut-off} = \frac{\gamma_{0.7}}{0.385}\left(\sqrt{\frac{G_0^{ref}}{G_{ur}^{ref}}} - 1\right) \tag{3}$$

Giá trị giới hạn dưới tương tự G_{ur}, được đạt tới một cách tiệm cận bởi G_s Trong điều kiện tuần hoàn, hành vi trễ trong quá trình dỡ tải được xây dựng theo các quy tắc Masing đã sửa đổi, mô tả các vòng trễ cung cấp thước đo về sự tiêu tán năng lượng.

Một đặc điểm cơ bản của mô hình là sự phụ thuộc của độ cứng của đất vào mức ứng suất, được thực hiện như một hàm của các tham số ứng suất và cường độ hiệu dụng c′ và φ′:

$$G_0 = G_0^{ref}\frac{\left(c'\cos\varphi' + \sigma_3^{'}\sin\varphi'\right)^m}{c'\cos\varphi' + p^{ref}\sin\varphi'} \tag{4}$$

trong đó G_0^{ref} là mô đun cắt ban đầu tham chiếu tương ứng với áp suất giới hạn tham chiếu p^{ref} (giả sử bằng 100 kPa), m là hằng số phụ thuộc vào loại đất và $\sigma_3^{'}$ là ứng suất hiệu dụng chính nhỏ. Các biểu thức tương tự như công thức (4) được đưa vào mô hình để định nghĩa sự phụ thuộc vào trạng thái ứng suất của mô đun không tải-tải lại E_{ur}, độ cứng cắt trong thử nghiệm ba trục thoát nước tiêu chuẩn E_{50} và độ cứng tiếp tuyến cho tải trọng E_{eod}.

Mô hình HSsmall là mô hình đàn hồi dẻo cứng đẳng hướng, đặc trưng bởi hai bề mặt giới hạn chảy: bề mặt giới hạn chảy cứng cắt, giống với định luật Hypebolic, có thể mở rộng tới tiêu chuẩn phá hủy Mohr Coulomb theo hàm của biến dạng dẻo lệch; bề mặt giới hạn chảy giới hạn,

được đưa vào để phân định vùng đàn hồi cho các đường ứng suất nén, được điều chỉnh bởi biến dạng thể tích dẻo.

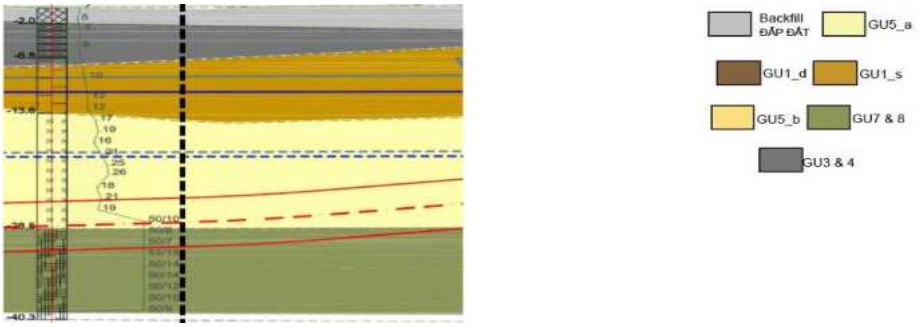
2.2. Hiệu chuẩn tham số mô hình HS Small

Tiến hành định nghĩa tham số theo dữ liệu có sẵn, theo quy trình hiệu chuẩn phù hợp. Mô đun độ cứng cắt ban đầu tham chiếu G_0^{ref} và tham số m được chọn để có được sự phù hợp tốt nhất với hồ sơ vận tốc sóng cắt do thử nghiệm lỗ chéo cung cấp. Mức biến dạng cắt $\gamma_{0.7}$ được hiệu chuẩn bằng cách sử dụng đường cong suy giảm của mô đun cắt và tỷ lệ giảm chấn cho chế độ phản ứng para-đàn hồi. Mức biến dạng cắt $\gamma_{0.7}$ bằng 0,0001 đến 0,0002 đối với đất cát và 0,00005 đến 0,0001 đối với đất sét [7]. Tỷ lệ G_0^{ref} / G_{ur}^{ref} được xác định sao cho được giữ ở mức 4 đối với lớp cát bùn và ở mức 2,5 đối với các lớp đất khác [8], dẫn đến giá trị $\gamma_{cut-off}$ phù hợp. Cần lưu ý rằng vượt quá biến dạng cắt cắt, tỷ lệ giảm chấn giảm dần về 0. Trên thực tế, vượt quá ngưỡng giới hạn này, mô đun độ cứng tiếp tuyến trở nên không đổi, nhưng vòng trễ trở nên hẹp hơn khi mức biến dạng tăng.

3. Xây dựng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis khảo sát kết cấu công trình ngầm Metro Nhổn – Ga Hà Nội dưới tác dụng của động đất

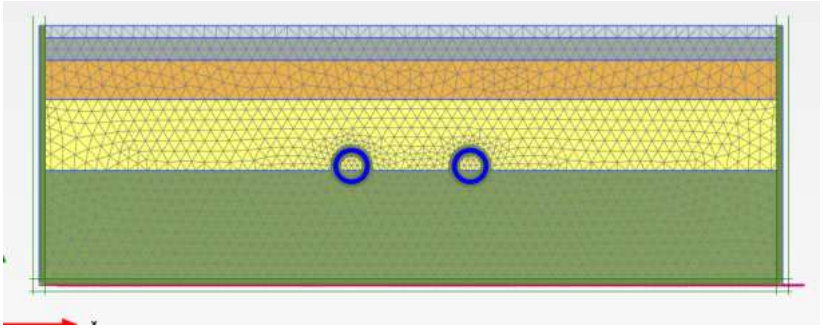
3.1. Đối tượng khảo sát

Báo cáo lựa chọn mặt cắt điển hình tại lý trình Km19+974 trong tuyến Metro Nhổn - Ga Hà Nội để khảo sát, tính toán. Hình trụ lỗ khoan và mặt cắt ngang thiết kế hiện tại hình 1.



Hình 1. Mặt cắt điển hình lí trình S3

Việc tính toán nội lực xuất hiện kết cấu lớp vỏ hầm đã được thực hiện với phần mềm Plaxis Tunnel 2D CE V20.



Hình 2. Mô hình bài toán trong Plaxis 2D

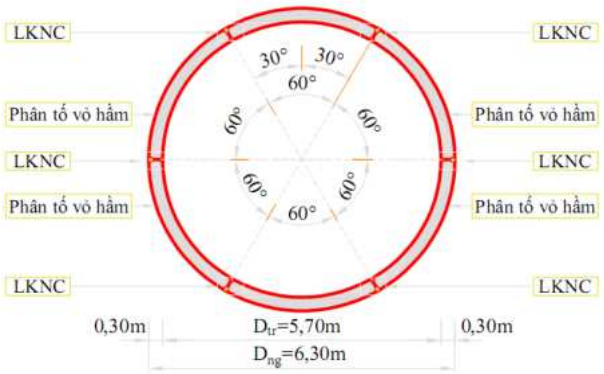
3.2. Mô hình hóa kết cấu vỏ hầm

Đoạn hầm trong tuyến tàu điện ngầm Metro số 03 được thi công bằng tổ hợp TBM có kết cấu vỏ dạng lắp ghép [1] nên có thể mô hình hóa ở 2 dạng khác nhau:

- Mô hình hóa kết cấu ở dạng một vòng tròn liên tục;

- Mô hình hóa kết cấu thành các phân tố vỏ hầm, các phân tố này liên kết với nhau qua các liên kết nửa cứng.

Trong phạm vi báo cáo tác giả mô hình hóa kết cấu thành các phân tố vỏ hầm, các phân tố này liên kết với nhau qua các liên kết nửa cứng.



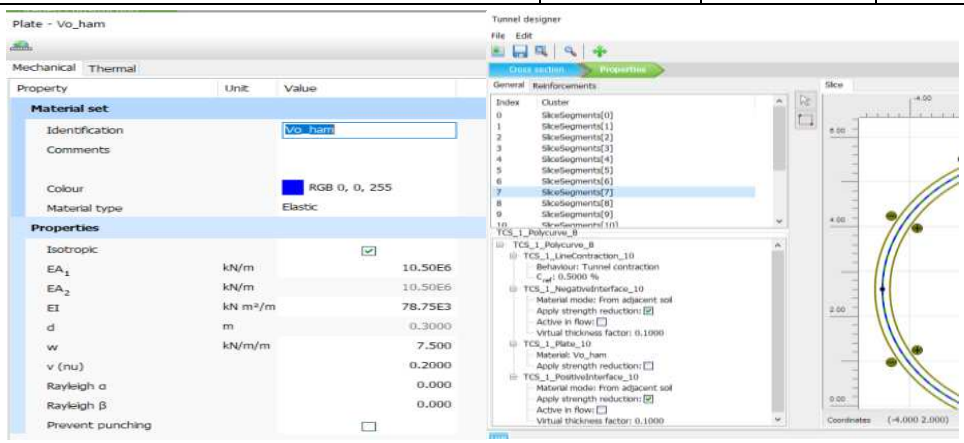
Hình 3. Sơ đồ kết cấu vỏ hầm dạng lắp ghép tính toán

Theo hồ sơ thiết kế của tuyến Metro số 03 mỗi đốt hầm bao gồm 6 phân tố (segment), trong đó, phân tố khóa (key segment) có kích thước nhỏ hơn các phân tố còn lại.

Mô hình vật liệu kết cấu hầm giả thiết là đồng nhất và làm việc theo mô hình đàn hồi tuyến tính, các đặc trưng tiết diện kết cấu và vật liệu vỏ hầm được giả thiết như trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số của kết cấu vỏ hầm khai báo trong Plaxis 2D

TT	Tham số	Ký hiệu	Tròn	Đơn vị
1	Kích thước trong của vỏ hầm	D_{tr}	5,70	m
2	Kích thước ngoài của vỏ hầm	D_{ng}	6,30	m
3	Mô-đun đàn hồi của bê tông vỏ hầm	E_c	$3,5.10^7$	kN/m^2
4	Hệ số Poisson của bê tông	ν	0,2	
5	Bề dày của kết cấu vỏ hầm	t	0,30	m
6	Bề rộng dải kết cấu khảo sát	b	1,5	m
7	Độ cứng dọc trục	EA	$10,50.10^6$	kN/m
8	Độ cứng kháng uốn	EI	$7,875.10^4$	kNm^2/m
9	Trọng lượng đơn vị theo chiều dài	w	7,50	kN/m/m



Hình 4. Mô hình hóa kết cấu vỏ hầm

Các phân tố của vỏ hầm được liên kết tại các nút và được giả thiết làm việc theo mô hình dạng liên kết nửa cứng của Jassen [9] thể hiện như trong hình 5. Jassen đã mô hình hóa liên kết giữa các phân tố bằng ba liên kết đàn hồi:

- Liên kết đàn hồi kháng uốn với độ cứng C_r, liên kết này đặc trưng cho khả năng truyền mô men từ miếng ghép này sang miếng ghép kia. Giá trị C_r cũng là thông số cơ bản trong mô hình Jassen.

- Liên kết đàn hồi theo phương pháp tuyến với độ cứng k_r.

- Liên kết đàn hồi theo phương tiếp tuyến với độ cứng k_t.

Trong thực tiễn tính toán, giá trị liên kết đàn hồi theo phương pháp tuyến (k_r) và tiếp tuyến (k_t) thường được giả thiết là rất lớn. Khi tính toán theo phần mềm Plaxis 2D, liên kết Janssen được mô tả tương đương với khớp lý tưởng có liên kết kháng uốn với độ cứng C_r.

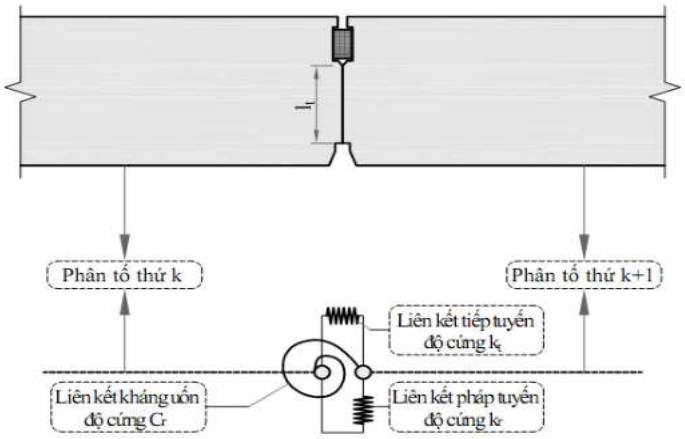
Giá trị độ cứng kháng uốn C_r của liên kết (giả thiết trong giai đoạn liên kết đóng kín) được xác định theo công thức (5) [9].

$$C_r = \frac{b.l_t^2.E_c}{12} \quad (5)$$

Trong đó: l_t là chiều cao làm việc của liên kết;

E_c là mô đun đàn hồi của bê tông;

b là chiều dài đoạn hầm, b=1,5m.



Hình 5. Mô hình liên kết theo Jassen [9]

3.3. Mô hình vật liệu môi trường

Sử dụng mô hình HS, HS Small để mô hình hóa môi trường đất nền, các tham số cần khai báo mô hình này trong Plaxis.

Các tham số của đất nền được tham khảo từ tài liệu khảo sát địa chất thuộc dự án tàu điện đô thị số 03 [1] và được thể hiện như trong bảng 2 dưới đây.

Bảng 2. Bảng các tham số của các lớp đất đá theo mô hình HSS

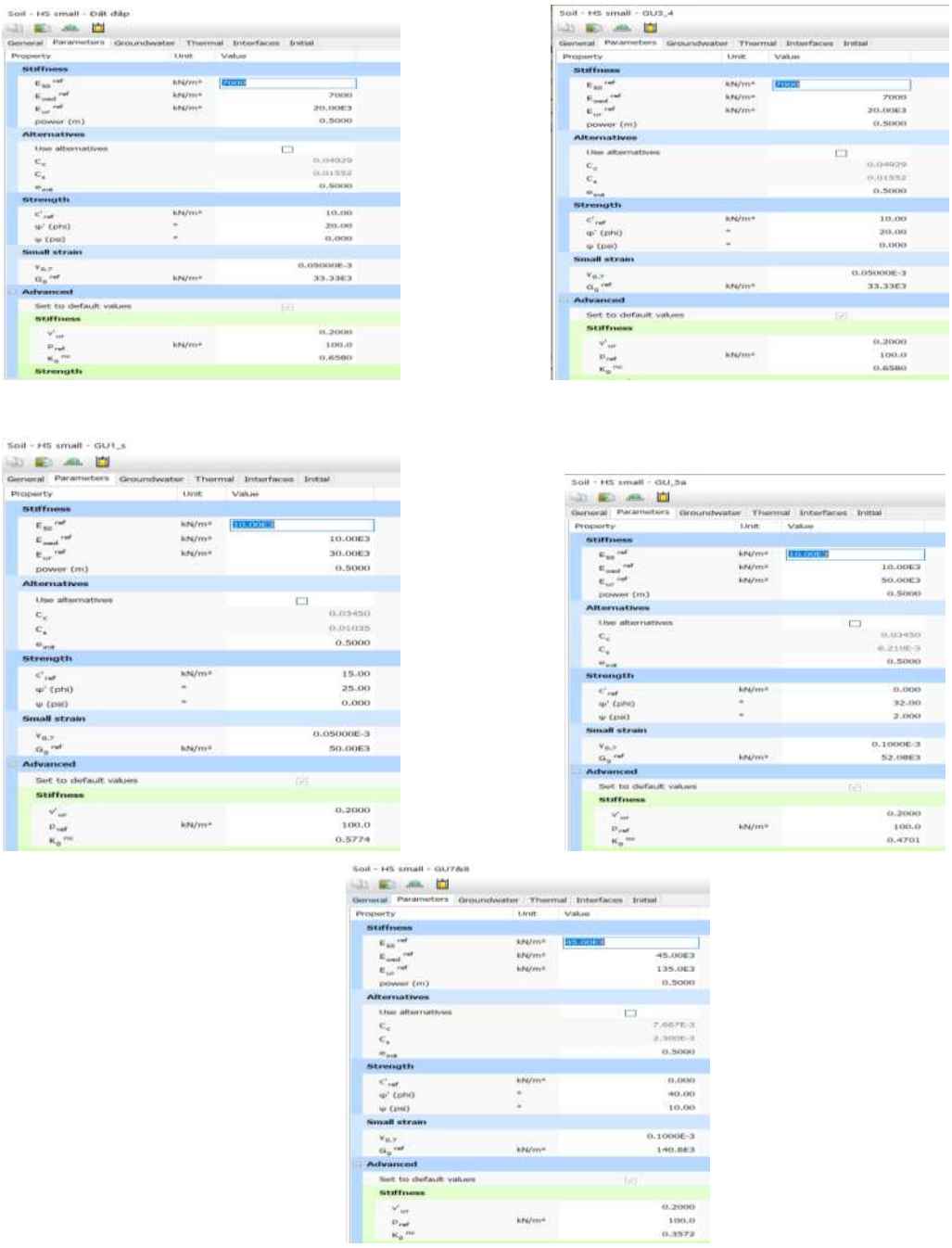
TT	THÔNG SỐ	KÝ HIỆU	TÊN LỚP				
			L1	L2	L3	L4	L5
1	Bề dày lớp địa chất (m)		2	5	6,7	15,0	11,8
2	Loại đất		Đất đắp	GU3&4	GU1-S	GU5a	GU7&8

TT	THÔNG SỐ	KÝ HIỆU	TÊN LỚP				
			L1	**L2**	**L3**	**L4**	**L5**
3	Mô hình vật liệu		HS	HS	HS	HS	HS
4	Dung trọng bão hòa nước (kN/m^3)	γ_{sat}	*19*	18	20	21	*21*
5	Dung trọng tự nhiên (kN/m^3)	γ_{unsat}	*19*	18	20	21	*21*
6	Mô đun biến dạng đơn trục (MN/m^2)	E_{oed}^{ref}	7	7	10	10	45
7	Mô đun biến dạng cát tuyến (MN/m^2)	E_{50}^{ref}	7	7	10	10	45
8	Mô đun biến dạng chất-dỡ tải (MN/m^2)	E_{ur}^{ref}	20	20	30	50	135
9	Hệ số Poisson		0.3	0.4	0.35	0.3	0.3
10	Lực dính c (kN/m^2)	c	*25*	10	0	0	*0*
11	Góc ma sát trong φ (độ)	φ	25	20	32	33	*40*
12	Hệ số R_{inter}	R_{inter}	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
13	Mức biến dạng cắt	$\gamma_{0.7(\%)}$	*5E-05*	*5E-05*	5E-05	*1E-04*	*1E-04*
14	Mô đun độ cứng cắt ban đầu(MN/m^2)	G_0^{ref}	33,33	33,33	50,00	52,08	140,63

Tham số cản Rayleigh [2] cho từng lớp như kết quả thể hiện trong bảng 3 dưới đây.

Bảng 3. Bảng tham số tỷ số cản của các lớp đất

TT	Lớp đất	H(m)	N_{SPT}	V_s(m/s)	ξ	ω_1	ω_2	α_R	β_Rx10^{-3}
L1	Đất đắp	2,27	7	175,32	0,05	137,63	412,89	10,32	0,18
L2	Lớp sét dẻo	4,19	21	253,88	0,05	79,72	239,16	5,98	0,31
L3	Lớp sét ít dẻo	7,42	41	318,09	0,05	74,54	223,61	5,59	0,34
L4	Lớp cát bụi và cát sét sỏi	13,36	50	340,09	0,05	35,60	106,79	2,67	0,70
L5	Lớp sỏi và cát thô lẫn sỏi	21,55	100	429,58	0,05	57,16	171,47	4,29	0,44

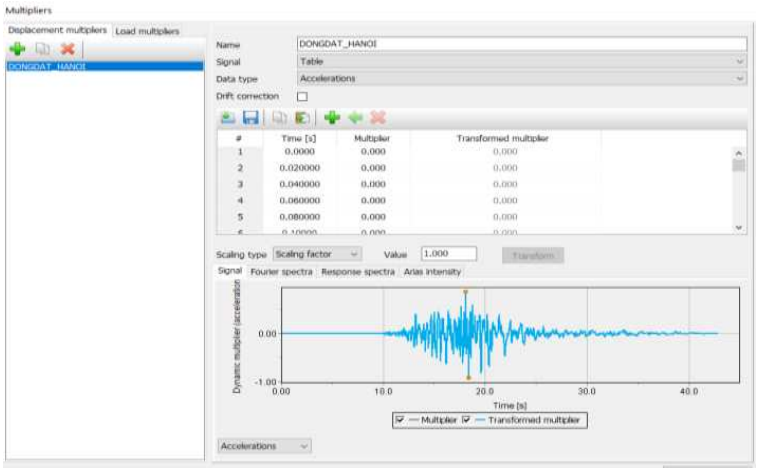


Hình 6. Khai báo các tham số của mô hình HSS

3.4. Thiết lập dữ liệu giản đồ gia tốc tính toán

Với bài toán phân tích công trình chịu tác dụng của động đất có thể lựa chọn file *.smc hoặc sử dụng các tệp dữ liệu dạng *.txt, *.dat… được ghi theo định dạng ASCII, bao gồm 2 cột, thời gian và giá trị gia tốc. Các bước thiết lập được thể hiện trong **Error! Reference source not found.** lần lượt theo các bước như sau:

- Chọn mục “Multiplier” trong phần thiết lập tải trọng.
- Lựa chọn mục “Load multiplier”.
- Chọn tệp dữ liệu giản đồ gia tốc tính toán.
- Sử dụng giản đồ gia tốc nhân tạo badinh-01a (Luận án tiến sỹ tác giả Vũ Ngọc Anh) [2].



Hình 7. Khai báo giản đồ gia tốc tính toán phân tích động lực học công trình ngầm chịu động đất với phần mềm Plaxis2D

3.5. Kết quả xây dựng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis 2D

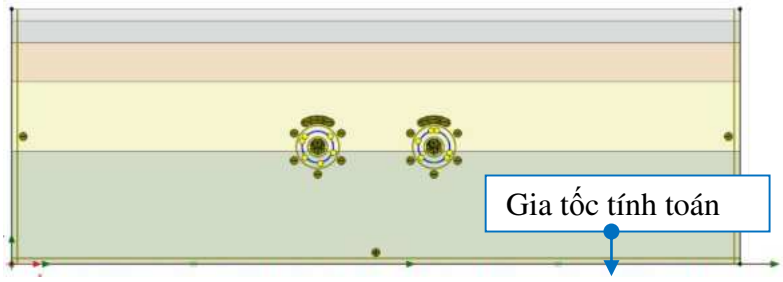
Trên cơ sở số liệu kết cấu và địa chất công trình, tiến hành mô hình hóa bằng phần mềm Plaxis:

-Mô hình hóa kết cấu: sử dụng phần tử dạng dầm 5 nút, mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính;

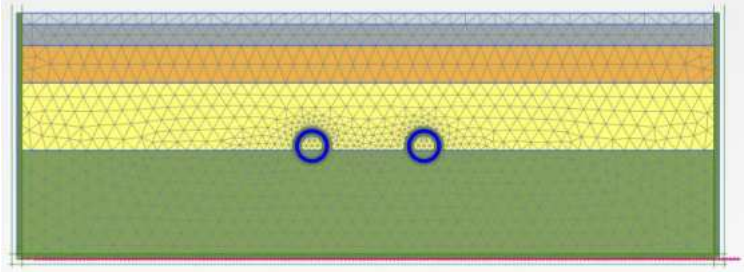
-Mô hình hóa môi trường: lựa chọn phần tử dạng tam giác 15 nút để mô hình hóa môi trường đất xung quanh khoang hầm, mô hình vật liệu HS;

-Điều kiện biên và kích thước miền nghiên cứu: Sử dụng điều kiện biên tiêu chuẩn.

- Mô hình bài toán và sơ đồ chia lưới được thể hiện lần lượt trong Hình 8 và Hình 9*hình 2* dưới đây.



Hình 1. Mô hình bài toán được xây dựng trên phần mềm Plaxis 2D



Hình 2. Sơ đồ lưới phần tử của bài toán

3.6. Các giai đoạn tính toán

Tính toán các thành phần nội lực thông qua các giai đoạn (phase) sau:

▪ Giai đoạn 1: Khởi tạo ứng suất ban đầu, các lớp đất khác nhau với các giá trị khối lượng riêng γ.

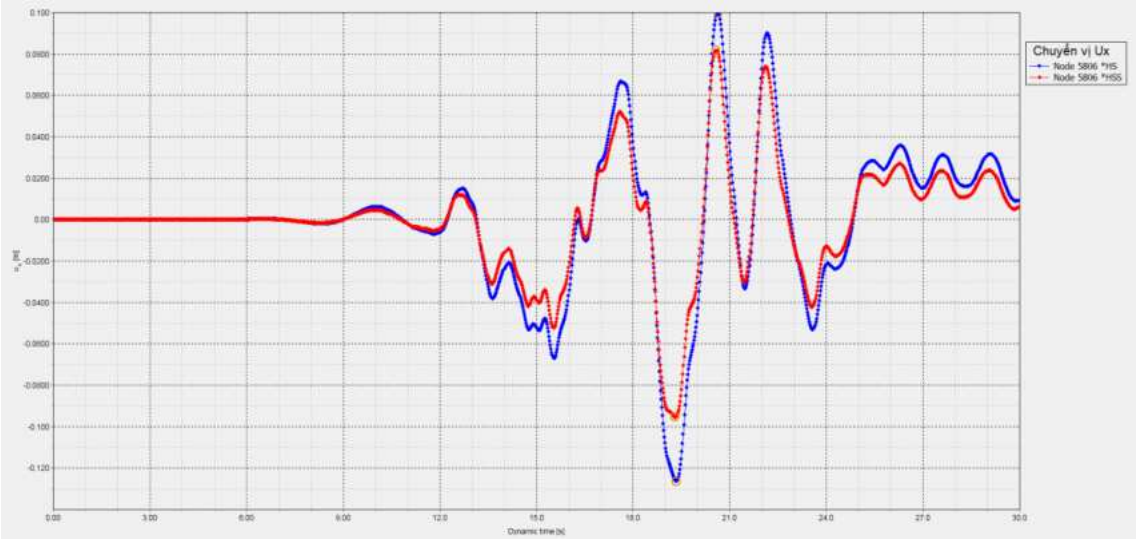
▪ Giai đoạn 2: Đào hầm trái và thiết lập áp lực nước ngầm trong hầm về 0; trong giai đoạn này, không hạn chế chuyển vị mặt đất (giá trị ΣMStage cho phép trước khi lắp đặt vỏ hầm) đã được xác định để thu được độ hao hụt thể tích bằng 0.5% trên mặt đất. Lắp đặt lớp vỏ hầm phân đoạn bên trái bằng cách kích hoạt các segment tương ứng và không hạn chế mặt đất hoàn toàn (ΣMStage = 1) trong vỏ hầm được lắp đặt.

▪ Giai đoạn 3: Đào hầm phải, lắp đặt vỏ hầm phân đoạn bên phải.

▪ Giai đoạn 4: Từ giai đoạn 4, kích hoạt tải trọng động đất.

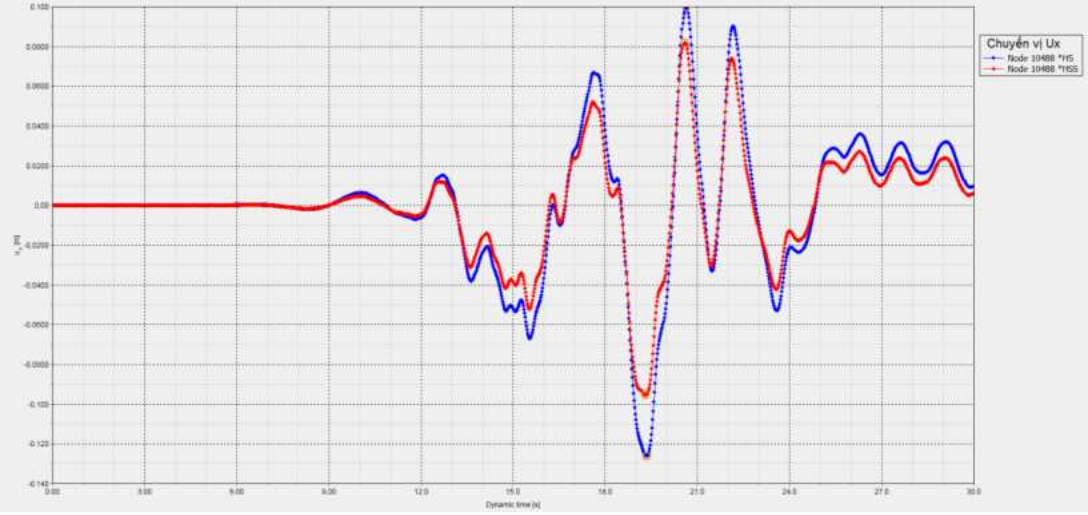
3.7. Kết quả chuyển vị, nội lực xuất hiện trong kết cấu lớp vỏ hầm

3.7.1. Chuyển vị đỉnh hầm bên trái (Node 5806: x=58,7m; y=25,4m)



Hình 10. Chuyển vị theo phương ngang của đỉnh hầm trái

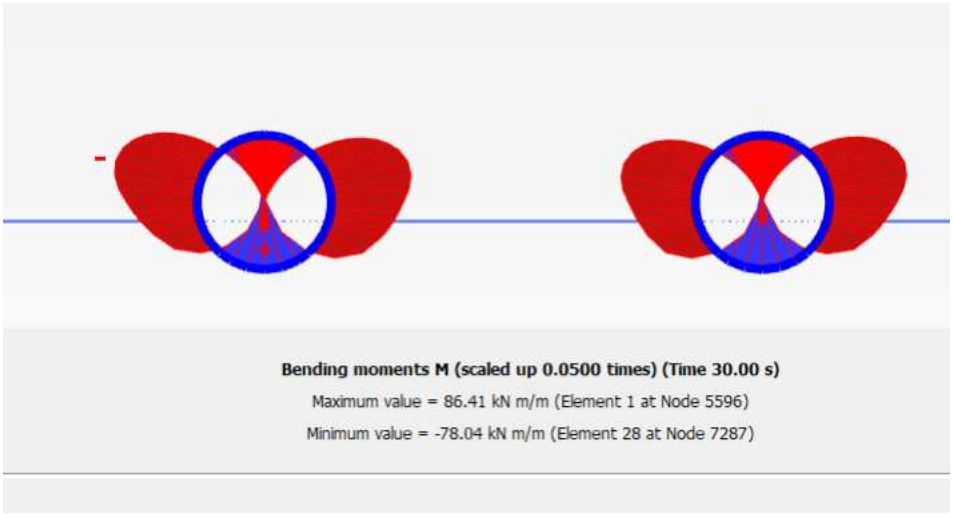
3.7.2 Chuyển vị đỉnh hầm bên phải (Node 10488: x=81,0m; y=25,4m)



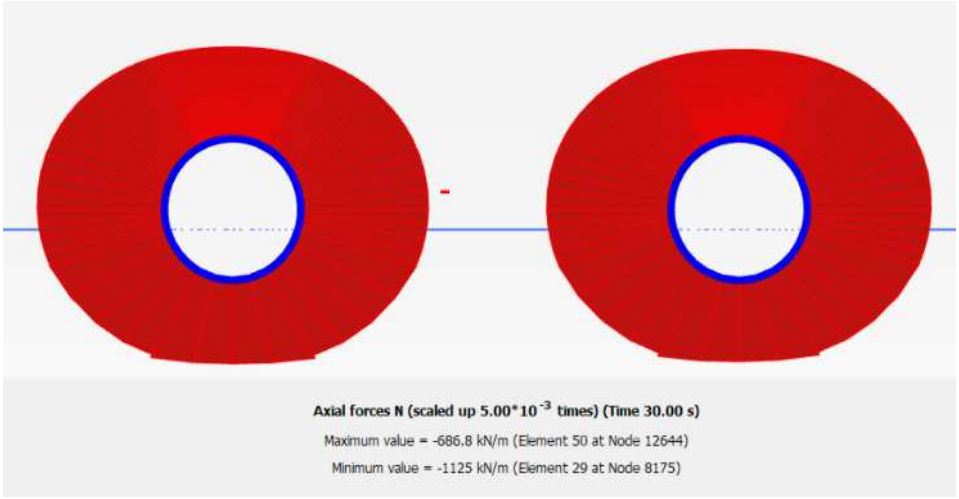
Hình 11. Chuyển vị theo phương ngang của đỉnh hầm phải

3.7.3. Nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu

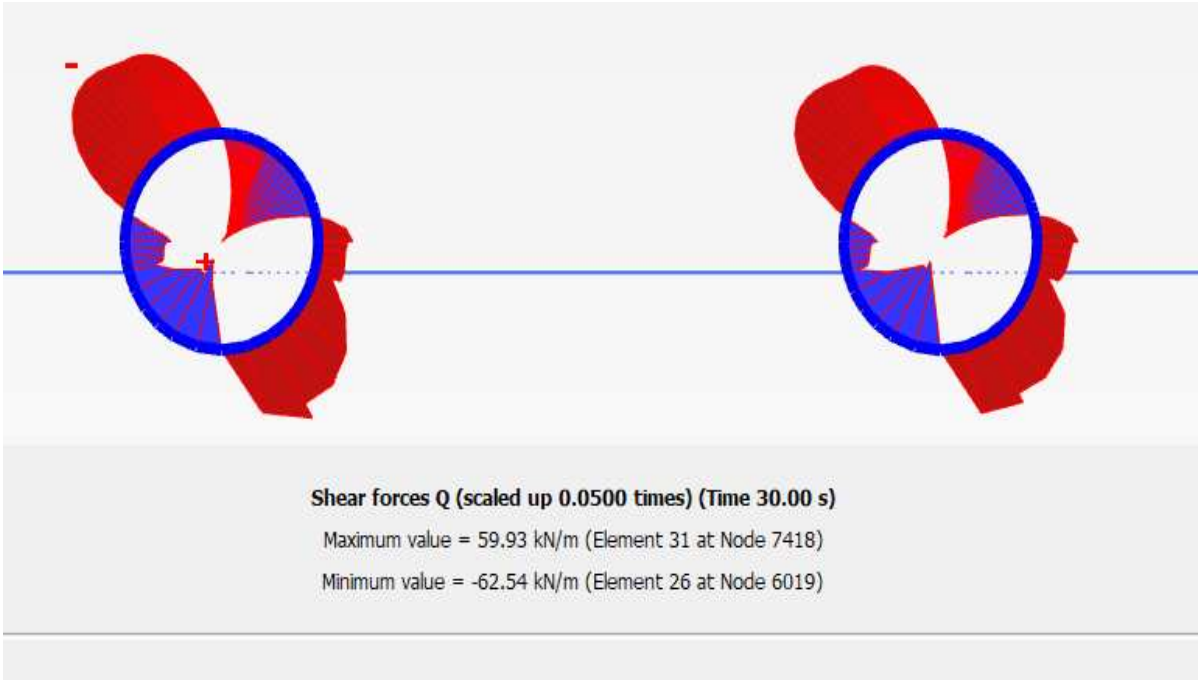
- Mô hình HS



Hình 12. Momem cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HS

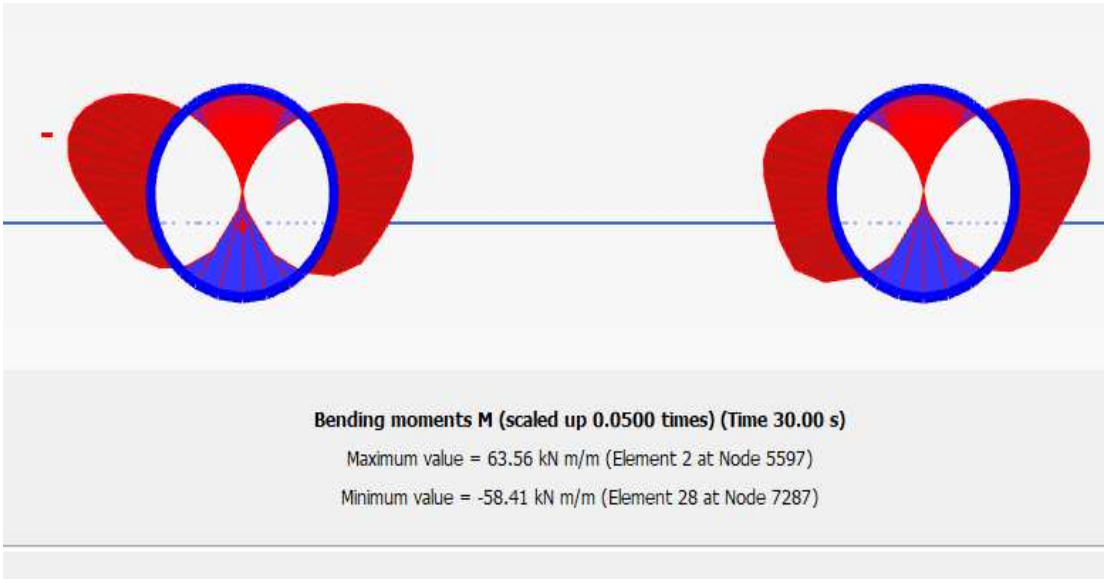


Hình 13. Lực dọc cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HS

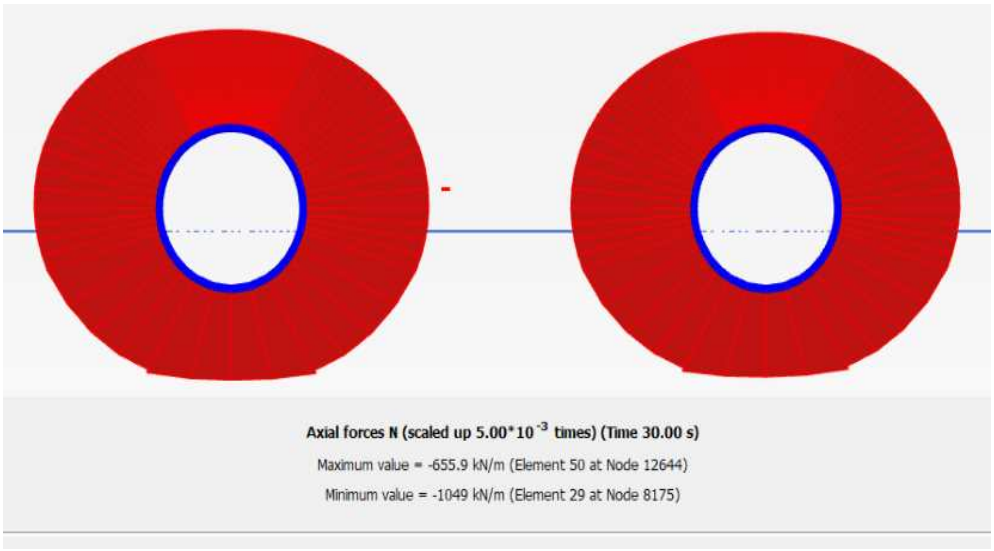


Hình 14. Lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HS

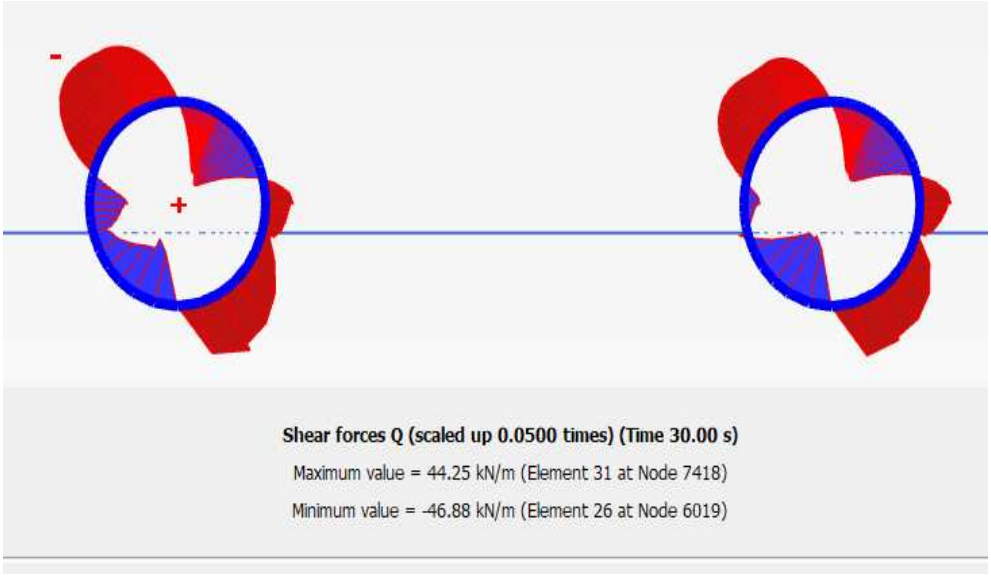
- Mô hình HSS



Hình 15. Momem cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HSS



Hình 16. Lực dọc cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HSS



Hình 17. Lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HSS

Bảng 4. Bảng tổng hợp nội lực max vỏ hầm theo các phương án tính toán

Nội lực	Mô hình HS	Mô hình HSS	Giảm
Momem (kNm/m)	86,41	63,56	26,44%
Lực dọc (kN/m)	1125	1049	6,7%
Lực cắt (kN/m)	62,54	46,88	25,03%

Bảng 5. Bảng tổng hợp chuyển vị max đỉnh hầm trái và đỉnh hầm phải

Điểm	Mô hình HS	Mô hình HSS	Giảm
Node 9386 (cm)	12,6	9,5	24,6%
Node 10488 (cm)	12,4	9,5	23,4%

4. Kết luận và kiến nghị

Khi áp dụng hai mô hình Hardening Soil (HS) và Hardening Soil Small-strain (HS Small) để phân tích ứng xử của công trình ngầm dưới tác động động đất, kết quả có sự khác biệt rõ rệt ở các khía cạnh sau:

*** Chuyển vị của công trình**

HS: Mô hình HS thường dự đoán giá trị chuyển vị lớn hơn thực tế, do không mô phỏng chính xác được sự thay đổi độ cứng của đất ở mức biến dạng nhỏ. Điều này dẫn đến việc đánh giá cao khả năng dịch chuyển của kết cấu, đặc biệt trong giai đoạn ban đầu của tải trọng động.

HS Small: Kết quả chuyển vị của HS Small nhỏ hơn và chính xác hơn nhờ khả năng phản ánh độ cứng cao hơn của đất ở mức biến dạng nhỏ, giúp kiểm soát tốt hơn phản ứng dịch chuyển của công trình trong điều kiện động đất.

*** Nội lực cực đại của kết cấu**

So sánh nội lực cực đại (mô men, lực cắt, lực dọc) xuất hiện trong vỏ hầm với cùng sơ đồ kết cấu và cùng phase tính toán khi sử dụng hai mô hình nền khác nhau (HS và HSS). Có thể nhận thấy, nội lực tính toán với mô hình HS đều cho giá trị lớn hơn so với nội lực tính toán khi sử dụng mô hình HSS. Sự chênh lệch về kết quả này đặc biệt được thể hiện rõ khi xét đến giá trị mô men và lực cắt và ít hơn khi khảo sát lực dọc.

Kết luận

Mô hình HS: Phù hợp cho các bài toán biến dạng lớn hoặc tải trọng tĩnh, nhưng không tối ưu khi phân tích ứng xử động lực của công trình ngầm do thiếu khả năng mô phỏng độ cứng biến dạng nhỏ và hiệu ứng giảm chấn.

Mô hình HS Small: Cho kết quả chính xác hơn về chuyển vị, biến dạng và nội lực của công trình ngầm trong điều kiện động đất. HS Small tái hiện tốt hơn các đặc trưng của đất và tương tác đất-công trình, làm cho nó trở thành lựa chọn ưu tiên khi đánh giá công trình ngầm chịu tải trọng động đất.

Việc sử dụng HS Small không chỉ tăng độ tin cậy của các dự báo mà còn giúp tối ưu hóa thiết kế, giảm rủi ro và nâng cao an toàn trong xây dựng công trình ngầm tại các khu vực có nguy cơ động đất cao.

Tài liệu tham khảo (theo chuẩn APA 6.0)

1. Hồ sơ Thiết kế sơ bộ tuyến Metro số 03, Ban quản lý Đường sắt đô thị Hà Nội, https://mrb.hanoi.gov.vn/
2. Vũ Ngọc Anh (2021), Nghiên cứu ứng xử của kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện kỹ thuật Quân sự.
3. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G.: The hardening soil model: formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotech nics, 1999, pp. 281–296.
4. Benz T.: Small-Strain Stiffness of Soils and its numerical consequences. PhD. Thesis, University of Stuttgart, Germany, 2006.
5. Benz T., Vermeer P.A., Schwab R.: A small-strain overlay model. In ternational Journal for Numerical and Analytical Methods in Geome chanics, Vol. 33, 2009 pp. 25–44.
6. Hardin B.O., Drnevich V.P.: Shear Modulus and Damping in Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 98, 1972, pp. 667–92.
7. Hardening Soil model with small strain sti ness, Andrzej Truty ZACE Services, 1.09.2008.
8. Three-dimensional advanced numerical approaches to the seismic soil and structural response analyses, Angelo Amorosi1, Daniela Boldini2, Annamaria di Lernia3, Fabio Rollo1.
9. Janssen, P., 1983. Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings, Load carrying behavior of segmented tunnel linings, (Ph.D. thesis). Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, (in German).
10. Brinkgreve R.B.J. and Broere W. (2006), *Plaxis manual version 8*, Delft University of technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
11. Kramer S.L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
12. Imai, T., 1977. *P and S wave velocities of the ground in Japan*. Proceeding of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 127-132.

Modeling underground structures subjected to earthquake loads with hs small response ground environment - case study at metro line 3 tunnel (Nhon-Hanoi station).

Abstract: *The HS Small model outperforms the HS model in designing underground structures subjected to seismic loads due to its ability to more accurately simulate soil behavior under small-strain conditions, where minor stiffness changes can significantly impact structural stability. HS Small employs strain-dependent elastic stiffness, whereas HS assumes constant stiffness, leading to inaccuracies in earthquake-related problems. Additionally, HS Small better captures damping effects and seismic wave propagation, providing more reliable results compared to HS, which is more suitable for large deformation or static load cases. These advantages make HS Small the optimal choice for designing safer and more sustainable underground structures in seismically active regions. In this report, the author models an underground structure subjected to seismic loads using the HS Small model for the Metro Line 3 tunnel (Nhon – Hanoi Station), then compares and evaluates the results with the HS model currently used in the project's design and calculations.*

Keywords: HS Small model, earthquake, ...

Xác định vị trí hư hỏng của kết cấu dầm thép thông qua sự thay đổi tần số dao động riêng

Trần Trung Đức[1], Tạ Đức Tuân[1]

[1] Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật quân sự

[*] Email: trungductran@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Khi hư hỏng xuất hiện trong kết cấu sẽ dẫn đến thay đổi những đặc trưng động lực học như tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, tỉ số cản ... so với kết cấu không hư hỏng. Dựa trên điều này, một số phương pháp được nghiên cứu và sử dụng để xác định vị trí vùng hư hỏng của kết cấu. Trong bài báo này, tiến hành nghiên cứu trên dầm thép công xôn, dầm công xôn được phân tách thành các vùng, trong đó mỗi vùng có một phân loại cụ thể của bốn tần số dao động riêng đầu tiên được chuẩn hóa. Vùng hư hỏng được phân biệt bằng cách phân loại các tần số chuẩn hóa của kết cấu. Tiến hành mô phỏng với kết cấu dầm công xôn ban đầu và kết cấu dầm công xôn hư hỏng bằng phần mềm Sap2000 và xác định tần số dao động riêng của dầm công xôn, làm cơ sở cho việc nhận dạng vị trí và mức độ hư hỏng của kết cấu. Kết quả nhận dạng cho thấy vùng hư hỏng nhận dạng được phù hợp với vị trí hư hỏng giả định ban đầu và không phụ thuộc vào mức độ hư hỏng của kết cấu.

Từ khóa: *Tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, hư hỏng kết cấu.*

1. Đặt vấn đề

Nhiều cấu trúc cơ khí như cánh tua bin gió và cánh máy bay và nhiều kết cấu xây dựng khác có thể được coi là dầm công xôn. Bất kỳ thay đổi nào về vật liệu và đặc tính hình học của kết cấu, ảnh hưởng không tốt đến hiệu suất làm việc của chúng đều được coi là hư hỏng. Phát hiện sớm hư hỏng có thể kịp thời phát hiện hư hỏng, kéo dài tuổi thọ của kết cấu.

Sự xuất hiện của hư hỏng trong kết cấu tạo ra những thay đổi trong các đặc điểm động của nó như tần số dao động riêng, dạng dao động riêng và tỉ số cản. Vì vậy, nhiều kỹ sư và nhà khoa học đã dành nỗ lực của họ để phát triển các kỹ thuật phát hiện hư hỏng khác nhau bằng cách sử dụng các đặc trưng dao động của kết cấu.

Trong những năm gần đây, hư hỏng có thể chẩn đoán trực tiếp bằng nhiều phương pháp khác nhau, như thông qua sự thay đổi hàm đáp ứng tần số FRF (Frequency Response Function), thay đổi của tần số dao động riêng, thay đổi của dạng dao động riêng, phương pháp độ cong dao động, phương pháp dựa trên năng lượng biến dạng.

Do các tham số động lực học của kết cấu phản ánh trạng thái làm việc thực tế của kết cấu, nếu có hư hỏng bên trong kết cấu, thì đáp ứng tần số kết cấu và các tham số động lực học chắn sẽ thay đổi. Do đó, sau khi xác định các tham số động lực học của kết cấu được thử nghiệm và so sánh chúng với các tham số động lực học được tính toán cho kết cấu nguyên vẹn, trạng thái hư hỏng và mức độ hư hỏng của kết cấu có thể được xác định theo sự thay đổi của các tham số động lực học kết cấu. Tùy thuộc vào từng loại kết cấu và vị trí, mức độ hư hỏng khác nhau mà quy luật thay đổi các đặc trưng dao động cũng khác nhau, để đưa ra được các phương pháp xác định chính xác hư hỏng của kết cấu thì cần tiến hành đánh giá sự thay đổi đặc trưng động lực học tương ứng với các điều kiện, đặc trưng hư hỏng khác nhau.

Nhiều tác giả tìm thấy các phần tử bị hư hỏng bằng cách sử dụng tiêu chí kết hợp các dạng mode từ một cấu trúc bị hư hỏng và một cấu trúc không bị hư hỏng. West [1] là một trong những tác giả đầu tiên đưa ra ý tưởng sử dụng các dạng mode để xác định vị trí hư hỏng. Ông

đã sử dụng tiêu chí đảm bảo mode (MAC) để xác định mối tương quan giữa các dạng mode của một cấu trúc bị hư hỏng và một cấu trúc không bị hư hỏng. Lieven và Erwins [2] đã đề xuất một chỉ báo hư hỏng dựa trên dạng mode có tên là tiêu chí đảm bảo mode tọa độ (COMAC).

Nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp độ cong dạng dao động (đạo hàm bậc hai của dạng dao động) để phát hiện hư hỏng vì phương pháp này nhạy hơn với bất kỳ thay đổi cục bộ nào về dạng dao động bằng cách khuếch đại tác động của hư hỏng. Pandey và cộng sự [3] là những người đầu tiên đề xuất những thay đổi về độ cong dao động để phát hiện và xác định vị trí hư hỏng trong dầm.

Tuy nhiên, các dạng dao động riêng đòi hỏi thực hiện phép đo đo tại mọi điểm của cấu trúc và mất thời gian cho mỗi phép đo để ước tính các dạng dao động chi tiết. Mặt khác, tần số dao động riêng được xác định dễ dàng và chi phí thấp. Vì những lý do này, nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung nghiên cứu của họ vào việc phát hiện hư hỏng từ tần số dao động riêng. Theo Doebling và cộng sự [4], Lifshitz và Rotem [5] đã lần đầu tiên sử dụng phép đo rung động để phát hiện hư hỏng. Họ đã sử dụng các dịch chuyển trong tần số dao động riêng thông qua các thay đổi trong mô đun động. Messina và cộng sự [6] đã đề xuất một tiêu chí dựa trên các thay đổi trong tần số dao động riêng có tên là tiêu chí đảm bảo vị trí hư hỏng (DLAC). Sau đó, các tác giả trong [7,8] đã khái quát phương pháp tiếp cận cho nhiều hư hỏng có tên là đa tiêu chí đảm bảo vị trí hư hỏng (MDLAC). Phương pháp tiếp cận được định nghĩa là mối tương quan thống kê giữa các thay đổi tần số từ các dự đoán phân tích và phép đo thực nghiệm. Gillich và Praisach [9] chỉ ra rằng các đường cong của sự dịch chuyển tần số dao động riêng có cùng hình dạng đối với các mức độ hư hỏng khác nhau ở mỗi vị trí hư hỏng. Vì vậy, để xác định vị trí hư hỏng, họ so sánh các đường cong được vẽ của sự dịch chuyển tần số dao động riêng bằng các phép đo với các đường cong thu được bằng phương pháp phân tích hoặc FEM, trong đó, vị trí cho đường cong tính toán giống nhất, so với đường cong đo được chỉ ra vị trí hư hỏng. Sau đó, trong nghiên cứu của Gillich và Praisach [10] và Gillich và cộng sự [11], các tác giả chỉ ra rằng về mặt toán học, sự dịch chuyển tần số chuẩn hóa bằng độ cong dạng dao động bình phương chuẩn hóa tại vị trí hư hỏng nhân với hệ số là hàm của mức độ của hư hỏng. Bằng cách chia các giá trị dịch chuyển tần số chuẩn hóa cho mỗi vị trí cho giá trị cao nhất của chuỗi, các tác giả đã loại bỏ hệ số này và họ thu được một tập hợp các giá trị độc lập với mức độ nghiêm trọng của hư hỏng.

Tần số dao động riêng của một kết cấu hư hỏng là một hàm của cả vị trí và độ sâu của vết nứt, nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp phát hiện dựa trên các phương pháp đường đồng mức tần số. Nahvi và Jabbari [12] đã vẽ các đường đồng mức của tần số chuẩn hóa theo vị trí và độ sâu của vết nứt chuẩn hóa bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Các tác giả đã rời rạc hóa dầm thành một số phần tử và vết nứt được cho là mỗi lần nằm trong một phần tử có độ sâu khác nhau. Giao điểm của các đường đồng mức với tần số tự nhiên không đổi sẽ cho vị trí và độ sâu của vết nứt. Barada và cộng sự [13] đã sử dụng phương pháp phân tích với mô hình vết nứt bằng cách sử dụng phương pháp lò xo để vẽ đường đồng mức.

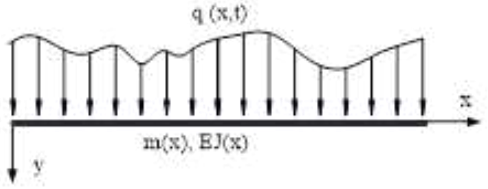
Hiện nay các nghiên cứu trong nước để xác định vị trí hư hỏng của kết cấu vẫn chưa được nghiên cứu nhiều. Bài báo dựa vào các nghiên cứu trên thế giới, tiến hành nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng số để ứng dụng xác định vùng hư hỏng của kết cấu dầm thép công xôn,

tiến đến nhận dạng hư hỏng cho các kết cấu phức tạp hơn và các kết cấu thực đang khai thác, sử dụng.

2. Cơ sở lý thuyết xác định các đặc trưng của dầm thép

2.1. Mô hình dầm thép Công xôn

Xem xét dầm thép công xôn, hệ vô hạn bậc tự do.



Hình 1. Sơ đồ kết cấu dầm

Phương trình vi phân dao động tự do khi không xét đến ảnh hưởng của lực cản được viết dưới dạng.

$$\frac{d^2}{dx^2}\left[EJ(x)\frac{d^2X}{dx^2}\right]=\omega^2 m(x)X \tag{1}$$

Trong đó, E là mô đun đàn hồi của vật liệu dầm, J(x) là mômen quán tính của mặt cắt ngang dầm, X là dịch chuyển theo phương y tại khoảng cách x tính từ đầu cố định (dạng uốn), ω là tần số dao động riêng, m(x) là khối lượng trên một đơn vị chiều dài, x là khoảng cách tính từ đầu cố định.

Nếu dầm có độ cứng không đổi và khối lượng phân bố đều, ta có:

$$\frac{d^4X}{dx^4}-\omega^2\frac{m}{EJ}X=0 \tag{2}$$

Với phương trình trên và các điều kiện biên ứng với dầm conson ta có thể viết công thức tính tần số dao động riêng như sau:

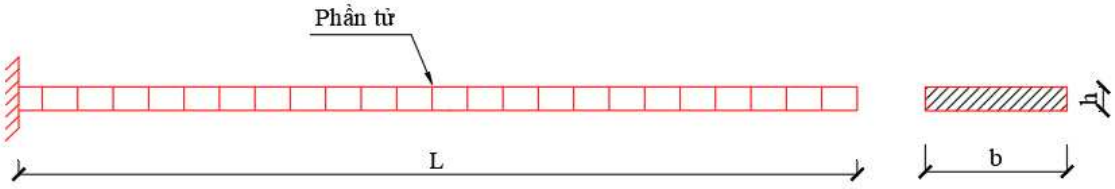
$$\omega_i=\alpha_i{}^2\sqrt{\frac{EJ}{ml^4}} \tag{3}$$

Trong đó, E là mô đun đàn hồi của vật liệu dầm, J là mômen quán tính của mặt cắt ngang dầm, m là khối lượng trên một đơn vị chiều dài, l là chiều dài của dầm conson. α_i là hệ số, nhận các giá trị $\alpha_i=1,875;\ 4,694;\ 7,885\ ;...;\frac{\pi}{2}(2i+1).$

Tương ứng với tần số dao động riêng ω_i, ta có dạng dao động chính thứ i ứng với hàm biểu thị dạng uốn X_i.

2.2 Dầm thép không hư hỏng

Xét dầm thép công xôn như hình sau:



Hình 2. Mô hình dầm ban đầu

Xét phần tử hai đầu liên kết hàn, Ma trận độ cứng phần tử:

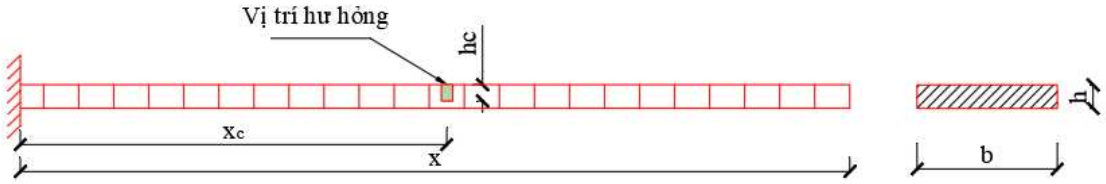
$$[K]_e = \frac{EI}{L_e^3}\begin{bmatrix} 12 & 6L_e & -12 & 6L_e \\ 6L_e & 4L_e^2 & -6L_e & 2L_e^2 \\ -12 & -6L_e & 12 & -6L_e \\ 6L_e & 2L_e^2 & -6L_e & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận khối lượng phần tử:

$$[m]_e = \frac{\rho A L_e}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22L_e & 54 & -13L_e \\ 22L_e & 4L_e^2 & 13L_e & -3L_e^2 \\ 54 & 13L_e & 12 & -22L_e \\ -13L_e & -3L_e^2 & -22L_e & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3. Dầm thép có hư hỏng

Xét dầm thép công xôn hư hỏng như hình sau:



Hình 3. Mô hình dầm hư hỏng

Độ cứng cục bộ giảm khi có hư hỏng xảy ra trong dầm. Ma trận độ cứng phần tử của một phần tử bị nứt (Kec) được xác định như sau:

$$K_{ec} = [T]^t [C]^{-1} [T] \quad (6)$$

Trong đó [T] là ma trận chuyển, [C] là ma trận hỗn hợp. Ma trận [C] là phép cộng của ma trận độ linh hoạt của dầm nguyên vẹn ban đầu [Cn] và ma trận độ linh hoạt bổ sung do sự xuất hiện của vết nứt [Cc] được tính như sau:

$$[C] = [C_n] + [C_c] \quad (7)$$

Ma trận chuyển [T]:

$$[T] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -L_e & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ma trận độ linh hoạt của dầm nguyên vẹn ban đầu [Cn]:

$$[C_n]=\begin{bmatrix} \frac{l_e^3}{3EI} & \frac{l_e^2}{2EI} \\ \frac{l_e^2}{2EI} & \frac{l_e}{EI} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ma trận độ linh hoạt bổ sung của phần tử do vết nứt [Cc] được tính toán trong nghiên cứu của Nahvi và Jabbari [12].

$$[C_c]=[C_{(i,j)}] \quad (10)$$

$$C_{11}=\frac{2\pi(1-\nu)}{Eb}\left[\frac{9l_e^2}{h^2}\int_0^{\alpha}\alpha F_1^2(\alpha)d\alpha+\int_0^{\alpha}\alpha F_2^2(\alpha)d\alpha\right]$$

$$C_{12}=C_{21}=\frac{36\pi l_e(1-\nu)}{Ebh^2}\int_0^{\alpha}\alpha F_1^2(\alpha)d\alpha \quad (11)$$

$$C_{22}=\frac{72\pi(1-\nu)}{Ebh^2}\int_0^{\alpha}\alpha F_1^2(\alpha)d\alpha$$

Trong đó ν là hệ số poisson, α là hệ số độ sâu vết nứt, F1 và F2 là các hàm hiệu chỉnh cho mặt cắt ngang hình chữ nhật. Chúng được biểu thị như sau:

$$\alpha=\frac{h_c}{h} \quad (12)$$

$$F_1(\alpha)=\sqrt{\frac{\tan(\frac{\alpha\pi}{2})}{\frac{\alpha\pi}{2}}}.\frac{[0.923+0.199(1-\sin(\frac{\alpha\pi}{2}))^4]}{\cos(\frac{\alpha\pi}{2})} \quad (13)$$

$$F_2(\alpha)=[1.122-0.561(\alpha)+0.85(\alpha)^2+0.18(\alpha)^3]/\sqrt{1-\alpha}$$

2.4. Phân chia vùng cho dầm thép thí nghiệm

Xét dầm thép công xôn hư hỏng như hình 3. Dầm thép hư hỏng được phân chia thành các vùng dựa vào mối quan hệ giữa tỉ số tần số dao động riêng chuẩn hóa $\Delta F_{(i,j)}$ (tính bằng tỉ số các tần số dang động riêng chuẩn hóa df_i, df_j) và tỉ lệ giữa vị trí hư hỏng với chiều dài của dầm thép theo công thức sau.

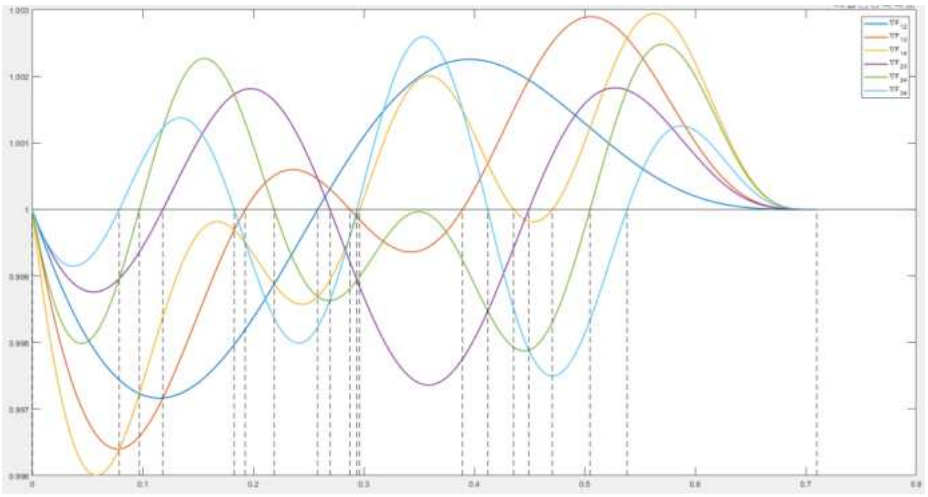
$$\Delta F_{(i,j)}=\frac{df_i}{df_j}$$

$$df_i=\frac{f_i^{damaged}}{f_i^{undamaged}} \quad (14)$$

$$df_j=\frac{f_j^{damaged}}{f_j^{undamaged}}$$

$$x_n=\frac{x_c}{x}.100$$

Xét dầm thép có chiều dài x=0,71m; với hư hỏng tại vị trí x_c, Biểu đồ mối quan hệ giữa $\Delta F_{(i,j)}$, x_c như hình sau:



Hình 4. Biểu đồ quan hệ giữa $\Delta F_{(i,j)}$ và x_c

Vùng hư hỏng sẽ được xác định bằng thông qua tần số dao động riêng của dầm thép hư hỏng và dầm thép ban đầu.

3. Mô phỏng số xác định hư hỏng kết cấu thông qua thay đổi tần số dao động riêng

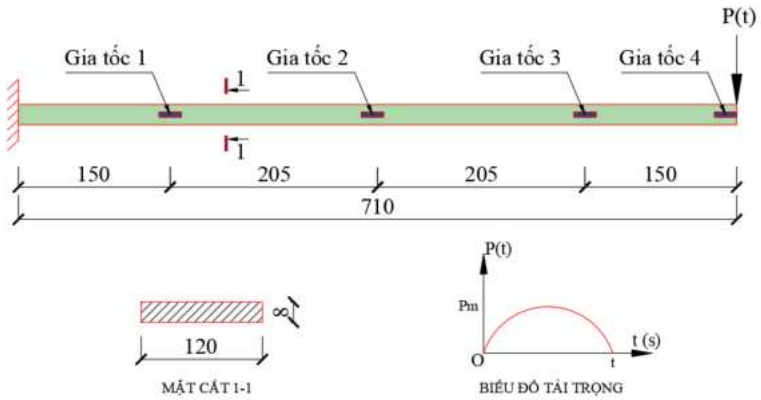
3.1. Mô hình mô phỏng

Sử dụng phần mềm Sap2000 để tiến hành mô phỏng dao động của kết cấu. Kết cấu mô phỏng dao động là dầm công xôn bằng thép có tiết chữ nhật, một đầu ngàm một đầu tự do như Hình 5. Thông số vật lý của kết cấu được thể hiện trong Bảng 1

Bảng 1. Thông số dầm thép thí nghiệm

STT	Thông số	Kí hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Chiều dài	L	mm	710
2	Khối lượng riêng	ρ	Kg/m^3	7850
3	Mô đun đàn hồi	E	Mpa	$2{,}03x10^5$
4	Chiều rộng tiết diện	B	mm	60
5	Chiều cao tiết diện	H	mm	8

Sơ đồ kết cấu ban đầu khi chưa có hư hỏng được thể hiện như sau:

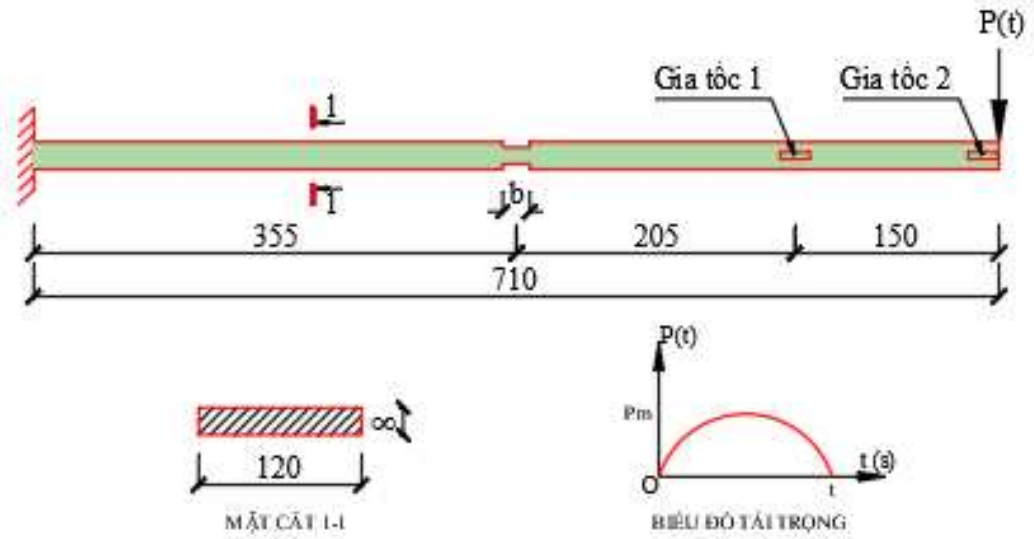


Hình 5. Sơ đồ kết cấu ban đầu

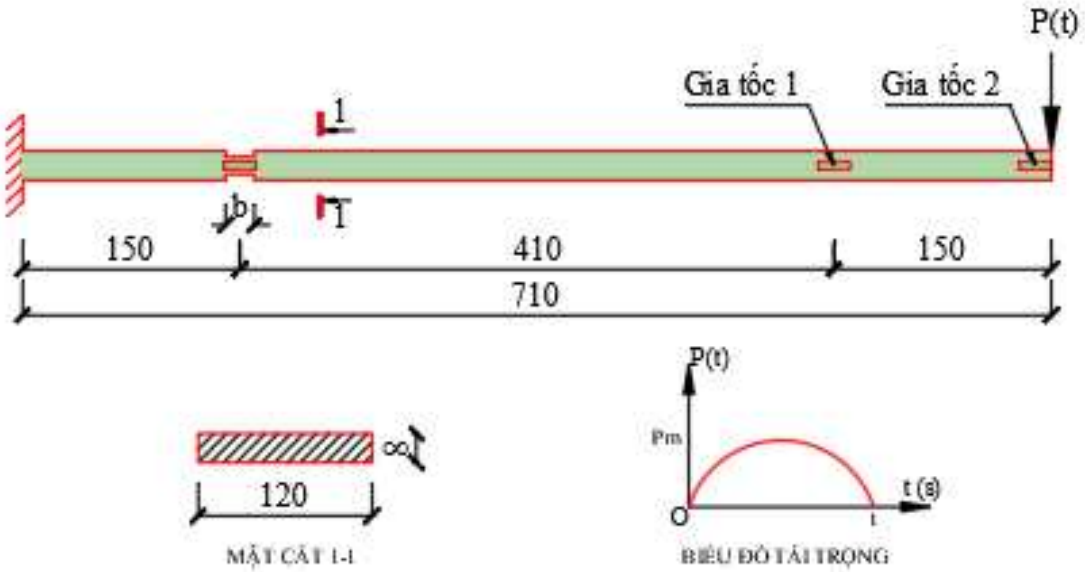
Tiến hành mô phỏng dao động kết cấu ban đầu khi chưa có sự giảm yếu tiết diện và khi kết cấu có sự giảm yếu tiết diện. Sử dụng phương pháp phân rã miền tần số FDD [13] để nhận dạng tần số dao động riêng từ giá trị gia tốc của hai điểm bất kỳ được lấy từ phần mềm Sap2000 (gia tốc 1, gia tốc 2).

Mô phỏng với trường hợp vị trí giảm yếu chính giữa nhịp và giảm yếu tại vị trí cách đầu ngàm 1/4 chiều dài nhịp.

Với hai trường hợp, giả sử tỉ số chiều sâu suy giảm tiết diện α lần lượt là 25%, 35%, 45%, 55%, giảm yếu trên toàn bộ bề rộng B=60mm.



Hình 6. Sơ đồ kết cấu hư hỏng tại giữa dầm



Hình 7. Sơ đồ kết cấu hư hỏng cách đầu ngàm 1/4 chiều dài nhịp

3.2. Kết quả nhận dạng vùng hư hỏng của dầm thép

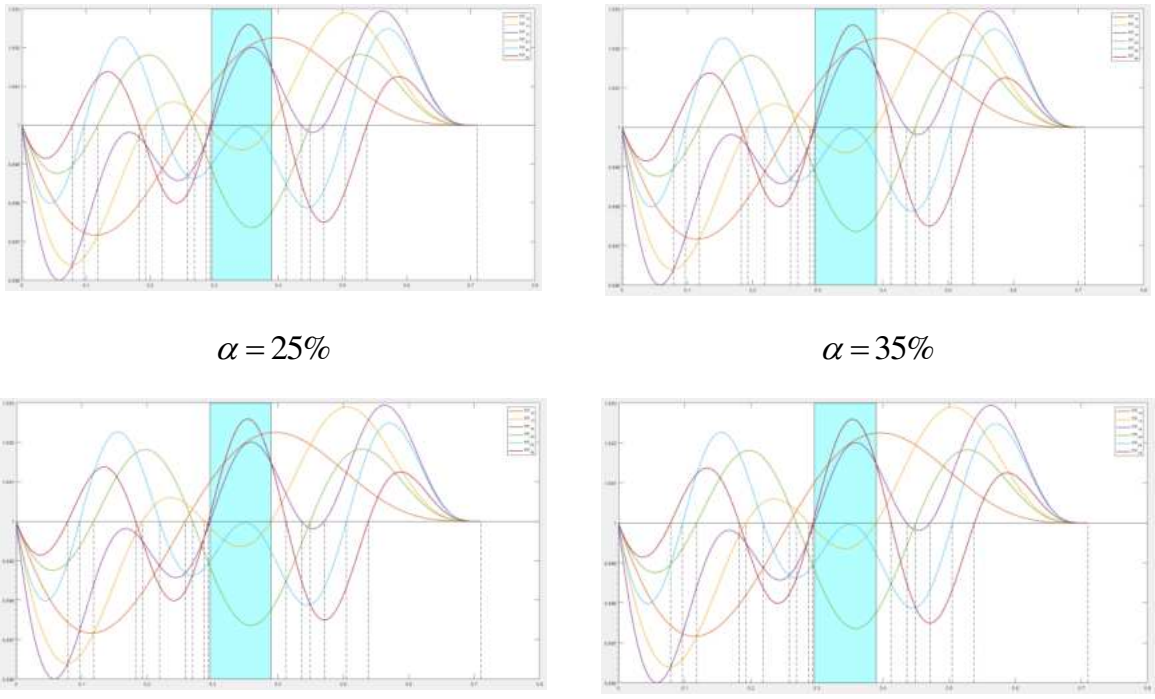
3.2.1. Kết quả nhận dạng vùng hư hỏng khi hư hỏng tại ví trí cách đầu dầm 1/2 L.

+ Tần số dao động riêng

Bảng 2. Kết quả nhận dạng tần số dao động riêng

Mode	Tần số dao động riêng				
	Không hư hỏng	Hư hỏng với các tỉ số độ sâu hư hỏng α			
		25%	35%	45%	55%
1	13.25	12.88	12.75	12.75	12.63
2	80.75	79.5	77.5	75.5	74.38
3	226.8	226.5	226.5	226.5	225.5
4	435.5	429.5	420.5	413.5	410.5

+ Nhận dạng vùng hư hỏng



$\alpha = 25\%$ $\alpha = 35\%$

$\alpha = 45\%$ $\alpha = 55\%$

Hình 8. Kết quả nhận dạng hư hỏng khi hư hỏng tại 1/2 L

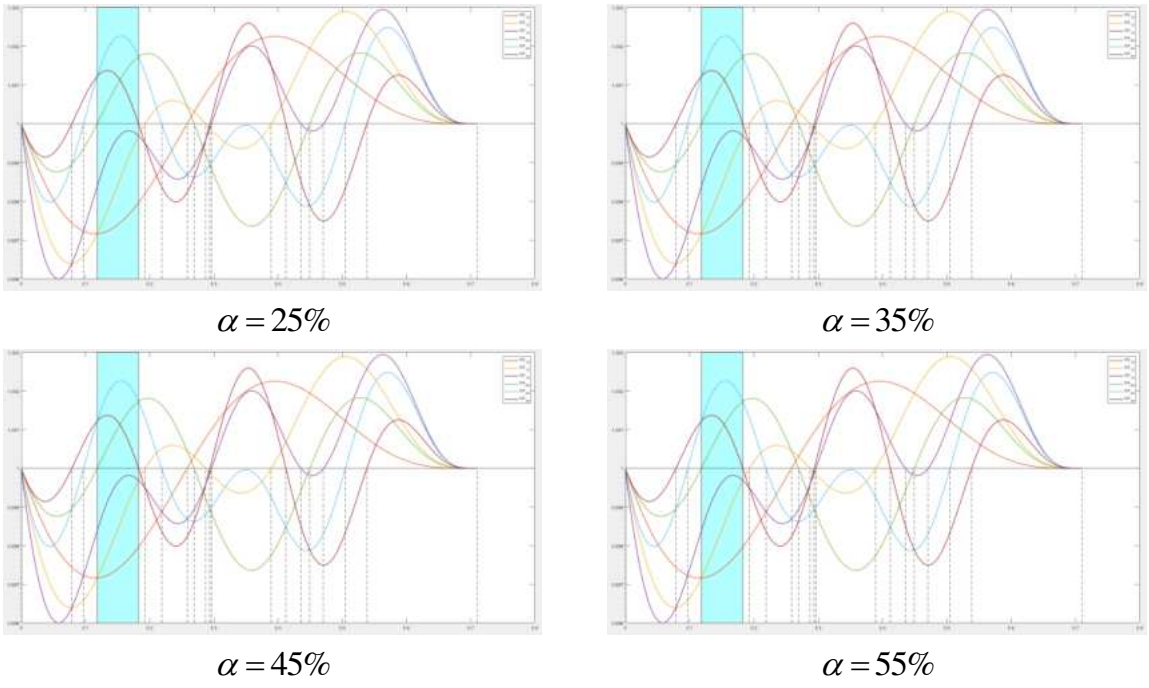
3.2.2. Kết quả nhận dạng vùng hư hỏng khi hư hỏng tại ví trí cách đầu ngàm 1/4 L.

+ Tần số dao động riêng

Bảng 3. Kết quả nhận dạng tần số dao động riêng

Mode	Tần số dao động riêng				
	Không hư hỏng	Hư hỏng với các tỉ số độ sâu hư hỏng α			
		25%	35%	45%	55%
1	13.25	12.75	12.25	12	11.5
2	80.75	80.75	81.25	81.25	81.25
3	226.8	225.25	223.5	222	221.25
4	435.5	428.25	419.5	415.5	413.25

+ Dạng dao động riêng



Hình 9. Kết quả nhận dạng hư hỏng khi hư hỏng tại 1/4 L

Qua kết quả ở Hình 8,

Hình *9* cho thấy vùng hư hỏng nhận dạng được bằng phương pháp dựa vào thay đổi tần số dao động riêng phù hợp với các vị trí hư hỏng được mô phỏng ban đầu. Các trường hợp nhận dạng vùng hư hỏng không phụ thuộc vào mức độ hư hỏng của vị trí hư hỏng.

4. Kết luận

Qua kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp dựa vào sự thay đổi tần số để nhận dang vùng hư hỏng của kết cấu dầm thép công xôn cho kết quả có độ tin cậy cao. Vùng hư hỏng nhận dạng được phù hợp với mô phỏng vị trí hư hỏng ban đầu.

Kết quả nhận dạng vùng hư hỏng không phụ thuộc vào mức độ hư hỏng của kết cấu điều này cho thấy tính khả thi của phương pháp khi nhận dạng vị trí hư hỏng của dầm thép dựa vào sự thay đổi của tần số dao động riêng. Cần tiến hành các nghiên cứu nhận dạng vị trí hư hỏng khi kết cấu có các dạng hư hỏng khác nhau.

Có thể được sử dụng kết quả nghiên cứu để tiến hành thí nghiệm xác định vị trí hư hỏng đối với kết cấu dầm thép thực, các kết cấu có cấu trúc phức tạp và kết công trình thực tế dưới sự kích thích của môi trường bằng cách dựa vào sự thay đổi tần số dao động riêng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài Khoa học Công nghệ cấp quốc gia mã số: KC-4.0-22/19-25.

Tài liệu tham khảo

[1] W.M. West, Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen, in: Proc. Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity, 1984, pp. 1–6.

[2] N. Lieven, D. Ewins, Spatial correlation of mode shapes: The coordinate modal assurance criterion (COMAC). in: Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference, Kissimmee, Florida, USA, 1988, pp. 1690–695.

[3] A. Pandey, M. Biswas, M. Samman, Damage detection from changes in curvature mode shapes, J. Sound Vib. 145 (1991) 321–332.

[4] S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, D.W. Shevitz, Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS, 1996.

[5] J.M. Lifshitzand, A. Rotem, Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique, J. Compos. Mater. 3 (1969) 412–423.

[6] A. Messina, I.A. Jones, E.J. Williams, Damage detection and localisation using natural frequency changes, in: Proceedings of Conference on Identification in Engineering Systems, Swansea, U.K67-76, 1996.

[7] T. Contursi, A. Messina, E.J. Williams, A multiple damage location assurance criterion based on natural frequency changes, J. Vib. Control 4 (5) (1998) 619–633.

[8] A. Messina, T. Contursi, E.J. Williams, Multiple damage evaluation using natural frequency changes, in: Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference, vol. 1, 1997, pp. 658–664

[9] G.R. Gillich, Z.I. Praisach, Robust method to identify damages in beams based on frequency shift analysis, in: Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 8348, 83481D, 2012.

[10] G.R. Gillich, Z.I. Praisach, Modal identification and damage detection in beam-like structures using the power spectrum and time-frequency analysis, Signal Process. 96 (2014) 29–44

[11] G.R. Gillich, N.M.M. Maia, I.C. Mituletu, Z.I. Praisach, M. Tufoi, N. Ionica, Early structural damage assessment by using an improved frequency evaluation algorithm, Lat. Am. J. Solids Struct. 12 (12) (2015) 2311–2329

[12] H. Nahvi, M. Jabbari, Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model, Int. J. Mech. Sci. 47 (2005) 1477–1497.

[13] K.H. Barada, D.S. Sharmaa, V. Vyasb, Crack detection in cantilever beam by frequency based method, Procedia Eng. 51 (2013) 770–775.

[14] Trung Duc T, Anh Tuan L, Dinh Huong V, Cong Nghi N., Identify the natural frequencies of structures by frequency domain decomposition method, Journal of Science and Technique - Section on Special Construction Engineering, 05, 2020.

Identification damage of cantilever steel beam through changing natural frequency

Abstract: *The occurrence of damage in a structure produces changes in its dynamic characteristics such as its natural frequencies, mode shapes and damping ratios... so that the configuration is undamaged. Based on this, some methods have been studied and used to determine the damaged location of the structure. In this paper, the cantilever beam is discretized into a number of zones, where each zone has a specific classification of the first four normalized natural frequencies. The damaged zone is distinguished by only the classification of the normalized frequencies of the structure. Conduct simulation with the undamaged cantilever beam and damaged using Sap2000 software and determine the natural frequency of the beam, as a basis for identifying the location and damage level of the beam. The identification results of zones damage in accordance with the assumed initial location of the damage and independent on the damage level of the beam.*

Key word: Natural frequency, Mode shape, structural damage.

Nghiên cứu ảnh hưởng của một số loại dữ liệu giả bất thường khi sử dụng mô hình autoencoder trong bài toán phát hiện bất thường trong video

Lê Anh

Viện Công nghệ Thông tin và Truyền thông, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: anhle@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Phát hiện bất thường trong video là một bài toán lớn, nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trong những năm gần đây. Giải bài toán này là một thách thức lớn khi mà có nhiều loại bất thường có thể xảy ra, nhưng chúng rất khó có thể được thu thập để phục vụ cho quá trình huấn luyện mạng. Để giải quyết vấn đề khan hiếm dữ liệu trên, một số phương pháp sinh giả bất thường đã được đề xuất để cải thiện khả năng phát hiện các loại bất thường trong các video. Trong bài báo này, chúng tôi đã tiến hành cài đặt và thử nghiệm một số loại mẫu giả bất thường và sử dụng chúng trong quá trình huấn luyện một mô hình autoencoder có tên là MNAD để đánh giá được ảnh hưởng của từng loại lên hiệu suất phát hiện bất thường của mô hình. Các thử nghiệm được tiến hành trên các tập dữ liệu video đã cho một số kết quả khả quan.

Keywords: *Phát hiện bất thường, video, autoencoder, sinh giả bất thường.*

1. Giới thiệu

Để tăng cường an ninh tại các khu vực công cộng, nhiều camera giám sát an ninh đã được đặt ở vị trí quan trọng, chúng đóng vai trò hỗ trợ các cơ quan chức năng trong việc nhận biết và ứng phó với các hành vi bất thường như: xâm phạm, đánh nhau, bạo động hoặc vi phạm pháp luật. Nhằm hỗ trợ cho con người trong công việc giám sát, các hệ thống tự động phát hiện bất thường đã được phát triển. Các phương pháp phát hiện bất thường trong video (Video Anomaly Detection – VAD) cũng ngày càng được quan tâm trong cộng đồng nghiên cứu những năm gần đây. Tuy vậy, phát hiện các hoạt động bất thường trong môi trường thực tế đối mặt với nhiều thách thức. Một là, sự khan hiếm dữ liệu của các sự kiện bất thường so với các sự kiện bình thường làm cho việc thu thập và gắn nhãn dữ liệu bất thường đủ lớn để có thể phát hiện hiệu quả trở nên khó khăn. Hai là, việc phân biệt giữa các sự kiện bất thường và bình thường trở nên phức tạp do tính mơ hồ của các đặc điểm của chúng.

Dựa trên sự sẵn có của các dữ liệu bất thường và dữ liệu bình thường trong tập huấn luyện, các mô hình thường thuộc một trong những phương pháp sau: phát hiện bất thường không giám sát (unsupervised VAD), phát hiện bất thường giám sát yếu (weakly-supervised VAD), và phát hiện bất thường có giám sát (supervised VAD). Cụ thể, đối với phương pháp phát hiện bất thường không giám sát, các video trong tập huấn luyện chỉ là các video bình thường, nghĩa là tất cả các khung hình trong các video chỉ có các đối tượng bình thường và có các hành động bình thường. Bài toán thường được giải quyết thông qua hai cách tiếp cận sử dụng mạng autoencoder học sâu, đó là: khôi phục khung hình (reconstruction) hoặc dự đoán khung hình tiếp theo (prediction), theo đó dữ liệu đầu vào để huấn luyện chỉ là các khung hình bình thường liên tiếp nhau. Ví dụ, với đầu vào là một chuỗi năm khung hình liên tiếp nhau, phương pháp khôi phục sẽ cố gắng tạo lại năm khung hình này ở đầu ra, và quá trình học của mạng là cực tiểu hóa sai số của các cặp khung đầu ra và đầu vào này. Trong khi đó, phương pháp dự đoán sẽ chỉ lấy bốn khung hình đầu tiên để huấn luyện mạng, mạng được đào tạo để có khả năng sinh ra được khung hình dự đoán, tức là là thể hiện được các đối tượng và hành vi sẽ xảy ra tiếp theo trong khung hình đó, sao cho nó càng giống với khung hình thứ năm (khung hình gốc) ở đầu vào.

Một giả thuyết được đặt ra đó là trong quá trình kiểm tra, các khung hình chứa các đối tượng mới hoặc các đối tượng có hành vi bất thường sau khi đi qua mạng đã được huấn luyện thì mạng sẽ tạo ra các sai số khôi phục hoặc dự đoán cao, bởi vì các khung hình đó không được học bởi mạng. Tuy nhiên, giả thuyết này có thể không đúng trong trường hợp khi mà một số khung hình bất thường vẫn có thể được khôi phục hoặc dự đoán tốt thông qua tập hợp của các thuộc tính bình thường đã học bởi mạng. Do đó, đã có một số hướng nghiên cứu nhằm cải thiện khả năng học của mạng autoenoder trong phát hiện bất thường. Hướng tiếp cận thứ nhất là bổ sung các mô-đun bộ nhớ vào các mạng autoencoder nhằm giúp cho mạng có khả năng lưu trữ thông tin về các đặc trưng bình thường trong quá trình huấn luyện [9, 15, 22]. Sự bất thường được xác định bằng cách so sánh biểu diễn của một mẫu với đặc trưng bình thường đã được học và được lưu lại trong bộ nhớ. Hướng tiếp cận thứ hai là tăng cường thêm các mẫu dữ liệu bất thường, được sinh ra bởi các mô-đun sinh giả bất thường, cùng với các mẫu dữ liệu bình thường sẵn có trong tập dữ liệu, nhằm tăng cường khả năng học và nhận diện các sự kiện bất thường trong tập kiểm tra [1, 21, 27].

Khai thác các điểm mạnh của hai cách tiếp cận trên, chúng tôi huấn luyện một mạng autoencoder có bộ nhớ có sử dụng cả dữ liệu bình thường và dữ liệu giả bất thường. Trong thí nghiệm, chúng tôi sử dụng một số loại dữ liệu giả bất thường đó là: skip frames, key frames, repeat frames, noise, patch. Mục tiêu là đánh giá tác động của từng loại dữ liệu giả bất thường lên mô hình để phát hiện được các bất thường trong video. Các thử nghiệm trên các tập dữ liệu ped2 [12], avenue [16] đã cho một số kết quả tốt khi so sánh với một số phương pháp gần đây.

2. Các nghiên cứu liên quan

2.1. Phát hiện bất thường trong video

Trong phương pháp phát hiện bất thường không giám sát, hai phương pháp phổ biến nhất là các phương pháp dựa trên tái tạo và các phương pháp dựa trên dự đoán. Đối với phương pháp tái tạo, autoencoder là một trong những kiến trúc mạng phổ biến nhất được sử dụng. Một mô hình autoencoder gồm hai thành phần chính là bộ mã hóa (encoder) và bộ giải mã (decoder). Đầu vào của autoencoder là một ảnh hoặc nhiều ảnh liên tiếp, encoder sẽ trích xuất các đặc trưng và encoder sẽ tái tạo lại ảnh từ các đặc trưng được trích xuất sao cho ảnh đầu ra càng giống ảnh đầu vào càng tốt. Trong phương pháp phát hiện bất thường không giám sát, các mô hình autoencoder chỉ được huấn luyện trên các khung hình bình thường để học các đặc trưng bình thường từ các mẫu đầu vào. Ví dụ, một số phương pháp đã học biểu diễn không gian và thời gian của các ảnh đầu vào qua các lớp CNN và LSTM. Phương pháp [20] đã áp dụng một kết hợp của một autoencoder tích chập và U-Net với các kết nối bỏ qua (skip connections), chúng chia sẻ cùng bộ mã hóa để thu thập cả thông tin về ngoại hình và chuyển động của các đối tượng khung hình. Một giả thuyết được sử dụng trong các mô hình trên là các khung hình bình thường được tái tạo tốt bởi mô hình đã được huấn luyện, trong khi các khung hình bất thường không. Kết quả là so với các khung hình bình thường, các khung hình bất thường có sai số tái tạo cao hơn, và các sai số này thường được sử dụng làm điểm bất thường để phân biệt các sự kiện bình thường và các sự kiện bất thường trong thời gian suy luận.

Trong phương pháp dự đoán, một mô hình autoencoder được huấn luyện trên các chuỗi các khung hình bình thường để dự đoán khung hình tiếp theo. Trong phương pháp này, các mô hình mạng GAN và autoencoder là các kiến trúc được sử dụng phổ biến để sinh ra khung hình tương lai. Ví dụ, [14] đã đề xuất một mô hình GAN trong đó một bộ tạo (U-Net) tạo ra khung

hình tiếp theo từ một chuỗi các khung hình đầu vào. Tác giả trong [21] đã biểu diễn một autoencoder theo kiến trúc của U-Net có khả năng học cả đặc trưng không gian và thời gian để dự đoán khung hình tiếp theo. Tại giai đoạn kiểm tra, mô hình đã được huấn luyện có thể phân biệt các khung hình bình thường và bất thường dựa trên một giả thuyết rằng các sự kiện bất thường là không thể dự đoán trong khi các sự kiện bình thường có thể dự đoán được tốt [14]. Do đó, các sai số dự đoán trên các khung hình bất thường sẽ cao hơn so với các khung hình bình thường.

Tóm lại, cả hai giả thuyết trên đều cho rằng các sai số tái tạo và dự đoán của các khung hình bất thường lớn hơn so với các khung hình bình thường. Tuy nhiên, giả định này không luôn đúng vì sự đa dạng của các mẫu bình thường và khả năng biểu diễn mạnh mẽ của mạng CNN có thể giúp các khung hình có chứa các sự kiện bất thường được tái tạo hoặc dự đoán với sai số thấp, làm giảm hiệu suất phát hiện sự bất thường của mô hình. Điểm yếu này có thể được khắc phục bằng cách áp dụng các mô hình autoencoder có mô-đun bộ nhớ nằm giữa encoder và decoder.

2.2. Các mạng autoencoder có bộ nhớ

Với mục đích cải thiện khả năng học các đặc trưng từ các mẫu dữ liệu bình thường, các mô-đun bộ nhớ đã được bổ sung vào giữa hai thành phần encoder và decoder của các mạng autoencoder. Mô hình autoencoder có bộ nhớ đầu tiên cho phát hiện bất thường trong video được đề xuất trong bài báo MemAE [9]. Một mô-đun bộ nhớ bao gồm 2,000 phần tử bộ nhớ đã được thêm vào giữa encoder và decoder, để lưu trữ các đặc trưng của các khung hình bình thường. Sự bất thường được xác định bằng cách so sánh biểu diễn của một mẫu với đặc trưng bình thường đã được học và lưu trữ trong bộ nhớ. Biểu diễn của dữ liệu bất thường nằm ngoài bộ nhớ nên dữ liệu tái tạo của nó sẽ khác biệt với dữ liệu đầu vào và gây ra sai số tái tạo lớn.

Tiếp theo, cơ chế lưu trữ đặc trưng thông qua bộ nhớ này được cải tiến bởi nhóm tác giả trong bài báo MNAD [22] với việc sử dụng số lượng bộ nhớ ít hơn, nhưng mang lại hiệu quả tốt hơn với chỉ 10 thành phần bộ nhớ. Bên cạnh đó, các phần tử bộ nhớ được cập nhật cả trong quá trình kiểm tra để nâng cao khả năng phát hiện các sự kiện bất thường.

Một mô hình auto-encoders với nhiều mô-dul bộ nhớ [32] đã được đề xuất, chúng được kết hợp với thuật toán R-CNN để phát hiện các đối tượng trong khung hình. Áp dụng kỹ thuật khôi phục đặc trưng chuyển động qua ảnh optical flow và kỹ thuật dự đoán khung hình xảy ra tiếp theo, phương pháp này đã đạt được hiệu quả phát hiện tốt hơn các phương pháp trước đó.

2.3. Các bộ sinh khung hình giả bất thường

Bên cạnh các mô hình Autoencoder có bộ nhớ, một cách tiếp cận khác đó là tăng cường dữ liệu học cho mô hình bằng việc sinh ra thêm các khung hình giả bất thường để làm suy yếu đi khả năng khôi phục hoặc dự đoán của mạng đối khi các khung hình chứa các sự kiện bất thường [1, 21, 27].

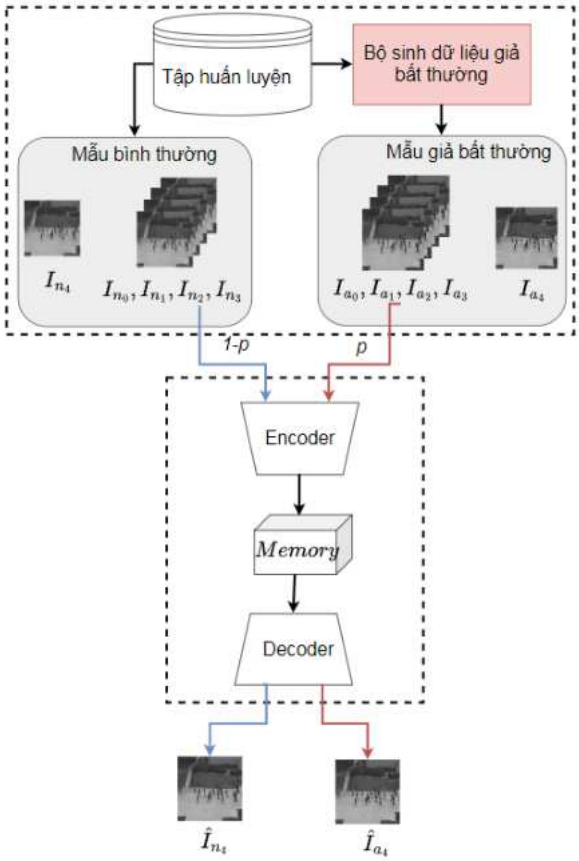
Một mô hình GAN có tên là OGNet được nhóm tác giả đề xuất để phát hiện bất thường trong video qua huấn luyện một bộ phân loại một lớp trên tập dữ liệu bình thường và dữ liệu giả bất thường [27]. Trong quá trình huấn luyện, một bộ phân biệt Discriminator (D) được huấn luyện với dữ liệu đầu vào gồm hai loại: một là dữ liệu bình thường là ảnh trong cơ sở dữ liệu và ảnh được sinh bởi một bộ sinh Generator thứ nhất (được gọi là *G*), hai là dữ liệu giả bất

thường là ảnh được sinh bởi một module sinh giả bất thường và ảnh được sinh bởi một bộ sinh thứ hai (được gọi là G_{old}).

Tuy nhiên, mô-đun sinh giả bất thường ở trên chỉ sinh ra các đặc trưng bất thường về mặt hình dạng mà không xét đến các đặc trưng bất thường về mặt chuyển động. Trong khi đó, các tác giả trong [1] đã áp dụng kỹ thuật lược bỏ các khung hình skipping frames để thể hiện cho các chuyển động bất thường. Sau đó, một chuỗi các khung hình bình thường và một chuỗi các khung hình bất thường được đưa vào huấn luyện mạng với một tỷ lệ xác suất được xác định trước, nhờ đó mà mạng được huấn luyện có thể phát hiện các khung hình bất thường tốt hơn trong giai đoạn kiểm tra.

Một phương pháp biến đổi dữ liệu có tên là FastAno [21] đã được đề xuất nhằm phát hiện bất thường nhanh trên cơ sở đề xuất hai phép biến đổi dữ liệu là phép xoay ảnh Spatial Rotation Transformation (SRT) và phép trộn ảnh Temporal Mixing Transformation (TMT) để sinh ra các khối (patch) bất thường trong một chuỗi các ảnh bình thường, nhằm nâng cao khả năng học các đặc trưng bình thường về hình dáng và chuyển động của các đối tượng trong video.

3. Mạng autoencoder có bộ nhớ và dữ liệu giả bất thường



Hình 1. Mô hình autoencoder có bộ nhớ kết hợp với bộ sinh giả bất thường (MAAE-PA).

Trong bài báo này chúng tôi giải quyết bài toán phát hiện bất thường trong video bằng phương pháp học không giám sát trên tập dữ liệu chỉ chứa các khung hình của các sự kiện bình thường. Một mạng autoencoder có bộ nhớ được chúng tôi lựa chọn có tên là MNAD [22] được huấn luyện trên cả dữ liệu bình thường và dữ liệu giả bất thường. Trong đó, các loại dữ liệu giả bất thường được đề xuất trong thử nghiệm đó là: skip frames, repeat frames, noise, patch [35],

key frames [36]. Chúng tôi ký hiệu mô hình mạng sử dụng bộ dữ liệu giả bất thường này là MAAE-PA (Memory Augmented Autoencoder- Pseudo Anomalies) (Hình 1).

Mặc dù, đầu vào của mạng bao gồm cả dữ liệu bình thường và dữ liệu giả bất thường, nhưng dữ liệu giả bất thường được đưa vào mô hình với xác suất *p* rất nhỏ. Do đó, mô hình MAAE-PA vẫn tập trung vào việc học phân bố của các mẫu dữ liệu bình thường, còn các mẫu dữ liệu giả bất thường sẽ cung cấp các đặc trưng giả bất thường cho mạng trong giai đoạn huấn luyện, từ đó trong giai đoạn kiểm tra mạng có thể phát hiện chính xác hơn các bất thường trong các khung hình.

3.1. Bộ sinh dữ liệu giả bất thường

Từ tập cơ sở dữ liệu huấn luyện chỉ chứa các sự kiện bình thường, bộ sinh dữ liệu có khả năng tạo ra các chuỗi khung hình bình thường và các chuỗi khung hình giả bất thường để huấn luyện cho mô hình mạng autoencoder có bộ nhớ có khả năng phân biệt được các khung hình chứa sự kiện bất thường và các khung hình chứa sự kiện bình thường.

Các mẫu dữ liệu giả bất thường được sinh dựa trên các kỹ thuật đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây, bao gồm: skip frames, repeat frames, noise, patch [35], key frames [36].

Các mẫu bình thường là một chuỗi năm khung hình $I_{n_0}, I_{n_1}, I_{n_2}, I_{n_3}, I_{n_4}$ được lấy trực tiếp từ cơ sở dữ liệu huấn luyện. Trong khi đó, các mẫu bất thường là một chuỗi năm khung hình $I_{a_0}, I_{a_1}, I_{a_2}, I_{a_3}, I_{a_4}$ được sinh bởi một bộ sinh giả bất thường áp dụng một trong các kỹ thuật nêu trên.

Trong giai đoạn huấn luyện, một chuỗi bốn khung hình bình thường $I_{n_0}, I_{n_1}, I_{n_2}, I_{n_3}$ hoặc một chuỗi bốn khung hình giả bất thường $I_{a_0}, I_{a_1}, I_{a_2}, I_{a_3}$ được đưa vào để huấn luyện một mạng autoencoder có bộ nhớ với xác suất tương ứng là (1 - *p*) và *p*. Mạng autoencoder này có nhiệm vụ là dự đoán khung hình xảy ra tiếp theo từ chuỗi các khung hình đầu vào, kết quả nhận được tương ứng sẽ là khung hình $\hat{I}_{n_4}$ hoặc $\hat{I}_{a_4}$.

3.2. Mô hình autoencoder có bộ nhớ

Trong quá trình huấn luyện, một chuỗi bốn khung hình là đầu vào cho encoder để trích xuất ra một bản đồ đặc trưng *F* có kích thước *H*x*W*x*D*, trong đó *H*, *W*, D là chiều dài, chiều rộng và số kênh. *F* được chia thành *Q* truy vấn đặc trưng (feature queries) q_j (j = 1,.., Q) với Q=*H*x*W*, mỗi truy vấn có kích thước 1x1x*D* và là đầu vào của mô-đun bộ nhớ. Mô-đun bộ nhớ bao gồm *N* mục bộ nhớ (memory items) m_i (i= 1,.., N), là nơi lưu trức các đặc trưng mẫu bình thường, chúng ta có thể thực hiện toán tử đọc (Read) hoặc cập nhật (Update) lên các mục bộ nhớ này.

Toán tử Read sẽ sinh ra một bản đồ đặc trưng $\widehat{M}$ là tổng có trọng số của các mục bộ nhớ, nó được kết hợp với bản đồ đặc trưng *F* để tạo ra đầu vào cho decoder. Đầu tiên, chúng ta tính toán các xác suất phù hợp (matching probabilities) $w_{j,i}$ giữa từng truy vấn q_j và các mục bộ nhớ (m_1, m_2, .., m_N) thông qua độ đo tương tự cosine giữa q_j và tất cả các mục bộ nhớ, sau đó áp dụng hàm softmax như sau:

$$w_{j,i} = \frac{\exp((m_i)^T q_j)}{\sum_{i'=1}^{N} \exp((m_{i'})^T q_j)} \quad (2)$$

Sau đó, chúng ta nhận được các đặc trưng $\widehat{m}_j$ tương ứng mỗi truy vấn q_j bằng cách tính toán trung bình có trọng số các mục bộ nhớ dựa trên xác suất phù hợp $w_{j,i}$ như sau:

$$\widehat{m}_j = \sum_{i=1}^{N} w_{j,i} m_i \quad (3)$$

Cuối cùng, các đặc trưng $\widehat{m}_j$ tạo nên một bản đồ đặc trưng $\widehat{M}$ có cùng kích thước với bản đồ đặc trưng F, và hai bản đồ này được kết hợp với nhau để tạo ra đầu vào cho decoder.

Đối với toán tử Update, mỗi mục bộ nhớ thứ i sẽ được cập nhật thường xuyên từ tập hợp các truy vấn gần nó nhất G_i . Các giá trị xác suất phù hợp $v_{j,i}$ giữa từng mục bộ nhớ m_i và các truy vấn $(q_1, q_2, .., q_Q)$ được tính toán thông qua độ đo tương tự cosine giữa m_i và các truy vấn, sau đó hàm softmax function và phép quy chuẩn được sử dụng như sau:

$$v_{j,i} = \frac{\exp((m_i)^T q_j)}{\sum_{j'=1}^{Q} \exp((m_i)^T q_{j'})} \quad (4)$$

$$v'_{j,i} = \frac{v_{j,i}}{max_{j' \in G_i} v_{j',i}} \quad (5)$$

Cuối cùng, mỗi mục bộ nhớ m_i được cập nhật bằng công thức sau:

$$m_i = \left\| m_i + \sum_{j \in G_i} v'_{j,i} q_j \right\|_2 \quad (6)$$

3.3. Hàm mất mát

Trong quá trình huấn luyện mô hình, chúng tôi cực tiểu hóa sai số dự đoạn giữa khung hình bình thường I_{n_4} và khung hình đự doán của nó $\hat{I}_{n_4}$, và cực đại hóa sai số dự đoán giữa khung hình giả bất thường I_{a_4} và khung hình dự đoán của nó $\hat{I}_{a_4}$. Sai số dự đoán giữa I_{n_4} và $\hat{I}_{n_4}$ là tổng của sai số cường độ ảnh (intensity loss), sai số nén đặc trưng (feature compactness loss), và sai số phân tách đặc trưng (feature separateness loss):

$$L_n = L_{intensity} + \sigma_c L_{compact} + \sigma_s L_{separate} \quad (7)$$

Trong khi đó, sai số dự đoán giữa I_{a_4} và $\hat{I}_{a_4}$ được tính như sau:

$$L_a = -\left(L_{intensity} + \sigma_c L_{compact} + \sigma_s L_{separate}\right) \quad (8)$$

Trong đó σ_c và σ_s là các tham số cho trước.

Sai số $L_{intensity}$ là sự khác biệt về cường độ giữa ảnh đầu vào I_i và ảnh dự đoán $\hat{I}_i$ theo khoảng cách L2:

$$L_{intensity} = \left\| \hat{I}_i - I_i \right\|_2 \quad (9)$$

Sai số $L_{compact}$ là sự khác biệt giữa từng truy vấn q_j và mục bộ nhớ gần nó nhất m_i theo L2 norm, nó được sử dụng để thu ngắn khoảng cách giữa truy vấn q_j và mục bộ nhớ gần nó nhất đối với các khung hình bình thường:

$$L_{compact} = \sum_{j=1}^{Q} \left\| q_j - m_i \right\|_2 \quad (10)$$

Tuy nhiên, sai số $L_{compact}$ cũng làm cho các mục bộ nhớ có xu hướng gần nhau hơn, để hạn chế xu hướng này sai số $L_{separate}$ được sử dụng để các mục bộ nhớ dãn cách nhau ra.

$$L_{separate} = \max\{0, \sum_{j=1}^{Q}(\|q_j - m_i\|_2 - \|q_j - m_k\|_2 + r)\} \quad (11)$$

Trong đó, m_i và m_k là các mục bộ nhớ gần nhất và gần thứ hai của truy vấn q_j, và r là giá trị biên độ.

3.4. Điểm số bất thường

Trong giai đoạn kiểm tra, các điểm số bất thường của các khung hình được tính toán để phát hiện ra sự kiện bất thường. Đầu tiên, giá trị Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) P_i giữa khung hình đầu vào I_i và khung hình dự đoán $\hat{I}_i$ được tính như sau:

$$P_i = 10\, log_{10} \frac{\max(\hat{I}_i)}{\|\hat{I}_i - I_i\|_2^2 / N} \quad (12)$$

Trong đó, N là tổng số điểm ảnh của $\hat{I}_i$, i là chỉ số của khung hình thứ i. Giá trị PSNR sau đó được chuẩn hóa về khoảng [0, 1] trên tất cả các khung hình của video trong tập kiểm tra:

$$P_{in} = \frac{P_i - min_i(P_i)}{max_i(P_i) - min_i(P_i)} \quad (13)$$

Nếu khung hình đầu vào chứa sự kiện bất thường thì kết quả khung hình dự đoán sẽ khác biệt lớn với khung hình đầu vào, và giá trị PSNR nhận được sẽ thấp và ngược lại.

Tiếp theo, ta tính toán giá trị khoảng cách L2 giữa các truy vấn và các mục bộ nhớ gần nó nhất như sau:

$$R_i = \frac{1}{Q}\sum_{j=1}^{Q}\|q_j - m_i\|_2 \quad (14)$$

Sau đó, khoảng cách R_i được chuẩn hóa về khoảng [0, 1] như sau:

$$R_{in} = \frac{R_i - min_i(R_i)}{max_i(R_i) - min_i(R_i)} \quad (15)$$

Cuối cùng, điểm số bất thường A_i của mỗi khung hình i được tính toán như sau:

$$A_i = \alpha(1 - P_{in}) + (1 - \alpha)R_{in} \quad (16)$$

Trong đó, α là tham số thể hiện cho mức độ đóng góp của hai giá trị P_{in} và R_{in} trong điểm số bất thường A_i.

4. Các thiết lập thực nghiệm

4.1. Các tập cơ sở dữ liệu

Chúng tôi thực nghiệm mô hình trên hai tập cơ sở dữ liệu nổi tiếng là ped2[12], avenue[16] chúng là tập hợp video thu được từ các camera được đặt trong khuôn viên của các trường đại học. Trong đó, tập ped2 và avenue là tập dữ liệu đơn cảnh, là các video được thu từ một camera duy nhất. Trong hai tập dữ liệu này, những người đi bộ trong khuôn viên của trường học được quy ước là bình thường, ngược lại sự xuất hiện của các vật thể lạ (ba-lô, xe đạp, xe chở hàng, xe lướt ván…) hoặc các hành động khác (chạy, đuổi bắt, đánh nhau, ném đồ…) được xem là những đối tượng bất thường hoặc những hành vi bất thường.

Cụ thể, ped2[12], bao gồm 16 video huấn luyện và 12 video kiểm tra, là một cơ sở dữ liệu đơn cảnh, nghĩa là hình ảnh trong các video được lấy từ một camera được đặt trong khuôn viên một trường đại học. Các video này được chia làm các khung hình, do đó chúng ta có 2.550 khung hình huấn luyện và 2.010 khung hình kiểm tra, có độ phân giải 204 x 360 pixels. Đặc điểm của tập dữ liệu này là sự xuất hiện của người đi bộ được xem là bình thường, trong khi đó sự xuất hiện của một số đối tượng lạ như người trượt ván, người đi xe đạp, xe chở hàng được xem là bất thường.

Tập dữ liệu avenue[16] cũng một tập đơn cảnh, bao gồm 16 video huấn luyện và 21 video kiểm tra, tương ứng với 15.328 khung hình huấn luyện và 15.324 khung hình kiểm tra với độ phân giải là 360 x 640 pixels. Sự kiện bình thường là người đi bộ, 47 sự kiện bất thường như đi sai hướng, chạy, ném đồ vật...

4.2. Các tham số huấn luyện

Với mục đích nghiên cứu, thử nghiệm và so sánh các phương pháp phát hiện bất thường trong video khác nhau trên cùng một môi trường thiết lập, chúng tôi đã xây dựng một framework có tên là VAD (Video Anomaly Detection). VAD cung cấp một các lớp đối tượng, các hàm xử lý và khung làm việc được xây dựng trên nền tảng ngôn ngữ lập trình Python và thư viện học sâu PyTorch. Các mô hình được cài đặt trên PyTorch và huấn luyện trên card đồ họa Nvidia RTX 3060 8GB. Đối với các mô hình được so sánh khác, chúng tôi thiết lập các tham số giống trong các bài báo đã công bố.

Đối với mô hình được lựa chọn thử nghiệm, các ảnh đầu vào được điều chỉnh về cùng kích thước 256x256 pixel với số kênh là 3, và được chuẩn hóa về khoảng [-1,1]. Bản đồ đặc trưng F có kích thước 32x32 pixels, và số kênh là 512. Mô-đun bộ nhớ có $N = 10$ mục bộ nhớ, mỗi mục có độ dài 512. Giá trị batch size là 4 và số lượng vòng lặp là 60 với các tập dữ liệu ped2, avenue. Thuật toán tối ưu (optimizer) được sử dụng là Adam với hệ số học là 0.0002. Các tham số trong hàm mất mát được thiết lập như sau: $\sigma_c = 0.01$, $\sigma_s = 0.01$, $r = 1.0$. Chúng tôi huấn luyện mạng autoencoder có bộ nhớ, trong đó xác suất p được thiết lập bằng 0.01 tương ứng với các tập dữ liệu ped2, avenue.

5. Kết quả

Độ đo hiệu suất AUC mức khung hình được lựa chọn là tiêu chuẩn để đánh giá phương pháp của chúng tôi trên các tập kiểm tra. Giá trị AUC càng cao thì kết quả thực thi càng được đánh giá tốt.

Trong bảng 1, chúng tôi so sánh mô hình MAAE-PA với các loại dữ liệu giả bất thường khác nhau, cùng với mô hình gốc (baseline) MNAD[22]. Giá trị AUC nhận được từ MAAE-PA khi áp dụng 2 loại dữ liệu giả bất thường là skip frames và key frames cao hơn giá trị AUC của mô hình gốc MNAD trên cả 2 tập ped2 và avenue. Cụ thể, mô hình MAAE-PA với giả bất thường skip frames cho giá trị AUC cao hơn mô hình gốc là 1,54% và 0.08%, còn MAAE-PA với giả bất thường key frames cho giá trị AUC cao hơn mô hình gốc là 1,15% và 0.2% tương ứng trên 2 tập ped2 và avenue. Lý do các kết quả AUC của MAAE-PA nhận được cao hơn MNAD bởi vì các dữ liệu giả bất thường skip frames và key frames thể hiện các đặc trưng bất thường về mặt vận tốc, mà đây là loại bất thường phổ biến trong tập test của 2 tập ped2 và avenue. Tuy nhiên, các loại dữ liệu giả bất thường như noise, repeat frames, patch làm cho giá

trị AUC của mô hình MAAE-PA kém đi, có thể nhận thấy rằng các loại bất thường này không phù hợp khi áp dụng lên mô hình gốc.

Bảng 1. So sánh MAAE-PA với hai phương pháp MemAE, MNAD có sử dụng bộ nhớ. Giá trị được bôi đậm thể hiện cho kết quả tốt hơn mô hình gốc (baseline)

Tên mô hình	ped2	avenue
MNAD[22] (baseline) retrained	96.97%	86.98%
MAAE-PA w/ noise	94.54%	86,81%
MAAE-PA w/ repeat frames	89.28%	71.79%
MAAE-PA w/ patch	94.12%	80.7%
MAAE-PA w/ skip frames	**98.51%**	**87.04%**
MAAE-PA w/ key frames	**98.12%**	**87.18%**

Tiếp theo, chúng tôi so sánh mô hình MAAE-PA sử dụng skip frames và key frames với một số mô hình có sử dụng các bộ sinh giả bất thường khác là OG[27], FastAno[21] và LNTRA[34]. Kết quả được thế hiện ở *Bảng 2*, chỉ ra rằng trên tập ped2 giá trị AUC của MAAE-PA với skip frames cao hơn các phương pháp OG[27], FastAno[21], LNTRA[34] tương ứng là 0.41%, 2.21%, 2.01%. Trong khi đó, trên tập avenue giá trị AUC của MAAE-PA với key frames cao hơn các phương pháp FastAno[21], LNTRA[34] tương ứng là 1.88% và 2.51%.

Kết quả trên đã thể hiện được rằng phương pháp áp dụng các tập dữ liệu giả bất thường liên quan đến đặc trưng về mặt vận tốc là có hiệu quả trong việc cải thiện khả năng phát hiện bất thường của mạng.

Bảng 2. So sánh MAAE-PA với các phương pháp sinh dữ liệu giả bất thường khác. Giá trị được bôi đậm có gạch chân thể hiện cho kết quả tốt nhất.

Tên mô hình	ped2	avenue
OG[27]	98,10%	-
FastAno[21]	96.30%	85,30%
LNTRA[34]	96.50%	84,67%
MAAE-PA w/ skip frames	**98.51%**	87.04%
MAAE-PA w/ key frames	98.12%	**87.18%**

6. Kết luận và hướng phát triển tiếp theo

Mô hình MAAE-PA được đề xuất là một mô hình autoencoder có bộ nhớ, có sử dụng bộ sinh giả bất thường liên quan đến các đặc trưng về mặt vận tốc (skip frames và key frames) trong quá trình huấn luyện, đã cải thiện được độ chính xác để phát hiện các sự kiện bất thường trong video so với một số mô hình đã được đề xuất gần đây. Tuy nhiên, mô hình này có thể được cải tiến thêm thông qua một số hướng phát triển như sau: phát triển các bộ sinh giả bất thường khác có khả năng sinh ra các khung hình bất thường cả về mặt ngoại hình và chuyển động của đối tượng; phát triển các mô hình autoencoder có nhiều tầng bộ nhớ với khả năng ghi nhớ các đặc trưng bình thường tốt hơn; phát triển các mô hình có sử dụng cơ chế attention để nâng cao sự tập trung của mô hình đối với các đối tượng.

Tham khảo

[1] Marcella Astrid, Muhammad Zaigham Zaheer, and Seung-Ik Lee. 2021. Synthetic temporal anomaly guided end-to-end video anomaly detection. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 207–214.

[2] Yunpeng Chang, Zhigang Tu, Wei Xie, and Junsong Yuan. 2020. Clustering driven deep autoencoder for video anomaly detection. In European Conference on Computer Vision. Springer, 329–345.

[3] Yong Shean Chong and Yong Haur Tay. 2017. Abnormal event detection in videos using spatiotemporal autoencoder. In International symposium on neural networks. Springer, 189–196.

[4] Marcella Cornia, Matteo Stefanini, Lorenzo Baraldi, and Rita Cucchiara. 2020. Meshed-memory transformer for image captioning. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 10578–10587.

[5] Keval Doshi and Yasin Yilmaz. 2021. Online anomaly detection in surveillance videos with asymptotic bound on false alarm rate. Pattern Recognition 114 (2021), 107865.

[6] Keval Doshi and Yasin Yilmaz. 2022. Rethinking video anomaly detection-a continual learning approach. In Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision. 3961–3970.

[7] Zhiwen Fang, Joey Tianyi Zhou, Yang Xiao, Yanan Li, and Feng Yang. 2020. Multiencoder towards effective anomaly detection in videos. IEEE Transactions on Multimedia 23 (2020), 4106–4116.

[8] Zhengcong Fei. 2021. Memory-augmented image captioning. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Vol. 35. 1317–1324.

[9] Dong Gong, Lingqiao Liu, Vuong Le, Budhaditya Saha, Moussa Reda Mansour, Svetha Venkatesh, and Anton van den Hengel. 2019. Memorizing normality to detect anomaly: Memory-augmented deep autoencoder for unsupervised anomaly detection. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 1705–1714.

[10] Ian Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, and Yoshua Bengio. 2014. Generative adversarial nets. Advances in neural information processing systems 27 (2014).

[11] Junzhong Ji, Cheng Xu, Xiaodan Zhang, Boyue Wang, and Xinhang Song. 2020. Spatio-temporal memory attention for image captioning. IEEE Transactions on Image Processing 29 (2020), 7615–7628.

[12] Weixin Li, Vijay Mahadevan, and Nuno Vasconcelos. 2013. Anomaly detection and localization in crowded scenes. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 36, 1 (2013), 18–32.

[13] Jingxu Lin, Sheng-hua Zhong, and Ahmed Fares. 2022. Deep hierarchical LSTM networks with attention for video summarization. Computers & Electrical Engineering 97 (2022), 107618.

[14] Wen Liu, Weixin Luo, Dongze Lian, and Shenghua Gao. 2018. Future frame prediction for anomaly detection–a new baseline. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 6536–6545.

[15] Zhian Liu, Yongwei Nie, Chengjiang Long, Qing Zhang, and Guiqing Li. 2021. A hybrid video anomaly detection framework via memory-augmented flow reconstruction and flow-guided frame prediction. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 13588–13597.

[16] Cewu Lu, Jianping Shi, and Jiaya Jia. 2013. Abnormal event detection at 150 fps in matlab. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2720–2727.

[17] Yiwei Lu, K Mahesh Kumar, Seyed shahabeddin Nabavi, and Yang Wang. 2019. Future frame prediction using convolutional VRNN for anomaly detection. In 2019. 16Th IEEE international conference on advanced video and signal based surveillance (AVSS). IEEE, 1–8.

[18] Weixin Luo, Wen Liu, and Shenghua Gao. 2017. A revisit of sparse coding based anomaly detection in stacked rnn framework. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 341–349.

[19] Rashmika Nawaratne, Damminda Alahakoon, Daswin De Silva, and Xinghuo Yu. 2019. Spatiotemporal anomaly detection using deep learning for real-time video surveillance. IEEE Transactions on Industrial Informatics 16, 1 (2019), 393–402.

[20] Trong-Nguyen Nguyen and Jean Meunier. 2019. Anomaly detection in video sequence with appearance-motion correspondence. In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. 1273–1283.

[21] Chaewon Park, MyeongAh Cho, Minhyeok Lee, and Sangyoun Lee. 2022. FastAno: Fast anomaly detection via spatio-temporal patch transformation. In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. 2249–2259.

[22] Hyunjong Park, Jongyoun Noh, and Bumsub Ham. 2020. Learning memoryguided normality for anomaly detection. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 14372–14381.

[23] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox. 2015. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. Springer, 234–241.

[24] Junbo Wang, Wei Wang, Zhiyong Wang, Liang Wang, Dagan Feng, and Tieniu Tan. 2019. Stacked memory network for video summarization. In Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia. 836–844.

[25] Hao Wei, Kai Li, Haichang Li, Yifan Lyu, and Xiaohui Hu. 2019. Detecting video anomaly with a stacked convolutional LSTM framework. In International Conference on Computer Vision Systems. Springer, 330–342.

[26] Yu Xie, Yanwei Fu, Ying Tai, Yun Cao, Junwei Zhu, and Chengjie Wang. 2022. Learning To Memorize Feature Hallucination for One-Shot Image Generation. In roceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 9130–9139.

[27] Muhammad Zaigham Zaheer, Jin-ha Lee, Marcella Astrid, and Seung-Ik Lee. 2020. Old is gold: Redefining the adversarially learned one-class classifier training paradigm. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 14183–14193.

[28] Bin Zhao, Haopeng Li, Xiaoqiang Lu, and Xuelong Li. 2021. Reconstructive sequence-graph network for video summarization. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 44, 5 (2021), 2793–2801.

[29] Wentian Zhao, Xinxiao Wu, and Xiaoxun Zhang. 2020. MemCap: Memorizing style knowledge for image captioning. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Vol. 34. 12984–12992.

[30] Joey Tianyi Zhou, Le Zhang, Zhiwen Fang, Jiawei Du, Xi Peng, and Yang Xiao. 2019. Attention-driven loss for anomaly detection in video surveillance. IEEE transactions on circuits and systems for video technology 30, 12 (2019), 4639–4647.

[31] Minfeng Zhu, Pingbo Pan, Wei Chen, and Yi Yang. 2019. Dm-gan: Dynamic memory generative adversarial networks for text-to-image synthesis. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 5802–5810.

[32] Z. Liu, Y. Nie, C. Long, Q. Zhang, and G. Li, “A hybrid video anomaly detection framework via memory-augmented flow reconstruction and flow-guided frame prediction,” in Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 13588–13597, 2021.

[33] Dosovitskiy, Alexey, Philipp Fischer, Eddy Ilg, Philip Hausser, Caner Hazirbas, Vladimir Golkov, Patrick Van Der Smagt, Daniel Cremers, and Thomas Brox. "Flownet: Learning optical flow with convolutional networks." In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp. 2758-2766. 2015.

[34] M. Astrid, M. Z. Zaheer, J.-Y. Lee, and S.-I. Lee, “Learning not to reconstruct anomalies,” arXiv preprintar Xiv:2110.09742, 2021.

[35] Astrid, Marcella, Muhammad Zaigham Zaheer, and Seung-Ik Lee. "Pseudobound: Limiting the anomaly reconstruction capability of one-class classifiers using pseudo anomalies." *Neurocomputing* 534 (2023): 147-160.

[36] Le, Anh, et al. "Detecting anomalies in videos using memory-augmented autoencoder with key-frame selection." *Journal of Science and Technique-Section on Information and Communication Technology* 13.01 (2024).

Investigating the impact of some types of pseudo-anomaly data on an autoencoder model in anomaly detection in video

Abstract: *Anomaly detection in videos is a significant problem that has attracted the attention of many researchers in recent years. Solving this problem is a major challenge due to the various types of anomalies that can occur, which are often difficult to collect for training purposes. To address the issue of data scarcity, several methods for generating pseudo anomalies have been proposed to enhance the detection capabilities for different types of anomalies in videos. In the paper, we implemented and tested several types of synthetic anomaly samples and used them to train an autoencoder model named MNAD to assess the impact of each type on the model's anomaly detection performance. The experiments conducted on video datasets yielded promising results.*

Keywords: Video Anomaly Detection (VAD), autoencoder, pseudo-anomaly synthesizer.

❑

Đánh giá một số hướng tiếp cận mạng đồ thị cho bài toán phân loại nhãn của các nút trong mạng đồ thị

Nguyễn Trọng Huyền Anh[1*], Nguyễn Chí Công[1], Phan Việt Anh[1]

[1]*Viện Công nghệ thông tin và truyền thông, Học viện Kỹ thuật quân sự*

Tóm tắt

Với sự phát triển mạnh mẽ của mạng xã hội, vấn đề tài khoản giả mạo ngày càng trở nên nghiêm trọng, ảnh hưởng đến sự an toàn thông tin và trải nghiệm người dùng. Các tài khoản giả mạo thường được sử dụng để thực hiện các hành vi như phát tán tin giả, thao túng dư luận, hoặc thực hiện các hành vi gian lận tài chính. Trong bối cảnh đó, việc phát hiện tài khoản giả mạo không chỉ là một bài toán kỹ thuật mà còn là một thách thức quan trọng trong bảo mật và quản lý mạng xã hội. Bài báo này đề xuất sử dụng các mô hình mạng đồ thị (Graph Neural Networks - GNN) để phát hiện tài khoản giả mạo, tận dụng cấu trúc liên kết giữa các tài khoản và các đặc trưng của nút trong đồ thị mạng xã hội. Đồ thị được xây dựng với các tài khoản là các nút và các mối quan hệ giữa chúng (kết bạn, theo dõi) là các cạnh. Các mô hình như Graph Convolutional Network (GCN) [1], Graph Attention Network (GAT) [2], Variational Graph Autoencoder (VGAE) [3], và GraphSAGE [4] được triển khai để học biểu diễn tiềm ẩn của các tài khoản, từ đó phân loại chúng thành tài khoản thật hoặc giả mạo. Điểm nổi bật của nghiên cứu là đánh giá hiệu quả của các mô hình trong bối cảnh dữ liệu có nhãn, một tình huống phổ biến trong thực tế. Các mô hình được thử nghiệm trên dữ liệu với tỷ lệ thiếu nhãn khác nhau (từ 0% đến 90%) nhằm kiểm tra khả năng của chúng trong việc phát hiện tài khoản giả mạo dựa vào thông tin cấu trúc đồ thị và đặc trưng nút. Kết quả thực nghiệm cho thấy các mô hình mạng đồ thị, đặc biệt là GCN và VGAE, có khả năng phát hiện tài khoản giả mạo hiệu quả, ngay cả trong trường hợp thiếu hụt dữ liệu gán nhãn. Nghiên cứu này không chỉ khẳng định tiềm năng của GNNs trong bài toán phát hiện tài khoản giả mạo mà còn mở ra hướng đi mới trong việc ứng dụng học sâu trên đồ thị cho các bài toán bảo mật mạng xã hội và phân tích hành vi người dùng.

Từ khóa: *Mạng nơ-ron đồ thị, phân loại nhãn nút.*

1. Đặt vấn đề

Trong thời đại kỹ thuật số ngày nay, sự gia tăng không ngừng của các nền tảng mạng xã hội và dịch vụ trực tuyến đã mở ra những cơ hội lớn trong việc kết nối và tương tác. Tuy nhiên, cùng với đó là sự xuất hiện ngày càng phổ biến của các tài khoản giả mạo, gây ra những mối đe dọa nghiêm trọng cho bảo mật, quyền riêng tư và tính toàn vẹn của các hệ thống trực tuyến. Các tài khoản giả mạo có thể được sử dụng để phát tán thông tin sai lệch, thực hiện hành vi gian lận, tấn công mạng, và làm suy giảm niềm tin vào các nền tảng số.

Phát hiện tài khoản giả mạo đã trở thành một bài toán quan trọng trong lĩnh vực bảo mật và phân tích dữ liệu. Mặc dù đã có nhiều phương pháp truyền thống như dựa vào quy tắc hoặc phân tích thống kê [5], chúng thường gặp hạn chế về khả năng thích ứng với các hành vi tinh vi và biến đổi không ngừng của các tác nhân xấu. Gần đây, sự phát triển của các thuật toán học máy và mạng nơ-ron đã mang đến những triển vọng mới trong việc xây dựng các hệ thống phát hiện tự động và hiệu quả.

Trong bài báo này, chúng tôi tập trung vào bài toán phát hiện tài khoản giả mạo, phân tích các đặc điểm chính của tài khoản giả mạo và các thách thức trong việc nhận diện chúng. Chúng tôi thử nghiệm một phương pháp [1-4] tiếp cận sử dụng mạng nơ-ron đồ thị (Graph Neural Networks - GNNs) [6] để phát hiện tài khoản giả mạo, tận dụng các mối quan hệ giữa các tài khoản cũng như các dấu hiệu hành vi bất thường. Ngoài ra, chúng tôi thực hiện đánh giá trên [tập dữ liệu cụ thể và so sánh phương pháp của chúng tôi với các kỹ thuật hiện có để chứng minh hiệu quả và tính ứng dụng của nó.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày các nghiên cứu liên quan. Mục 3 giới thiệu phương pháp được đề xuất. Mục 4 mô tả tập dữ liệu và cách thức thực nghiệm. Kết quả và thảo luận được trình bày ở Mục 5.

2. Các nghiên cứu liên quan

Các phương pháp truyền thống để phát hiện tài khoản giả mạo chủ yếu dựa trên các quy tắc được xác định thủ công hoặc phân tích thống kê. Ví dụ, việc sử dụng các chỉ số như số lượng bạn bè, tần suất đăng bài, hoặc thông tin hồ sơ đã được áp dụng để xác định các tài khoản có hành vi bất thường. Tuy nhiên, các phương pháp này thường gặp hạn chế về khả năng thích nghi khi các tác nhân xấu thay đổi chiến thuật để tránh bị phát hiện.

Học máy đã trở thành một công cụ quan trọng trong việc phát hiện tài khoản giả mạo nhờ khả năng phân tích dữ liệu phức tạp và nhận diện các mẫu bất thường. Các nghiên cứu như [1] và [2] sử dụng các thuật toán học máy như SVM, Random Forest hoặc Gradient Boosting để xây dựng các mô hình phát hiện. Tuy nhiên, một số mô hình chỉ tập trung vào đặc điểm cá nhân của tài khoản, không tận dụng được thông tin về mối quan hệ giữa các tài khoản.

Sự xuất hiện của mạng nơ-ron sâu đã mang lại những tiến bộ đáng kể. Các mô hình như LSTM và CNN đã được sử dụng để phát hiện các chuỗi hành vi bất thường hoặc phân tích nội dung do tài khoản đăng tải [3]. Tuy nhiên, các mô hình này thường bỏ qua cấu trúc mạng xã hội, một yếu tố quan trọng trong việc nhận diện các tài khoản giả mạo.

Gần đây, mạng nơ-ron đồ thị GNN đã chứng tỏ tiềm năng vượt trội trong việc xử lý dữ liệu liên quan đến cấu trúc đồ thị. Các nghiên cứu đã áp dụng GNN để mô hình hóa mối quan hệ giữa các tài khoản và phát hiện các nhóm tài khoản có hành vi bất thường. GNN không chỉ xem xét các đặc điểm cá nhân mà còn tận dụng các mối quan hệ để cải thiện hiệu suất phát hiện.

Tài khoản giả mạo thường có các đặc điểm bất thường như: Hồ sơ không đầy đủ, thông tin cá nhân thiếu hoặc không nhất quán. Hành vi phi tự nhiên như tần suất hoạt động cao hoặc hành vi đồng bộ với các tài khoản khác và quan hệ bất thường, kết nối đến nhiều tài khoản khả nghi hoặc các nhóm độc hại.

Dữ liệu mạng xã hội có cấu trúc đồ thị tự nhiên, trong đó các tài khoản là nút và các mối quan hệ (kết bạn, theo dõi) là cạnh. Cấu trúc này cung cấp thông tin phong phú để phân tích hành vi của tài khoản thông qua: Tính chất nút (Node Attributes): Thông tin hồ sơ hoặc hoạt động của tài khoản. Tính chất cạnh (Edge Attributes): Tính chất của mối quan hệ như thời gian kết bạn hoặc mức độ tương tác. Đồ thị con (Subgraph): Các mẫu nhỏ trong đồ thị có thể biểu thị hành vi bất thường, chẳng hạn như các nhóm tài khoản đồng bộ.

GNN là một công cụ mạnh mẽ để phân tích dữ liệu có cấu trúc đồ thị. GNN hoạt động bằng cách tích hợp thông tin từ các nút và các cạnh lân cận, cho phép học biểu diễn đồ thị toàn diện. Các biến thể phổ biến của GNN bao gồm: GCN, GAT, GraphSAGE. Các mô hình GNN có thể được sử dụng để phân tích cấu trúc mạng xã hội nhằm phát hiện các tài khoản giả mạo thông qua: Học đặc trưng nút: Kết hợp thông tin từ các tài khoản lân cận. Phân cụm hành vi bất thường: Phát hiện các nhóm tài khoản có hành vi tương đồng đáng ngờ. Dự đoán liên kết bất thường: Xác định các mối quan hệ không tự nhiên giữa các tài khoản.

3. Phương pháp

Phát hiện tài khoản giả mạo là một bài toán phân loại nút trong đồ thị, trong đó các nút đại diện cho tài khoản và các cạnh đại diện cho mối quan hệ giữa các tài khoản. Để giải quyết bài toán này, chúng tôi áp dụng ba kiến trúc mạng đồ thị phổ biến: GCN, GAT, và GraphSAGE. Các mô hình này tận dụng thông tin từ cả đặc trưng của các nút (ví dụ: hồ sơ, hành vi hoạt động) và cấu trúc đồ thị (ví dụ: mối quan hệ giữa các tài khoản) để xây dựng biểu diễn học sâu, từ đó dự đoán khả năng một tài khoản là giả mạo hay không.

3.1. Cấu trúc đồ thị

Chúng tôi biểu diễn mạng xã hội dưới dạng một đồ thị $G = (V, E)$, trong đó:

- V là tập hợp các nút, mỗi nút $v \in V$ đại diện cho một tài khoản.
- E là tập hợp các cạnh, mỗi cạnh $e \in E$ đại diện cho mối quan hệ giữa hai tài khoản.
- Đặc trưng nút (X) : Vector đặc trưng của mỗi nút bao gồm thông tin nút:
- Số lượng bạn bè.
- Tần suất đăng bài.
- Tỷ lệ tương tác với các tài khoản khác.
- Đặc trưng cạnh: Tính chất của mối quan hệ, chẳng hạn như thời gian kết nối hoặc số lượng tương tác giữa hai nút.

3.2. Graph Convolutional Network (GCN)

GCN hoạt động bằng cách tích hợp thông tin từ các nút lân cận thông qua phép tích chập trên đồ thị. Biểu diễn nút được cập nhật bằng công thức:

$$H^{(l+1)} = \sigma\left(D^{\tilde{}-1/2} A^{\tilde{}} D^{\tilde{}-1/2} H^{(l)} W^{(l)}\right)$$

Trong đó:

- $A^{\tilde{}}$ là ma trận kề với phần tử chéo được chuẩn hóa.
- $D^{\tilde{}}$ là ma trận bậc nút.
- $H^{(l)}$ là biểu diễn nút ở lớp l.
- $W^{(l)}$ là ma trận trọng số học được ở lớp l.
- σ là hàm kích hoạt (ReLU).

GCN giúp mô hình hóa thông tin từ các nút lân cận và truyền tải đặc trưng qua nhiều lớp.

3.3. Graph Attention Network (GAT)

GAT sử dụng cơ chế chú ý để gán trọng số khác nhau cho các nút lân cận dựa trên mức độ quan trọng của chúng. Biểu diễn nút được cập nhật bằng công thức:

$$h_i^{(l+1)} = \sigma\left(\sum_{j \in N(i)} \alpha_{ij}^{(l)} W^{(l)} h_j^{(l)}\right)$$

Trong đó:

- $\alpha_{ij}^{(l)}$ là trọng số chú ý giữa nút i và j, được tính bằng softmax trên điểm tương tự giữa hai nút.
- $N(i)$ là tập các nút lân cận của i.
- $W^{(l)}$ là ma trận trọng số của lớp l.

Cơ chế chú ý cho phép GAT tập trung vào các nút lân cận quan trọng, tăng khả năng phân biệt của mô hình.

3.4. GraphSAGE

GraphSAGE sử dụng phương pháp lấy mẫu để tổng hợp thông tin từ một tập con các nút lân cận, giúp mô hình có thể mở rộng tốt trên các đồ thị lớn. Biểu diễn nút được cập nhật bằng công thức:

$$h_i^{(l+1)} = \sigma\left(W^{(l)} \cdot AGGREGATE\left(\left\{h_j^{(l)}, \forall j \in N(i)\right\}\right)\right)$$

Trong đó:

- AGGREGATE là hàm tổng hợp, chẳng hạn như trung bình, tổng hoặc LSTM.

- $W^{(l)}$ là ma trận trọng số của lớp l.

GraphSAGE giúp mô hình tận dụng thông tin từ lân cận một cách hiệu quả và linh hoạt.

3.5. VGAE

VGAE là một phương pháp học không giám sát dựa trên Autoencoder biến phân (Variational Autoencoder - VAE), được thiết kế đặc biệt để xử lý dữ liệu đồ thị. Mô hình này học biểu diễn tiềm ẩn cho các nút trong đồ thị, cho phép tái tạo lại cấu trúc đồ thị hoặc thực hiện các nhiệm vụ như phát hiện bất thường và dự đoán liên kết.

Dữ liệu đầu vào:

Ma trận đặc trưng nút X : Đặc trưng của mỗi nút trong đồ thị.

Ma trận kề A : Biểu diễn cấu trúc đồ thị, trong đó $A_{ij} = 1$ nếu có cạnh giữa nút i và j, ngược lại $A_{ij} = 0$.

Encoder:

Encoder ánh xạ các đặc trưng đầu vào của nút sang không gian tiềm ẩn.

VGAE sử dụng mạng tích chập trên đồ thị GCN để xử lý dữ liệu đồ thị, mô hình hóa cả đặc điểm của nút và mối quan hệ giữa các nút.

Kết quả của Encoder là một phân phối xác suất Gaussian:

$$q(z \mid X, A) = \mathcal{N}(z \mid \mu, \sigma^2)$$

trong đó: μ là vector trung bình học được từ GCN; σ là độ lệch chuẩn, cũng được học từ GCN.

Latent Space (Không gian tiềm ẩn):

Các biểu diễn tiềm ẩn z của các nút được lấy mẫu từ phân phối Gaussian $q(z \mid X, A)$.

Không gian này lưu trữ thông tin kết hợp từ đặc điểm nút và cấu trúc đồ thị, giúp phát hiện các mẫu bất thường hoặc mối quan hệ tiềm năng.

Decoder:

Decoder tái tạo lại đồ thị từ các biểu diễn tiềm ẩn z.

VGAE sử dụng xác suất liên kết giữa hai nút i và j được tính bởi tích vô hướng:

$$\hat{A}_{ij} = \sigma\left(z_i^T z_j\right)$$

trong đó σ là hàm sigmoid để chuẩn hóa kết quả.

Ma trận tái tạo $\hat{A}$ được so sánh với ma trận kề ban đầu A để đánh giá chất lượng mô hình.

Hàm mất mát:

Hàm mất mát của VGAE kết hợp hai thành phần:

- Mất mát tái tạo (Reconstruction Loss): So sánh ma trận kề gốc A và ma trận tái tạo $\hat{A}$.

$$\mathcal{L}_{rec} = -\sum_{i,j} A_{ij} \log \hat{A}_{ij} + \left(1 - A_{ij}\right) \log\left(1 - \hat{A}_{ij}\right)$$

- Mất mát KL-divergence: Đảm bảo phân phối tiềm ẩn $q(z \mid X, A)$ gần với phân phối chuẩn Gaussian $p(z)$:

$$\mathcal{L}_{KL} = D_{KL}(q(z \mid X, A) \parallel p(z))$$

- Tổng hàm mất mát:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{rec} + \mathcal{L}_{KL}$$

3.6. Phát hiện tài khoản giả mạo

Phương pháp sử dụng mạng đồ thị để phân loại tài khoản giả mạo dựa trên việc biểu diễn dữ liệu dưới dạng đồ thị, nơi mỗi nút đại diện cho một tài khoản và các cạnh biểu thị mối quan hệ hoặc tương tác giữa các tài khoản. Để khai thác thông tin cấu trúc và thuộc tính của mạng, các mô hình học sâu trên đồ thị như GCN, GAT, VGAE, và GraphSAGE được áp dụng.

Tập dữ liệu được chuyển đổi thành đồ thị, trong đó mỗi tài khoản được biểu diễn bằng một nút, và các mối quan hệ (ví dụ: tên miền, múi giờ, ngôn ngữ, …) được biểu diễn bằng các cạnh. Mỗi nút được gán một vector đặc trưng chứa thông tin như thông tin hồ sơ, hành vi hoạt động, hoặc siêu dữ liệu.

GCN tổng hợp thông tin từ các nút lân cận thông qua các lớp tích chập trên đồ thị, giúp mô hình học được thông tin cục bộ và toàn cục của mạng. GAT tập trung vào các mối quan hệ quan trọng bằng cách sử dụng cơ chế chú ý, cho phép mô hình đánh trọng số khác nhau cho các cạnh. VGAE: tận dụng phương pháp học không giám sát để trích xuất biểu diễn nút, đồng thời phát hiện các cấu trúc bất thường tiềm ẩn trong đồ thị. GraphSAGE: Áp dụng phương pháp lấy mẫu và tổng hợp thông tin từ các hàng xóm, giúp giảm chi phí tính toán trong các đồ thị lớn.

Biểu diễn nút học được từ các mô hình trên được sử dụng làm đầu vào cho một lớp phân loại. Lớp này dự đoán xác suất một tài khoản là giả mạo dựa trên đặc điểm và mối quan hệ của nó trong mạng.

4. Thực nghiệm

4.1. Dữ liệu

Trong bài báo, dữ liệu được sử dụng được Nagariya và cộng sự [8] thu thập trực tuyến từ các trang web nổi tiếng là Kaggle và GitHub. Dữ liệu này thường bao gồm thông tin về các tài khoản người dùng trên mạng xã hội, bao gồm các thuộc tính như: tên, số lượng người theo dõi, số lượng bạn bè, địa chỉ trang web, ngôn ngữ, … Một điểm quan trọng là các mối quan hệ giữa các tài khoản được biểu diễn dưới dạng đồ thị, trong đó các nút đại diện cho tài khoản và các cạnh biểu thị mối quan hệ (chung tên miền từ địa chỉ trang web, múi giờ giống nhau).

Tập dữ liệu bao gồm 2 tập với 1482 dữ liệu người dùng thật và 1338 dữ liệu giả mạo. Trong quá trình thực nghiệm tập dữ liệu được chia làm 3 tập train, test, validation với tỉ lệ lần lượt là 70% train, 10% validation, 20% test. Quá trình này được thực hiện 5 lần để đảm bảo tính khách quan.

4.2. Thực nghiệm và kết quả

Đối với GCN, xây dựng hai lớp tích chập đồ thị với 128 và 64 bộ lọc tương ứng. Hai lớp này đóng vai trò tương tự bộ mã hóa (encoder) trong VGAE. Đầu ra của các lớp tích chập đồ thị được sử dụng để dự đoán nhãn của một liên kết giữa hai nút, tương tự như bộ giải mã (decoder). Đối với GraphSAGE, trước tiên triển khai mô-đun SAGE như được mô tả trong Mục 3.4, sau đó xây dựng mô-đun giống encoder cho mô hình dự đoán liên kết GraphSAGE bằng cách sử dụng hai lớp SAGE, mỗi lớp có 64 kênh ẩn. Đối với GAT, xây dựng hai lớp chú ý đồ thị (graph attention), với một hàm phi tuyến ReLU ở giữa. Lớp đầu tiên sử dụng cơ chế chú ý đa đầu với 8 đầu, mỗi đầu gồm 8 bộ lọc và có tỷ lệ dropout là 0.6, trong khi lớp chú ý đồ thị thứ hai có một đầu chú ý duy nhất với 16 bộ lọc. Đối với VGAE, định nghĩa bộ mã hóa (encoder) gồm một lớp tích chập đồ thị ẩn với 32 bộ lọc, tiếp theo là hai lớp tích chập đồ thị đại diện cho giá trị trung bình và độ lệch chuẩn logarit của phân phối chuẩn tiềm ẩn (theo [7]). Kích thước không gian tiềm ẩn được đặt là 16. Hàm mất mát được tối ưu hóa là tổng của mất mát tái tạo và mất mát KL-divergence.

Bảng 1. So sánh độ chính xác trung bình của tập test cho các mô hình GNN với tỉ lệ % dữ liệu có nhãn được sử dụng

Thuật toán	Tỉ lệ % dữ liệu có nhãn được sử dụng				
	100%	**90%**	**80%**	**70%**	**60%**
GCN	0.9596±0.0175	0.9892±0.0056	0.9949±0.0067	0.9954±0.0048	0.9964±0.0080
GAT	0.9307±0.0205	0.9367±0.0151	0.9445±0.0206	0.8658±0.0260	0.9177±0.0141
VGAE	0.9881±0.0240	0.9881±0.0083	0.9909±0.0077	0.9907±0.0096	0.9913±0.1216
GraphSAGE	0.8887±0.0357	0.8101±0.0509	0.7364±0.0685	0.5728±0.0791	0.5462±0.0913
	Tỉ lệ % dữ liệu có nhãn được sử dụng				
	50%	**40%**	**30%**	**20%**	**10%**
GCN	0.9886±0.0069	0.9528±0.0135	0.9532±0.0210	0.9884±0.0167	0.9937±0.0405
GAT	0.9417±0.0230	0.9320±0.0163	0.9319±0.0169	0.8526±0.0318	0.9322±0.0155
VGAE	0.9908±0.1807	0.9914±0.1937	0.9752±0.1784	0.6621±0.1970	0.6636±0.2003
GraphSAGE	0.5575±0.1051	0.5706±0.1130	0.5794±0.0954	0.5993±0.1082	0.6034±0.1069

Trong phần thực nghiệm, các mô hình mạng đồ thị tiên tiến đã được áp dụng để phát hiện tài khoản giả mạo trên tập dữ liệu được chuẩn bị. Kết quả cho thấy các mô hình học sâu trên đồ thị đạt hiệu suất cao, minh chứng tiềm năng của phương pháp tiếp cận này.

Cụ thể, mô hình GCN đạt độ chính xác 0.9598, khẳng định khả năng tổng hợp thông tin từ các mối quan hệ trong đồ thị để phân loại chính xác. Mô hình GAT, với cơ chế chú ý để ưu tiên các liên kết quan trọng, đạt độ chính xác 0.9420. Mô hình VGAE thể hiện hiệu suất vượt trội với độ chính xác 0.9700, nhờ vào khả năng học biểu diễn hiệu quả cho các nút trong đồ thị. Trong khi đó, GraphSAGE, với phương pháp tổng hợp thông tin từ các hàng xóm, đạt độ chính xác 0.9000.

Kết quả này cho thấy sự khác biệt về hiệu suất giữa các mô hình, đồng thời nhấn mạnh ưu thế của VGAE trong việc phát hiện tài khoản giả mạo. Những mô hình này không chỉ đạt được độ chính xác cao mà còn minh họa được tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống bảo mật và phát hiện gian lận trực tuyến.

Kết quả thực nghiệm đánh giá hiệu suất của các mô hình mạng đồ thị (GCN, GAT, VGAE, GraphSAGE) trong việc phát hiện tài khoản giả mạo khi đối mặt với dữ liệu có tỷ lệ thiếu nhãn khác nhau, từ 0% đến 90%. Các chỉ số hiệu suất (độ chính xác) cho thấy sự ảnh hưởng rõ rệt của dữ liệu thiếu nhãn đến khả năng phân loại của từng mô hình:

GCN: Mô hình GCN đạt hiệu suất cao và ổn định ngay cả khi tỷ lệ thiếu nhãn tăng lên. Độ chính xác đạt đỉnh ở mức 0.9902 (30% thiếu nhãn) và duy trì trên 0.95 trong hầu hết các trường hợp, ngoại trừ tại 60% thiếu nhãn (0.9465). Điều này cho thấy GCN có khả năng tận dụng tốt thông tin từ đồ thị để bù đắp cho sự thiếu hụt nhãn.

GAT: Mô hình GAT cho thấy hiệu suất tương đối ổn định ở mức trung bình, với độ chính xác dao động trong khoảng 0.8995 đến 0.9420. Hiệu suất giảm nhẹ khi tỷ lệ thiếu nhãn tăng, nhưng mô hình vẫn duy trì được khả năng phân loại trong các trường hợp có ít nhãn.

VGAE: VGAE thể hiện hiệu suất vượt trội ở mức dữ liệu đầy đủ (0% thiếu nhãn) với độ chính xác 0.9700 và đạt đỉnh 0.9856 ở mức 20% thiếu nhãn. Tuy nhiên, hiệu suất giảm mạnh khi tỷ lệ thiếu nhãn vượt quá 40%, với độ chính xác thấp nhất là 0.7433 ở mức 90% thiếu nhãn.

VGAE phụ thuộc nhiều vào thông tin từ nhãn và gặp khó khăn trong việc duy trì hiệu suất khi dữ liệu nhãn giảm mạnh.

GraphSAGE: GraphSAGE có hiệu suất thấp nhất trong số các mô hình, với độ chính xác giảm mạnh khi tỷ lệ thiếu nhãn tăng lên. Tại mức 90% thiếu nhãn, độ chính xác là 0.7599, thấp hơn đáng kể so với các mô hình khác. Kết quả này cho thấy GraphSAGE gặp khó khăn trong việc khai thác thông tin từ đồ thị khi thiếu dữ liệu nhãn.

GCN và **VGAE** là hai mô hình nổi bật, với GCN cho thấy tính ổn định cao, trong khi VGAE đạt hiệu suất vượt trội ở mức thiếu nhãn thấp nhưng giảm mạnh ở mức thiếu nhãn cao. **GAT** duy trì hiệu suất ổn định nhưng không đạt mức độ chính xác cao như GCN hoặc VGAE. **GraphSAGE** kém hiệu quả hơn trong việc xử lý dữ liệu thiếu nhãn, đặc biệt ở mức thiếu nhãn cao.

Tuy nhiên, GCN chỉ xem xét thông tin lân cận trong một số lớp nhất định (thường là 2-3 layers), khó học được mối quan hệ xa hơn trong đồ thị. Dễ bị ảnh hưởng bởi các nút có kết nối mạnh nhưng không có giá trị thông tin cao. GAT tính toán phức tạp do sử dụng cơ chế attention trên toàn bộ đồ thị. Hiệu suất có thể giảm khi mạng xã hội có số lượng nút lớn. GraphSAGE còn phụ thuộc vào chiến lược lấy mẫu lân cận, có thể bỏ sót thông tin quan trọng nếu dữ liệu không được lấy mẫu hợp lý và không tận dụng đầy đủ cấu trúc toàn cục của đồ thị. VGAE là mô hình sinh (generative model), dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu trong dữ liệu huấn luyện. Việc tối ưu hóa hàm mất mát KL-divergence có thể khó khăn, đặc biệt trên dữ liệu mạng xã hội không đồng nhất.

5. Kết luận và thảo luận

Việc sử dụng các mô hình mạng đồ thị trong bài toán phát hiện tài khoản giả mạo đã chứng minh hiệu quả vượt trội nhờ khả năng khai thác cấu trúc liên kết và thông tin đặc trưng của các nút. GCN và VGAE đạt hiệu suất cao nhất trong việc phát hiện tài khoản giả mạo, với khả năng tận dụng tốt cả thông tin đặc trưng nút và cấu trúc đồ thị. GAT cho thấy sự ổn định khi xử lý dữ liệu thiếu nhãn nhờ cơ chế chú ý, nhưng không đạt hiệu suất cao như GCN hoặc VGAE. GraphSAGE thể hiện hạn chế trong bối cảnh dữ liệu thiếu nhãn lớn, điều này nhấn mạnh sự phụ thuộc của mô hình vào số lượng nhãn để tổng hợp thông tin hiệu quả.

Các mô hình như GCN và GAT có khả năng bù đắp sự thiếu hụt nhãn thông qua việc tận dụng thông tin từ hàng xóm. GAE, mặc dù xuất sắc với dữ liệu đầy đủ hoặc thiếu nhãn thấp, lại giảm hiệu suất đáng kể khi tỷ lệ thiếu nhãn cao, do phụ thuộc vào thông tin nhãn trong quá trình học không giám sát.

Khả năng kết hợp dữ liệu thuộc tính và cấu trúc liên kết mang lại lợi thế vượt trội trong bài toán phát hiện tài khoản giả mạo. Mạng đồ thị dễ dàng mở rộng để xử lý các loại quan hệ phức tạp hơn giữa các tài khoản, chẳng hạn như hành vi tương tác bất thường hoặc liên kết giả. Các đồ thị mạng xã hội lớn với hàng triệu nút và cạnh đòi hỏi giải pháp tối ưu hóa hiệu năng và giảm chi phí tính toán. Khi tỷ lệ nhãn thấp, hiệu suất của một số mô hình như VGAE giảm đáng kể, làm tăng yêu cầu về thiết kế mô hình mạnh mẽ hơn. Trong các môi trường thực tế, dữ liệu có thể bị nhiễu hoặc chứa thông tin giả, làm ảnh hưởng đến khả năng học của các mô hình đồ thị.

Tóm lại, mạng đồ thị là công cụ mạnh mẽ và có tiềm năng lớn trong việc phát hiện tài khoản giả mạo, nhưng cần tiếp tục cải thiện để xử lý các thách thức thực tế. Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc tối ưu hóa mô hình và khai thác dữ liệu hiệu quả hơn trong các môi trường mạng phức tạp.

Tài liệu tham khảo

1. Thomas N. Kipf & Max Welling (2016). Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. arXiv preprint arXiv:1609.02907.
2. Petar Veličković, Guillem Cucurull, Arantxa Casanova, Adriana Romero, Pietro Liò, Yoshua Bengio (2017). Graph Attention Network. arXiv preprint arXiv:1710.10903.
3. Thomas Kipf & Max Welling (2016). Variational Graph Auto-Encoders. NIPS 2016 Workshop on Bayesian Deep Learning.
4. William L. Hamilton, Rex Ying & Jure Leskovec (2017). Inductive Representation Learning on Large Graphs. NeurIPS 2017.
5. Adam Breuer (2020). Friend or Faux: Graph-Based Early Detection of Fake Accounts on Social Networks. arXiv preprint arXiv:2004.04834.
6. Franco Scarselli, Marco Gori, et al (2009). The Graph Neural Network Model. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009.
7. Thomas N Kipf and Max Welling. Variational graph autoencoders. arXiv preprint arXiv:1611.07308, 2016. 1, 3, 4.
8. Nagariya, H. G., Dhanotiya, N., Joshi, S., & Jain, S. (2021). Identifying Fake Profile in Online Social Network. In ACM Workshop on Advances in Computational Intelligence at ISIC.

An Evaluation of Graph Network Approaches for Node Label Classification in Graph-Structured Data

Abstract: *With the rapid growth of social networks, the issue of fake accounts has become increasingly severe, posing threats to information security and degrading user experience. Fake accounts are often used to spread misinformation, manipulate public opinion, or conduct financial fraud. In this context, detecting fake accounts is not only a technical challenge but also a crucial task in social network security and management. This paper proposes leveraging Graph Neural Networks (GNNs) to detect fake accounts by exploiting both the structural connections between accounts and node-level features in social network graphs. In the constructed graph, nodes represent user accounts and edges represent their relationships (e.g., friendships or follows). Several models including Graph Convolutional Network (GCN) [1], Graph Attention Network (GAT) [2], Variational Graph Autoencoder (VGAE) [3], and GraphSAGE [4] are implemented to learn latent representations of the nodes, enabling classification of accounts as genuine or fake. A key contribution of this study is the evaluation of these models under labeled-data scenarios, which are common in real-world applications. The models are tested on datasets with varying levels of label scarcity (from 0% to 90%) to assess their effectiveness in fake account detection based on graph structure and node attributes. Experimental results demonstrate that GNN-based models, particularly GCN and VGAE, are effective in identifying fake accounts even under severe label sparsity. This research not only highlights the potential of GNNs in fake account detection but also opens new directions for applying graph-based deep learning to social network security and user behavior analysis.*

Keywords: Graph Neural Networks, node label classification, fake account detection, social network security.

Đánh giá một số kỹ thuật học máy cho bài toán phát hiện tài khoản mạng xã hội giả mạo

Phan Trung Đức[1], Phan Việt Anh[1]

Viện Công nghệ thông tin và Truyền thông, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: ptd12965@gmail.com; Tel: 0703452019

Tóm tắt

Trong bối cảnh sự phát triển mạnh mẽ của mạng xã hội, vấn đề tài khoản giả mạo đã trở thành mối đe dọa nghiêm trọng với cộng đồng như lừa đảo trực tuyến, phát tán tin giả, và xâm phạm danh dự cá nhân. Việc phát hiện tài khoản giả mạo không chỉ giúp bảo vệ người dùng mà còn đảm bảo tính an toàn và minh bạch của các nền tảng trực tuyến. Nghiên cứu này khảo sát một số kỹ thuật học máy phổ biến cho phát hiện tài khoản giả mạo. Chúng tôi phân tích các đặc trưng của tài khoản mạng xã hội liên quan đến tính chất giả mạo. Sau đó, thử nghiệm các giải pháp học máy khác nhau bao gồm Artificial Neural Network (ANN), Decision Tree, Kmeans, Support Vector Machine (SVM), Extreme Gradient Boosting (XGB), và Random Forest để xây dựng bộ phát hiện. Kết quả nghiên cứu nhằm đánh giá khả năng áp dụng các phương pháp học máy trong việc phát hiện tài khoản mạng xã hội giả mạo. Từ đó giúp các nhà phát triển và quản lý nền tảng lựa chọn công nghệ phù hợp nhằm nâng cao độ an toàn và tin cậy của người dùng trên mạng xã hội

***Từ khóa**: Artificial Neural Network; Decision Tree; Support Vector Machine; Extreme Gradient Boosting; Kmeans; Random Forest; Fake account detection.*

1. Giới thiệu

Sự phát triển mạnh mẽ của các nền tảng mạng xã hội [1] đã tạo điều kiện cho sự gia tăng của tài khoản giả mạo, gây ra nhiều vấn đề nghiêm trọng như lan truyền thông tin sai lệch, lừa đảo trực tuyến, và xâm phạm quyền riêng tư. Tài khoản giả mạo có thể được sử dụng để thao túng dư luận, làm gián đoạn các chiến dịch quảng cáo hoặc thực hiện các hành vi lừa đảo có chủ đích [2]. Vì vậy, việc phát hiện tài khoản giả mạo không chỉ giúp bảo vệ người dùng mà còn nâng cao tính bảo mật và đảm bảo độ tin cậy của các nền tảng mạng xã hội.

Phát hiện tài khoản giả mạo là một bài toán khó khăn do các tài khoản này ngày càng tinh vi hơn trong việc mô phỏng hành vi của tài khoản thật. Các chiến thuật ngụy trang, chẳng hạn như tăng cường tương tác giả, sử dụng nội dung tự động hoặc sử dụng thông tin hồ sơ có vẻ hợp pháp, đã khiến các phương pháp phát hiện truyền thống trở nên kém hiệu quả. Điều này đòi hỏi các mô hình học máy phải có khả năng phân tích dữ liệu đa chiều, trích xuất thông tin quan trọng, và phân biệt các đặc trưng bất thường một cách chính xác.

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm phát hiện tài khoản mạng xã hội giả mạo, tập trung chủ yếu vào hai nhóm phương pháp chính: Dựa trên lựa chọn đặc trưng và giảm chiều dữ liệu. Nhóm phương pháp dựa trên lựa chọn đặc trưng khai thác các đặc điểm hành vi của người dùng, thông tin hồ sơ và tương tác mạng xã hội để xây dựng mô hình phân loại. Một số nghiên cứu đã áp dụng thuật toán học máy truyền thống như Naïve Bayes, Random Forest [8], và Support Vector Machine (SVM) [3], trong khi các phương pháp hiện đại hơn sử dụng kỹ thuật học sâu như mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) [5] để cải thiện độ chính xác.

Nhóm phương pháp dựa trên giảm chiều dữ liệu tập trung vào tối ưu hóa không gian đặc trưng bằng cách loại bỏ các đặc điểm dư thừa, từ đó giúp giảm chi phí tính toán và cải thiện hiệu suất mô hình. Các kỹ thuật phổ biến trong nhóm này bao gồm Principal Component

Analysis (PCA) và Linear Discriminant Analysis (LDA) [4], giúp lựa chọn những đặc trưng quan trọng nhất mà vẫn giữ nguyên khả năng phân biệt tài khoản thật và giả.

Mặc dù các phương pháp hiện tại trong việc phát hiện tài khoản giả mạo trên mạng xã hội, như lựa chọn đặc trưng và giảm chiều dữ liệu, đã đạt được những kết quả nhất định, nhưng vẫn tồn tại những hạn chế đáng kể. Cụ thể, các phương pháp dựa trên lựa chọn đặc trưng thường gặp khó khăn khi đối mặt với các tài khoản giả mạo sử dụng chiến lược ngụy trang tinh vi, làm giảm hiệu quả phân loại. Trong khi đó, các kỹ thuật giảm chiều dữ liệu có nguy cơ loại bỏ những đặc trưng quan trọng, dẫn đến mất mát thông tin cần thiết cho việc phân biệt giữa tài khoản thật và giả. Những hạn chế này nhấn mạnh sự cần thiết phải phát triển các phương pháp phát hiện tài khoản giả mạo tiên tiến hơn, có khả năng thích ứng với các chiến lược ngụy trang ngày càng tinh vi. Do đó, nghiên cứu này nhằm khảo sát và so sánh hiệu quả của các mô hình học máy trong việc phát hiện tài khoản mạng xã hội giả mạo, từ đó đề xuất giải pháp tối ưu, góp phần nâng cao độ chính xác và hiệu quả của hệ thống phát hiện trong bối cảnh các chiến lược ngụy trang ngày càng phức tạp.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng các mô hình học máy phổ biến, bao gồm Mạng Nơ-ron Nhân tạo (ANN) [5], Kmeans [7], Cây quyết định (Decision Tree) [6], SVM (Support Vector Machine) [10], XGBoost (XGB) [9], và Random Forest [8], để phát hiện tài khoản giả mạo. Mục tiêu của bài báo là đánh giá và so sánh hiệu quả của các mô hình này trong việc phát hiện tài khoản giả mạo và đưa ra các phương pháp cải thiện độ chính xác.

2. Xây dựng mô hình phát hiện tài khoản giả mạo

2.1. Trích xuất đặc trưng

Trong nghiên cứu này, các đặc trưng dữ liệu được lựa chọn nhằm phản ánh rõ rệt sự khác biệt giữa tài khoản mạng xã hội thật và tài khoản giả mạo [12]. Việc lựa chọn đặc trưng dựa trên cả tính chất thống kê của dữ liệu và khả năng phân biệt hiệu quả khi áp dụng vào các mô hình học máy [13]. Một số đặc trưng quan trọng được sử dụng bao gồm:

- *statuses_count:* Số lượng tweet mà người dùng đã đăng. Tài khoản thật thường có hoạt động liên tục và số lượng tweet đáng kể, trong khi tài khoản giả mạo có thể có số lượng tweet thấp hoặc hoạt động không đều đặn
- *followers_count:* Số lượng người theo dõi tài khoản. Tài khoản giả mạo thường có số lượng người theo dõi thấp.
- *favourites_count:* Số lượng tweet mà người dùng đã thích. Tài khoản thật thường thể hiện sự tương tác thông qua việc thích các tweet khác, trong khi tài khoản giả mạo có thể thiếu hoạt động này.
- *listed_count:* Số lần tài khoản được thêm vào danh sách bởi người dùng khác. Tài khoản thật, đặc biệt là những tài khoản có ảnh hưởng, thường được thêm vào nhiều danh sách, trong khi tài khoản giả mạo ít khi được thêm vào.
- *url:* Liên kết đến trang web cá nhân hoặc tổ chức trong hồ sơ người dùng. Sự hiện diện của URL có thể cho thấy mức độ xác thực cao hơn, trong khi tài khoản giả mạo thường không cung cấp thông tin này.
- *default_profile:* Chỉ báo xem tài khoản có sử dụng giao diện mặc định hay không. Tài khoản giả mạo thường không tùy chỉnh hồ sơ và giữ nguyên giao diện mặc định, trong khi tài khoản thật thường có sự cá nhân hóa

- *friends_count:* Số lượng người mà tài khoản đang theo dõi. Các tài khoản giả mạo thường có lượng người theo dõi thấp và tỷ lệ không cân xứng giữa số tài khoản theo dõi và số lượng người theo dõi.
- *geo_enabled:* Chỉ báo xem tài khoản có bật chức năng gắn thẻ địa lý hay không. Tài khoản thật thường bật chức năng này để chia sẻ vị trí, trong khi tài khoản giả mạo có thể tắt để ẩn danh
- *profile_background_tile:* Chỉ báo xem hình nền hồ sơ có được lặp lại theo dạng tile hay không. Tùy chỉnh này thể hiện mức độ cá nhân hóa của tài khoản, tài khoản thật thường có sự tùy chỉnh, trong khi tài khoản giả mạo thường giữ nguyên mặc định
- *profile_background_color:* Màu nền của hồ sơ người dùng. Sự thay đổi màu nền so với mặc định có thể cho thấy mức độ cá nhân hóa, tài khoản thật thường thay đổi để phản ánh cá tính hoặc thương hiệu cá nhân.
- *utc_offset:* Chênh lệch múi giờ so với UTC của người dùng. Các tài khoản giả mạo thường được tạo hàng loạt bằng các công cụ tự động, bỏ qua việc thiết lập múi giờ hoặc để mặc định, dẫn đến trường utc_offset không được điền
- *lang:* Ngôn ngữ người dùng. Tài khoản giả mạo thường chỉ sử dụng tiếng Anh, trong khi tài khoản thật đa dạng hơn.

2.2. Phương pháp học máy

2.2.1. Mạng Nơ ron nhân tạo (ANN)

Mạng nơ ron nhân tạo (ANN) bao gồm tập các đơn vị tính toán (nơ ron) kết nối với nhau. Một mạng nơ ron thường gồm lớp đầu vào, các lớp ẩn và lớp đầu ra. Mỗi kết nối giữa các nơ-ron có trọng số, thể hiện mức độ quan trọng của tín hiệu truyền đi. ANN có khả năng mô hình hóa quan hệ phi tuyến nhờ các hàm kích hoạt và lớp ẩn. Do đó có thể xử lý tốt dữ liệu có mối quan hệ phức tạp mà mô hình tuyến tính (như hồi quy logistic) không thể giải quyết.

2.2.2. Support Vector Machine (SVM)

Support Vector Machine (SVM) được thiết kế để giải quyết bài toán phân loại bằng cách tìm siêu phẳng tối ưu phân chia các lớp dữ liệu. SVM tập trung vào việc cực đại hóa lề (margin) – khoảng cách giữa siêu phẳng và các điểm dữ liệu gần nhất thuộc các lớp khác nhau. Những điểm dữ liệu này được gọi là support vectors, đóng vai trò xác định vị trí của siêu phẳng. Phương pháp kernel như RBF, polynomial, hoặc sigmoid giúp SVM tạo đường phân lớp phi tuyến phức tạp mà không cần tính toán trực tiếp trong không gian bậc cao.

2.2.3. K-Means

K-Means là một thuật toán học không giám sát (unsupervised learning) được sử dụng cho bài toán phân cụm (clustering). K-Means nhóm các điểm dữ liệu vào một số lượng k cụm (clusters) dựa trên sự tương đồng giữa chúng. Tập dữ liệu được phân thành các cụm sao cho các điểm trong cùng một cụm có khoảng cách gần nhau nhất (tương đồng cao), trong khi khoảng cách giữa các cụm là lớn nhất (khác biệt rõ ràng). K-Means có thể áp dụng cho bài toán phân loại, hoạt động hiệu quả với dữ liệu có các cụm hình cầu hoặc phân bố đều trong không gian.

2.2.4. Cây quyết định (Decision Tree)

Thuật toán Decision Tree xây dựng một cấu trúc cây, trong đó mỗi nút nội bộ đại diện cho một quyết định dựa trên một đặc trưng, và mỗi lá cây đại diện cho một nhãn lớp. Quá trình

phân loại bao gồm việc đi từ gốc cây đến một lá cây, dựa trên các điều kiện trên các đặc trưng, để gán nhãn cho dữ liệu đầu vào. Biên phân lớp là sự kết hợp của các đường thẳng song song trục, tạo thành các vùng hình chữ nhật trong không gian đặc trưng. Cây quyết định có thể xử lý các mối quan hệ phi tuyến phức tạp giữa đặc trưng và biến mục tiêu, không yêu cầu dữ liệu phải có phân phối cụ thể.

2.2.5. Rừng ngẫu nhiên (Random Forest)

Random Forest là một thuật toán học máy ensemble learning, kết hợp nhiều cây quyết định (decision trees) để cải thiện độ chính xác và ổn định của mô hình. Mỗi cây quyết định được xây dựng độc lập trên một tập con dữ liệu và đặc trưng được chọn ngẫu nhiên (kỹ thuật bagging và feature randomness). Kết quả cuối cùng được xác định bằng cách bỏ phiếu đa số từ các cây thành phần, giúp giảm phương sai và tránh overfitting so với một cây đơn lẻ. Đường phân lớp trong Random Forest là sự kết hợp của các biên quyết định từ nhiều cây khác nhau.

2.2.6. XGBoost

XGBoost xây dựng một mô hình ensemble dựa trên việc kết hợp tuần tự nhiều cây quyết định yếu (weak learners), mỗi cây tập trung sửa lỗi dự đoán của cây trước đó. Khác với Random Forest (dùng bagging), XGBoost sử dụng boosting – kỹ thuật tăng cường trọng số cho các mẫu dự đoán sai để cải thiện dần kết quả. Đường phân lớp của XGBoost được hình thành từ tổ hợp tuyến tính của các biên quyết định từ nhiều cây.

3. Thực nghiệm

3.1. Chuẩn bị dữ liệu

Dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu này được thu thập từ nền tảng Twitter, bao gồm 1,337 tài khoản giả mạo và 1,481 tài khoản thật, với tổng cộng 9 đặc trưng hồ sơ phản ánh hành vi và thông tin của người dùng. Để đảm bảo tính khách quan và tránh thiên lệch, dữ liệu được tiền xử lý qua các bước chuẩn hóa và giảm chiều. Trước tiên, các đặc trưng được chuẩn hóa bằng Z-score normalization [14] nhằm loại bỏ ảnh hưởng của các thang đo khác nhau, giúp các thuật toán học máy hoạt động hiệu quả hơn. Tiếp theo, Principal Component Analysis (PCA) của thư viện Scikit-learn [15] được áp dụng để giảm chiều dữ liệu, giữ lại những thành phần quan trọng nhất mà không làm mất thông tin cần thiết cho việc phân loại. Cuối cùng, dữ liệu được chia thành hai tập: 80% dùng để huấn luyện và 20% để kiểm tra, đảm bảo sự phân phối đồng đều giữa hai lớp và duy trì tính đại diện của tập dữ liệu. Quá trình xử lý này giúp nâng cao hiệu suất mô hình, tối ưu hóa khả năng phân loại và giảm thiểu tác động của dữ liệu nhiễu.

3.2. Huấn luyện mô hình

Quá trình huấn luyện các mô hình được thực hiện dựa trên tập dữ liệu đã tiền xử lý, với mục tiêu phân loại tài khoản thật và tài khoản giả mạo. Các mô hình được triển khai bao gồm KMeans, Decision Tree, Random Forest, XGBoost, Support Vector Machine (SVM) và Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN).

3.2.1. Chia dữ liệu

Dữ liệu sau khi đã được xử lý và giảm chiều được chia thành hai phần theo tỷ lệ 80:20, trong đó 80% dữ liệu được sử dụng để huấn luyện mô hình (train) và 20% còn lại dùng để kiểm tra hiệu suất của mô hình (test).

Phương pháp random split đảm bảo rằng dữ liệu được chia ngẫu nhiên, giúp giảm thiểu nguy cơ sai lệch trong phân phối của các lớp (real/fake). Tập train được sử dụng cho việc tìm kiếm tham số tối ưu, trong khi tập test được giữ lại hoàn toàn tách biệt, chỉ sử dụng để đánh giá hiệu quả của mô hình cuối cùng.

3.2.2. Tối ưu hóa tham số

Để đảm bảo hiệu suất tốt nhất, chúng tôi áp dụng GridSearchCV kết hợp với KFold cross-validation trên tập train nhằm tìm kiếm tham số tối ưu cho mô hình. Dữ liệu được chia thành 5 phần (folds). Trong mỗi lần lặp, 4 folds sẽ được sử dụng để train và 1 fold sẽ được sử dụng để validate.

GridSearchCV: Thử nghiệm toàn bộ các tổ hợp tham số được chỉ định trong lưới tham số, bao gồm:

- Kmeans: - *n_cluster*: [2. 5].
- ANN: *batch_size* [16, 32], epochs [20, 30], *dropout_rate* [0.2, 0.4], *regularization* [0.001, 0.01], *learning_rate* [0.001, 0.0005].
- Decision tree: *max_depth* [3, 5, 10, 15, 20, None], *min_samples_split* [2, 5, 10, 20], *min_samples_leaf* [1, 2, 4, 6], *criterion* ['gini', 'entropy'].
- Random Forest: *n_estimators* [50, 100, 150], *max_depth* [10, 20, 30], *min_samples_split*: [2, 5, 10].
- SVM: *C* [0.1, 1, 10], *gamma*: [0.01, 0.1, 1], *kernel*: ['rbf'].
- XGBoost: *n_estimators* [50, 100, 150], *learning_rate* [0.01, 0.1, 0.2], *max_depth* [3, 5, 7].

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Độ đo

Trong bài toán phát hiện tài khoản mạng xã hội giả mạo, các chỉ số Accuracy, Precision, Recall, và F1-Score được sử dụng để đánh giá hiệu suất của các mô hình. Ý nghĩa cụ thể của từng chỉ số trong ngữ cảnh bài toán này như sau:

- Accuracy phản ánh tỷ lệ dự đoán đúng (bao gồm cả tài khoản thật và tài khoản giả) so với tổng số dữ liệu. Tuy nhiên, nếu dữ liệu không cân bằng, chỉ số này có thể không phản ánh đúng hiệu quả thực tế của mô hình.

- Precision đo lường tỷ lệ các tài khoản bị dự đoán là "giả mạo" thực sự đúng. Precision cao đồng nghĩa với việc mô hình ít nhầm lẫn tài khoản thật là giả, tránh gây phiền hà cho người dùng thật.

- Recall là chỉ số quan trọng trong bài toán này, thể hiện tỷ lệ tài khoản giả được phát hiện đúng. Một mô hình với Recall cao đảm bảo rằng phần lớn các tài khoản giả không bị bỏ sót.

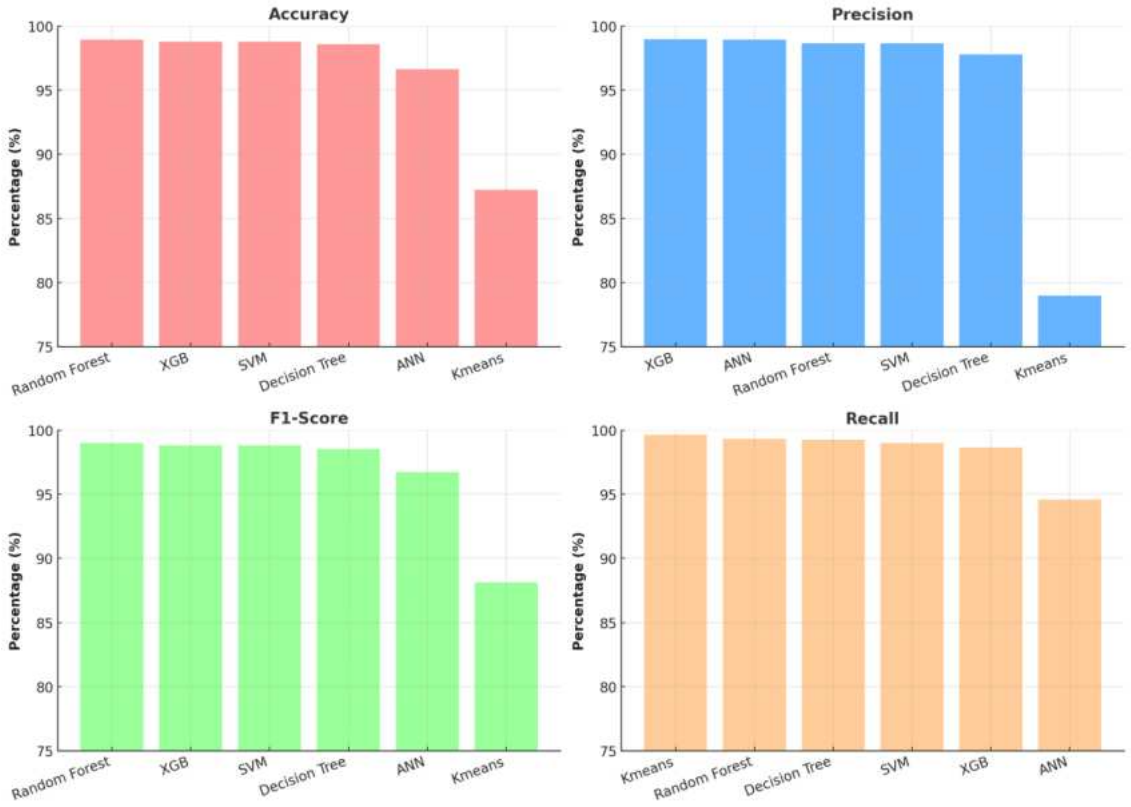
- F1-Score là trung bình điều hòa giữa Precision và Recall, cung cấp một thước đo tổng quát, đặc biệt hữu ích trong các bài toán yêu cầu cân bằng giữa hai yếu tố này.

4.2. Kết quả các mô hình

Kết quả trên tập dữ liệu kiểm tra sau khi huấn luyện các mô hình được trình bày trong Bảng 1 và Hình 1.

Bảng 1. Kết quả phân loại của 6 mô hình

STT	Mô hình phân loại	Accuracy (%)	Precision (%)	F1-Score (%)	Recall (%)
1	ANN	96.63	98.94	96.72	94.59
2	Decision tree	98.58	97.79	98.52	99.25
3	Kmeans	87.23	78.99	88.12	99.63
4	SVM	98.76	98.65	98.82	98.99
5	XGB	98.76	98.98	98.82	98.65
6	Random forest	**98,94**	98,66	98.99	99,32



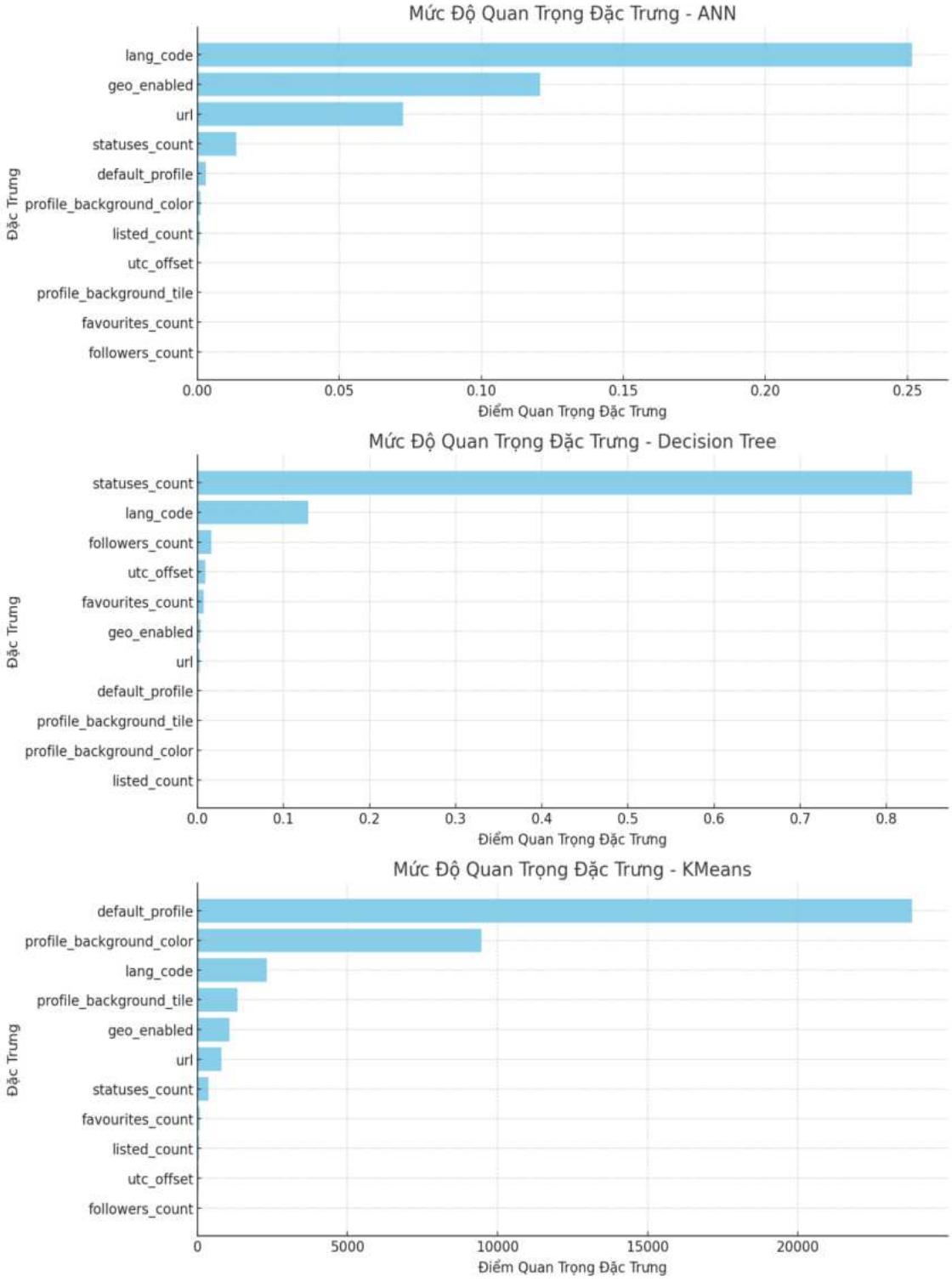
Hình 2. Biểu đồ chỉ số của các mô hình

Nhìn chung, các mô hình phân lớp đều đạt hiệu năng cao trên tất cả các độ đo. Trong đó, mô hình tốt nhất là Random Forest, đạt hiệu năng cao nhất trên tất cả độ đo Accuracy (98.94%), F1-Score (98.99%), Recall (99.32%), và Precision (98.66%). Điều này cho thấy mô hình cân bằng giữa việc dự đoán chính xác cả lớp dương và lớp âm, ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu dữ liệu. Mô hình kém nhất là Kmeans với Accuracy 87.23% và Precision: 78.99%. Kmeans là thuật toán phân cụm, do đó không phù hợp với nhiệm vụ phân loại mà các điểm dữ liệu không phân bố hình cầu đều trong không gian.

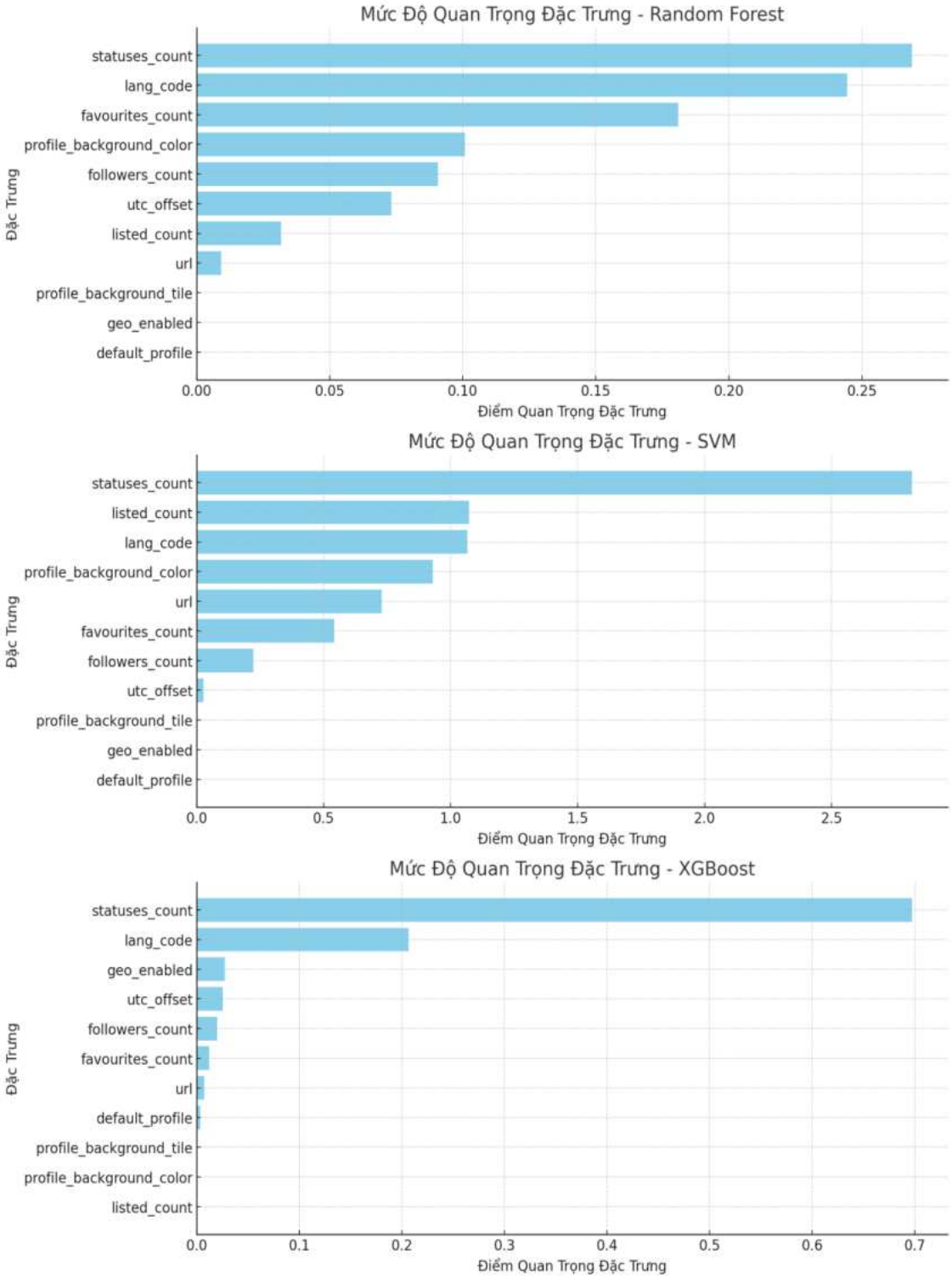
Với bài toán phát hiện tài khoản giả mạo, tùy vào tình huống ứng dụng thực tế mà lựa chọn mô hình theo các tiêu chí khác nhau. Cụ thể precision là khả năng dự đoán lớp dương, recall là khả năng phát hiện lớp dương. Theo độ đo Precision, ANN dự đoán lớp dương tốt nhất, ít bị nhầm từ lớp âm (tài khoản thật) thành lớp dương (giả mạo). Precision của các thuật toán lần lượt là ANN 98.94%, XGBoost 98.98%, Random Forest, 98.66%, SVM 98.65%, Decision Tree 97.79%, Kmeans 78.99%. Theo độ đo Recall, mô hình tốt nhất là Kmeans, nó bỏ sót ít mẫu dương (tài khoản giả mạo) nhất. Tuy nhiên, Kmeans lại có Precision rất thấp thể hiện việc tập trung gán nhãn cho mẫu dương dẫn đến dự đoán sai nhiều mẫu âm thành dương (false positive). Trong triển khai, để cân đối giữa khả năng dự đoán và phát hiện, chúng ta có thể sử dụng độ đo

F1-score cân bằng giữa Precision và Recall. Theo độ đo này, Random Forest có giá trị cao nhất, khẳng định sự cân bằng vượt trội giữa Precision và Recall. SVM và XGBoost có F1-Score bằng nhau (98.82%), thể hiện hiệu suất tương đương. ANN có F1-Score thấp hơn do Recall kém.

Hình 3 và Hình 4 minh họa mức độ quan trọng của các đặc trưng theo từng mô hình. Qua đó, có thể thấy rằng statuses_count và lang_code thường có ảnh hưởng lớn đến khả năng phân loại tài khoản giả mạo. Trong khi đó, một số đặc trưng như geo_enabled, profile_background_tile và default_profile có mức độ quan trọng thấp hoặc gần như không ảnh hưởng đến kết quả dự đoán của các mô hình.



Hình 3. Điểm quan trọng đặc trưng của ANN, Decision Tree và Kmeans



Hình 4. Điểm quan trọng đặc trưng của Random Forest, SVM và XGBoost

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá hiệu quả của các mô hình học máy trong bài toán phát hiện tài khoản giả mạo trên mạng xã hội, với tập trung vào sáu thuật toán: Random Forest, XGBoost, Decision Tree, SVM, ANN và KMeans. Kết quả thực nghiệm cho thấy Random Forest và XGBoost đạt hiệu suất cao nhất nhờ khả năng tổng quát hóa tốt và khai thác hiệu quả các đặc

trưng quan trọng. Trong khi đó, KMeans có Recall cao nhưng Precision thấp, dẫn đến nhiều dự đoán sai, còn ANN chưa đạt hiệu quả tối ưu do yêu cầu dữ liệu huấn luyện lớn hơn.

Những phát hiện trong nghiên cứu này củng cố quan điểm rằng các mô hình dựa trên cây quyết định, đặc biệt là Random Forest và XGBoost, là lựa chọn phù hợp cho bài toán phát hiện tài khoản giả mạo. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng cho thấy rằng việc chỉ sử dụng đặc trưng hồ sơ (profile features) có thể chưa đủ để phân loại chính xác các tài khoản giả mạo tinh vi hơn. Điều này đặt ra nhu cầu tích hợp thêm các đặc trưng hành vi và ngữ nghĩa để cải thiện độ chính xác của hệ thống.

Mặc dù các mô hình học máy đã cho thấy tiềm năng lớn, nghiên cứu này có một số hạn chế. Thứ nhất, tập dữ liệu sử dụng có quy mô vừa phải (~2800 tài khoản), điều này có thể ảnh hưởng đến tính tổng quát hóa của mô hình khi áp dụng trên dữ liệu thực tế lớn hơn. Thứ hai, nghiên cứu chủ yếu dựa vào thông tin hồ sơ người dùng mà chưa khai thác sâu các yếu tố như hành vi tương tác, nội dung bài đăng hoặc phân tích mạng lưới xã hội. Những yếu tố này có thể cung cấp thông tin giá trị giúp cải thiện hiệu suất mô hình.

Hướng nghiên cứu trong tương lai có thể tập trung vào mở rộng tập dữ liệu, tích hợp phân tích mạng xã hội, sử dụng dữ liệu thời gian thực và kết hợp các mô hình tiên tiến như Transformer-based models hoặc mô hình học sâu có cơ chế Attention để tăng khả năng nhận diện tài khoản giả mạo tinh vi hơn. Ngoài ra, việc áp dụng học có giám sát kết hợp với không giám sát có thể giúp phát hiện các tài khoản đáng ngờ ngay cả khi không có nhãn đầy đủ.

Nhìn chung, nghiên cứu này cung cấp một đánh giá toàn diện về hiệu suất của các mô hình học máy trong bài toán phát hiện tài khoản giả mạo, đồng thời gợi mở nhiều hướng đi mới nhằm nâng cao hiệu quả và khả năng ứng dụng thực tế của hệ thống trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

1. Adewole, K. S., Anuar, N. B., Kamsin, A., Varathan, K. D., & Razak, S. A. (2017). Malicious accounts: Dark of the social networks. *Journal of Network and Computer Applications*, *79*, 41-67.

2. Castillo, C., Mendoza, M., & Poblete, B. (2011, March). Information credibility on twitter. In *Proceedings of the 20th international conference on World wide web* (pp. 675-684).

3. Erşahin, B., Aktaş, Ö., Kılınç, D., & Akyol, C. (2017, October). Twitter fake account detection. In *2017 international conference on computer science and engineering (UBMK)* (pp. 388-392). IEEE. Buket Erşahin, Özlem Aktaş, Deniz Kılınç, & Ceyhun Akyol (2017). Twitter Fake Account Detection. *Advances in neural information processing systems*, *27*.

4. Swe, M. M., & Myo, N. N. (2018, June). Fake accounts detection on twitter using blacklist. In *2018 IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)* (pp. 562-566). IEEE.

5. Khaled, S., El-Tazi, N., & Mokhtar, H. M. (2018, December). Detecting fake accounts on social media. In *2018 IEEE international conference on big data (big data)* (pp. 3672-3681).

6. Rai, K., Devi, M. S., & Guleria, A. (2016). Decision tree based algorithm for intrusion detection. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, *7*(4), 2828.

7. Ahmed, M., Seraj, R., & Islam, S. M. S. (2020). The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation. *Electronics*, *9*(8), 1295.

8. Liu, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2012). New machine learning algorithm: Random forest. In *Information Computing and Applications: Third International Conference, ICICA 2012, Chengde, China, September 14-16, 2012. Proceedings 3* (pp. 246-252). Springer Berlin Heidelberg.

9. Ramraj, S., Uzir, N., Sunil, R., & Banerjee, S. (2016). Experimenting XGBoost algorithm for prediction and classification of different datasets. *International Journal of Control Theory and Applications*, *9*(40), 651-662.

10. Xue, H., Yang, Q., & Chen, S. (2009). SVM: Support vector machines. In *The top ten algorithms in data mining* (pp. 51-74). Chapman and Hall/CRC.

11. Baptista, F. D., Rodrigues, S., & Morgado-Dias, F. (2013, September). Performance comparison of ANN training algorithms for classification. In *2013 IEEE 8th International Symposium on Intelligent Signal Processing* (pp. 115-120). IEEE.

12. Gurajala, S., White, J. S., Hudson, B., Voter, B. R., & Matthews, J. N. (2016). Profile characteristics of fake Twitter accounts. *Big Data & Society*, *3*(2), 2053951716674236.

13. Kim, Y. (2024). Personality of organizational social media accounts and its relationship with characteristics of their photos: analyses of startups' Instagram photos. *BMC psychology*, *12*(1), 233.

14. Brownlee, J. (2021). How to Use StandardScaler and MinMaxScaler Transforms in Python,(2020). *URL: https://machinelearningmastery. com/standardscaler-and-minmaxscaler-transforms-in-python*.

15. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, *12*, 2825-2830.

A Comparative Study of Machine Learning Methods for Fake Account Detection in Social Network Platforms

Abstract: *With the rapid expansion of social networks, fake accounts have emerged as a serious threat to the online community, contributing to issues such as online fraud, misinformation dissemination, and personal defamation. Detecting fake accounts not only protects users but also ensures the security and transparency of online platforms. This study investigates several widely used machine learning techniques for fake account detection. We begin by analyzing social network account features that are commonly associated with fraudulent behavior. Various machine learning models, including Artificial Neural Network (ANN), Decision Tree, K-Means, Support Vector Machine (SVM), Extreme Gradient Boosting (XGB), and Random Forest, are evaluated for their effectiveness in building detection systems. The results aim to assess the applicability of these methods in identifying fake accounts, providing valuable insights for platform developers and administrators in selecting suitable technologies to enhance user trust and platform security.*

Keywords: Artificial Neural Network; Decision Tree; Support Vector Machine; Extreme Gradient Boosting; K-Means; Random Forest; Fake account detection.

Evaluating the Resilience of Machine Learning Based Malware Detection Designs Against Black-box Adversarial Attacks

Luu Chi Duc[1]

[1] *Institute of Information and Communication Technology; Le Quy Don Technical University*

** Email: duc.luu@lqdtu.edu.vn, Contact number: 03357859226*

Abstract

In recent years, machine learning, especially deep learning, has significantly enhanced the efficiency of malware detection systems. However, despite achieving high performance, these models face a growing threat from adversarial attacks. Adversarial malware samples can be intricately crafted to deceive detection models, resulting in misclassification between malicious software and benign programs, thereby bypassing security systems. Various techniques have been developed to generate adversarial malware specifically designed to evade machine learning-based detection systems. This threat underscores the urgent need for solutions that enhance the resilience of malware detection models against adversarial attacks. By evaluating different model configurations against black-box adversarial attacks, this study aims to assess the resilience of malware detection systems and propose measures to strengthen their defenses. The research highlights vulnerabilities in current deep learning based malware detection and outlines strategies to improve the robustness of models against evolving adversarial threats.

Keywords: *malware detection; adversarial attacks; model resilience; adversarial defense.*

1. Introduction

The rapid evolution of cyber threats has driven the need for more sophisticated and effective malware detection systems. In response, machine learning (ML) has emerged as a transformative force, significantly improving the accuracy and efficiency of modern malware detection frameworks. By analyzing large datasets, ML models can uncover intricate patterns and identify potential malware binaries with greater precision than traditional signature-based approaches. Besides traditional API calls and opcodes analysis models, there have been many different novel approaches such as using byte sequence [1] or malware images [2] with deep neural networks.

Despite these advancements, adversarial attacks have emerged as a formidable challenge to ML-based malware detectors. Adversarial malware samples are crafted to deceive models by introducing perturbations to executable files, effectively bypassing detection [3, 4, 5]. Such attacks exploit vulnerabilities in the decision boundaries of classifiers, raising concerns about the robustness of current systems. Studies have shown that adversarial techniques like padding, byte manipulation, and GAN-generated malware can significantly reduce detection accuracy, exposing the limitations of ML-based detection models.

As such, there is an urgent need to develop resilient malware detection systems capable of withstanding adversarial attacks. This research aims to assess the adaptability of machine learning-based malware detection models in the face of adversarial malware samples. By evaluating various architectures of deep learning detection models, the study contributes by proposing strategies to enhancing the resilience of malware detection systems against evolving adversarial attacks.

2. Related Works

There have been many attempts to address the vulnerability of malware detection models against adversarial attacks. One such method is adversarial training, proposed by Lucas et al [6]. By training with samples generated by adversarial attacks, this approach was able to improve the accuracy of the original model by a considerable amount. The research shows that adversarial training is a valid method for increasing the robustness of malware detection models. However, adversarial samples are rare and manual generation requires resources allocation, which makes this method unrealistic in real world scenarios.

Another method called randomized smoothing was proposed by Gilbert et al [7]. Through introducing noise for randomizing inputs, a slightly perturbed version or binary files are generated. This boosts the resilience of malware detection models through blurring the decision boundaries, effectively boosting the flexibility of the model during attack. However, randomized smoothing is only effective in certain cases since malware attacks perturb very specific parts of an executable rather than randomly.

However, a method of constructing models with different activation function designs was proposed to improve adversarial robustness by Xie et al [8]. The authors proposed the use of traditionally popular activation function ReLU with smoother approximations such as SiLU or Softplus. Results on ImageNet shows that changing the design of models does indeed improve the resilience against adversarial attacks. The research shows promise in another method for adversarial defense.

3. Method

For this research, we aim to evaluate the extent of influence that designing activation function has on malware detection models. The state-of-the-art MalConv model is a popular end-to-end malware detection model [1]. This model utilizes a binary's byte sequence to determine the maliciousness of the file. The original model consists of an input layer which accepts raw byte sequences, an embedding layer for byte mapping, followed by a convolutional layer and a gating layer, with final output classification layer. In the original design, ReLU was used for convolutional layer activation and gating mechanism employed a sigmoid activation.

To evaluate the adversarial resilience of different activation function designs, this study investigates alternative configurations for both the convolutional layer and the gating mechanism within the MalConv architecture. The goal is to determine whether modifying the activation functions at key points in the network can enhance the model's ability to resist adversarial perturbations, such as byte padding or slight modifications to binary files designed to bypass detection.

The convolutional layer is essential for extracting local patterns and features from raw byte sequences, making the choice of activation function critical to performance. In place of the standard ReLU, two advanced activations are introduced: SiLU, also known as Swish, is a smooth, non-monotonic function that has been shown to outperform ReLU in deep networks by enabling more efficient gradient flow [9]. This smooth activation may enhance the model's ability to capture subtle variations in adversarial binaries. Mish activation is a self-regularizing activation function [10] that provides smoother transitions than ReLU, leading to better

generalization and robustness. Mish suggestis potential benefits for malware detection by preserving more nuanced features in the byte sequences.

The gating mechanism in MalConv selectively emphasizes or suppresses certain regions of the input binary. By varying the activation function within the gating layer, the model can be tuned to respond differently to adversarial modifications. The following alternatives are explored: Softplus activation can be a better alternative to sigmoid [11]. Softplus gradually increases activation, reducing sensitivity to small input changes. This characteristic may help the gating mechanism avoid overreacting to minor adversarial perturbations, thereby increasing model stability. Tanh activation introduces non-linearity while outputting values in the range of -1 to 1, introducing larger derivatives when compared to sigmoid [11]. This can potentially improve the model's sensitivity to adversarial manipulations by balancing focus between benign and malicious regions of the binary.

4. Experiments

For this research, we utilized the DikeDataset which consists of labeled benign and malicious PE files [12]. To thoroughly test each configuration, we trained the MalConv model on a training dataset of binaries which consists of 1586 samples, with 803 malicious samples and 783 benign samples. For the original unperturbed test set, there are 396 samples, with 197 malicious samples and 199 benign samples. Each MalConv model was trained with the same settings and training data. The training was done with learning rate set to 0.0001, batch size set to 64, 20 epochs. A binary cross entropy loss and Adam optimizer was used.

In order to generate adversarial samples, we utilized the secml-malware framework which includes many implementations of adversarial malware attacks [13]. For the scope of this experiment, we chose the black-box GAMMA padding attack which was proposed by Demetrio et al [5]. This attack aims to bypass models detection through the means of injecting contents extracted from benign applications into malicious binaries. Instead of white-box attacks, we chose a black-box attack approach since it is closer to real world scenarios where the attacker does not know the inner-workings of the model. We utilized the benign samples to perturb the malicious samples in the same test set. For each model, we limited the number of queries to 200 and the number of sections to extract from benign samples to 10. This resulted in an adversarial test set of 396 samples, with 197 perturbed malicious samples and 199 benign samples.

To effectively evaluate the performance of each design, the metrics used in this research are Accuracy, Precision, Recall, and F1 score. Accuracy represents the ratio of correctly classified binaries (both malicious and benign) to the total number of classifications. In adversarial malware detection, accuracy reflects the overall effectiveness of the model in distinguishing between adversarial malware samples and benign files. Precision measures the proportion of correctly identified adversarial malware samples out of all instances predicted as malicious. High precision indicates that the model is adept at minimizing false positives, ensuring that benign files are not misclassified as adversarial malware. Recall quantifies the proportion of actual adversarial malware samples that are correctly detected by the model. A higher recall signifies that the model can correctly identifies adversarial attacks. Recall is critical in adversarial contexts, as undetected malware can lead to significant security breaches.

F1-Score represents the harmonic mean of precision and recall, balancing both metrics to provide a comprehensive measure of a model's performance. A higher F1-score indicates the model performs well across both detection accuracy and adversarial robustness.

5. Results and Discussion

Results shown in Table 1 demonstrates that different activation function designs on the same MalConv model does have an effect on the resilience against adversarial attacks. Even though adversarial attacks all have adverse effect on the accuracy and recall of the models, it can be seen that changing configurations does have a positive impact on the robustness of the MalConv model. Overall, except for Mish + Tanh and SiLU + Softplus configuration where resilience was worst compared to the original setup, all other activation function configurations managed to improve the resilience when facing adversarial conditions.

It can be seen for the most part precision remains stable all around and the model is generally effective in detecting benign samples. This is understandable as the benign samples resemble the files used in the training phase. The accuracy drop is resulted from the degradation in recall values when facing adversarial samples. From the results, the Mish + Sigmoid and Mish + Softplus configurations demonstrate the smallest accuracy reduction (from 0.939 to 0.803 and 0.975 to 0.793, respectively), indicating stronger adversarial resilience. This is also true in the case of recall. The Mish + Sigmoid (0.619) and Mish + Softplus (0.604) configurations retain higher recall under adversarial conditions, highlighting their superior robustness. While Mish + Sigmoid has slightly lower metrics on the original dataset when compared to other approaches, this combination proved to be the most resilient with the lowest drop in values.

Other activation functions designs also showed improvements compared to the original model, with ReLU + Tanh also showing promising results with an accuracy of 0.787 and recall value of 0.588. SiLU + Sigmoid and ReLU + Softplus also displays a slight resilience improvement.

Tabel 1. Results of activation function combinations resilience

	Accuracy		Precision		Recall		F1	
	Original	Adversarial	Original	Adversarial	Original	Adversarial	Original	Adversarial
ReLU + Sigmoid (Original)	0.982	0.596	0.979	0.917	0.984	0.223	0.982	0.359
SiLU + Sigmoid	0.977	0.679	0.989	0.972	0.964	0.365	0.977	0.531
Mish + Sigmoid	**0.939**	**0.803**	**0.984**	**0.976**	**0.954**	**0.619**	**0.969**	**0.757**
ReLU + Tanh	**0.974**	**0.787**	**0.984**	**0.974**	**0.964**	**0.588**	**0.974**	**0.734**

SiLU + Tanh	0.982	0.611	0.994	0.977	0.969	0.223	0.982	0.364
Mish + Tanh	0.977	0.601	0.984	0.933	0.969	0.213	0.977	0.347
ReLU + Softplus	0.967	0.677	0.984	0.960	0.949	0.365	0.966	0.529
SiLU + Softplus	0.982	0.550	0.994	0.952	0.969	0.101	0.982	0.183
Mish + Softplus	**0.975**	**0.793**	**0.979**	**0.967**	**0.969**	**0.604**	**0.974**	**0.744**

Facing against black-boxing GAMMA padding attack, it can be said that Mish + Sigmoid, Mish + Softplus, and ReLU + Tanh proves to be the most resilient against adversarial malware attacks. However, it should be noted that other attacks might have different effects on different designs and further experimentation is required. Moreover, the dataset used in this experiment is still a small set and can be subjected to sensitivity to parameters configuration.

6. Conclusion and Future Work

In this study, we explored the impact of various activation function configurations on the adversarial resilience of ML-based malware detection models. By systematically replacing standard activations in the MalConv model, we evaluated their performance under both normal and adversarial conditions. The results revealed that activation function design can play a critical role in enhancing the robustness against adversarial malware samples.

Resulsts indicate that configurations involving Mish + Sigmoid and Mish + Softplus consistently outperformed other combinations in adversarial environments, achieving higher metrics even against crafted samples. In contrast, configurations such as SiLU + Softplus and ReLU + Sigmoid showed significant degradation in adversarial conditions, highlighting vulnerabilities that could be exploited by adversaries. The stark contrast in performance somewhat underscores the importance of carefully selecting activation functions to bolster model defenses against evasive malware. Moreover, this result highlights the possibility of an alternative in improving ML-based malware detection models. Different designs can enhance the resilience of models at a lower cost while maintaining generability when comparing to other approaches.

However, this research has several limitations. First, only the MalConv model was tested. There should be more extensive experiments covering other ML-based malware detection models to better generalize the activation functions' effect on model resilience. Second, a deeper investigation on other types of adversarial attack should also be implemented. Third, other elements of model design such as number of layers and layer size should also be considered when comprehensively testing the resilience of models.

Therefore, to overcome these limitations, we propose the following future directions. First, we will investigate more in depth the effect of different designs on adversarial resilience. This includes activation function designs and architectural designs. Second, we will also

investigate the extent of influence of different types of attacks on such models. Finally, we will evaluate the effectiveness of combination methods in improving malware detection model resilience against adversarial conditions.

References

[1] Raff, E., Barker, J., Sylvester, J., Brandon, R., Catanzaro, B., & Nicholas, C. K. (2018). Malware detection by eating a whole EXE. arXiv (Cornell University), 268–276. https://doi.org/10.13016/m2rt7w-bkok

[2] Gibert, D., Mateu, C., Planes, J., & Vicens, R. (2018). Using convolutional neural networks for classification of malware represented as images. Journal of Computer Virology and Hacking Techniques, 15(1), 15–28. https://doi.org/10.1007/s11416-018-0323-0

[3] Demetrio, L., Coull, S. E., Biggio, B., Lagorio, G., Armando, A., & Roli, F. (2021). Adversarial EXEmples. ACM Transactions on Privacy and Security, 24(4), 1–31. https://doi.org/10.1145/3473039

[4] Castro, R. L., Schmitt, C., & Dreo, G. (2019). AIMED: Evolving Malware with Genetic Programming to Evade Detection. 2019 18th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications /13th IEEE International Conference on Big Data Science and Engineering (TrustCom/BigDataSE). https://doi.org/10.1109/trustcom/bigdatase.2019.00040

[5] Demetrio, L., Biggio, B., Lagorio, G., Roli, F., & Armando, A. (2021). Functionality-Preserving Black-Box optimization of adversarial Windows malware. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 16, 3469–3478. https://doi.org/10.1109/tifs.2021.3082330

[6] Keane Lucas, Samruddhi Pai, Weiran Lin, Lujo Bauer, Michael K. Reiter, and Mahmood Sharif (2023). Adversarial training for raw-binary malware classifiers. In Proceedings of the 32nd USENIX Security Symposium. USENIX.

[7] Gibert, D., Zizzo, G., & Le, Q. (2024). Towards a practical defense against adversarial attacks on Deep Learning-Based malware detectors via randomized smoothing. In Lecture notes in computer science (pp. 683–699). https://doi.org/10.1007/978-3-031-54129-2_40

[8] Xie, C., Tan, M., Gong, B., Yuille, A., & Le, Q. V. (n.d.). Revisiting activation function design for improving adversarial robustness at scale. OpenReview. https://openreview.net/forum?id=BrKY4Wr6dk2

[9] Elfwing, S., Uchibe, E., & Doya, K. (2017). Sigmoid-Weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.1702.03118

[10] Misra, D. (2019). MISH: a self regularized Non-Monotonic activation function. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.1908.08681

[11] Szandała, T. (2020). Review and comparison of commonly used activation functions for deep neural networks. In Studies in computational intelligence (pp. 203–224). https://doi.org/10.1007/978-981-15-5495-7_11

[12] Iosifache. (n.d.). GitHub - iosifache/DikeDataset: Dataset with labeled benign and malicious files 📚. GitHub. https://github.com/iosifache/DikeDataset

[13] Demetrio, L., & Biggio, B. (2022). Secml-Malware: Pentesting Windows Malware Classifiers with Adversarial Exemples in Python. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/ssrn.4066509

Đánh giá khả năng thích ứng của các mô hình phát hiện đối với tấn công sử dụng mẫu mã độc đối nghịch

Tóm tắt: *Trong những năm gần đây, học máy đã cải thiện đáng kể hiệu quả của các hệ thống phát hiện mã độc. Tuy nhiên, mặc dù đạt hiệu suất cao, các mô hình này đang đứng trước hiểm nguy của những cuộc tấn đông đối nghịch. Các mẫu mã độc đối nghịch có thể được thiết kế tinh vi nhằm đánh lừa mô hình, gây ra sự phân loại nhầm giữa mã độc và phần mềm an toàn để vượt qua hệ thống phát hiện. Nhiều phương pháp đã được nghiên cứu để tạo ra các mẫu mã độc đối nghịch, được thiết kế đặc biệt để đánh lừa các hệ thống phát hiện dựa trên học máy. Mối đe dọa này nhấn mạnh sự cần thiết của các giải pháp tăng cường khả năng thích ứng của các mô hình học máy phát hiện mã độc chống lại tấn công đối nghịch. Bằng cách đánh giá các mẫu mã độc đối nghịch và khám phá các cấu hình mô hình khác nhau, nghiên cứu này nhằm đánh giá mức độ khả năng chịu đựng và đưa các biện pháp để tăng cường an ninh cho các hệ thống phát hiện mã độc dựa trên học máy.*

Từ khoá: phát hiện mã độc, tấn công đối nghịch, khả năng chống chịu của mô hình, phòng thủ đối kháng.

Một chiến lược lựa chọn các điểm đặc trưng cho lược đồ thủy vân rỗng bền vững trên miền tần số kết hợp

Phạm Thái Hưng[1], Tạ Minh Thanh[2]

Viện CNTT&TT, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

[*] *Email: hungpt@lqdtu.edu.vn, Contact number: 0976096086*

Tóm tắt

Trong những năm gần đây, đã có nhiều kỹ thuật thủy vân được đề xuất cho việc bảo vệ bản quyền dữ liệu số. Tuy vậy, hầu hết các thuật toán thủy vân hiện tại đều chưa đáp ứng được yêu cầu về mặt thời gian thực cũng như khả năng chống lại các tấn công hình học. Bài báo của chúng tôi đề xuất một lược đồ thủy vân rỗng bền vững cho ảnh màu dựa trên miền biến đổi sóng con rời rạc (DWT - Discrete Wavelet Transform) và biến đổi cosin rời rạc (DCT - Discrete Cosine Transform) đồng thời sử dụng phương pháp đối sánh các điểm đặc trưng cốt lõi của ảnh để tự động tính toán các hệ số xoay ảnh, lấy tỷ lệ ảnh, dịch chuyển ảnh (RST - Rotation, Scaling, Translation) để phục hồi lại ảnh đã bị tấn công trước khi trích xuất thủy vân rỗng mà không cần sử dụng tới ảnh gốc. Đầu tiên, ảnh gốc được phân tách thành ba thành phần (Y, Cr, Cb). Sau đó, thành phần Y sẽ được biến đổi với DWT ba mức. Băng con LL3 sẽ được sử dụng để biến đổi DCT. Ảnh DCT được nhị phân hóa để sinh ra đặc trưng của ảnh gốc (Master Share - MS). Thêm vào đó, biến đổi Arnold được thực hiện trên logo thủy vân để làm tăng tính bảo mật của thuật toán. Cuối cùng, ta nhận được thủy vân rỗng (Ownership Share - OS) bằng việc áp dụng phép toán XOR giữa đặc trưng MS và thủy vân đã được xáo trộn và thủy vân rỗng sẽ được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu bản quyền để xác định bản quyền. Để khôi phục các ảnh đã bị tấn công hình học, chúng tôi sử dụng kỹ thuật đối sánh các điểm đặc trưng bền vững để ước lượng các hệ số RST trên ảnh bị tấn công mà không cần sử dụng tới ảnh gốc. Tính bền vững của thuật toán đề xuất đối với các phép xử lý ảnh được phân tích, kết quả chỉ ra rằng thuật toán của chúng tôi bền vững trước các tấn công xử lý ảnh phổ biến như thêm nhiễu, lọc ảnh, nén JPEG và các tấn công hình học như xoay ảnh, lấy tỷ lệ và dịch chuyển ảnh.

Từ khóa: *Biến đổi wavelet rời rạc (DWT), biến đổi cosine rời rạc (DCT), thuỷ vân rỗng, biến đổi Arnold, tấn công RST.*

1. Giới thiệu

1.1. Tổng quan

Với sự phát triển nhanh của công nghệ thông tin và truyền thông, việc truyền tải các dữ liệu số trở nên hết sức tiện lợi. Bên cạnh sự tiện lợi đó, việc sao chép, phân phối bất hợp pháp dữ liệu số cũng ngày càng trở nên nghiêm trọng hơn. Chính vì vậy, việc tìm ra các phương pháp hữu hiệu để bảo vệ bản quyền các tài sản số ngày càng trở nên quan trọng. Các kỹ thuật thủy vân có thể được phân chia tương đối thành ba loại chính: thủy vân hiện [1], [2], thủy vân ẩn [3]–[5], và thủy vân rỗng [6], [7]. Thủy vân hiện là thuật toán được sử dụng rộng rãi cho việc đánh dấu và bảo vệ bản quyền của rất nhiều các nội dung số (bao gồm hình ảnh, video và âm thanh) trên các trang web. Tuy nhiên kỹ thuật này bị một điểm yếu cố hữu về vấn đề bảo mật vì hình ảnh thủy vân được hiển thị trên tất cả các hình ảnh được phân phối. Thuật toán thủy vân ẩn nhúng thông tin thủy vân vào ảnh gốc để xác minh bản quyền nên chất lượng hình ảnh bị giảm đi. Thêm vào đó, các thuật toán này cần có sự cân bằng giữa tính bền vững và tính ẩn của thủy vân được che dấu. Thủy vân rỗng là một kỹ thuật đặc biệt của thủy vân số, trong đó thủy vân được mã hóa với các đặc trưng bền vững của ảnh gốc thay vì nhúng trực tiếp vào trong ảnh gốc. Do đó, chất lượng của ảnh gốc được bảo toàn trước khi phân phối. Tuy nhiên, bất lợi chính của các thuật toán này đó là chúng gặp khó khăn trong việc chống lại các tấn công phức tạp, chẳng hạn như các tấn công hình học.

Thuật toán thủy vân rỗng (Zero-watermarking (Z-W)) giải quyết vấn đề biến dạng của hình ảnh gây ra bởi việc nhúng trực tiếp thủy vân vào trong ảnh gốc bởi các thuật toán thủy vân ẩn, hiện tuy nhiên vẫn còn nhiều vấn đề cần phải giải quyết. Thủy vân rỗng có thể được phân chia thành hai loại chính: thuật toán dựa trên miền không gian [8]–[11] và thuật toán dựa trên miền tần số [12]–[14]. Do các phương pháp thủy vân rỗng thường trích xuất các đặc trưng toàn cục (đặc trưng bền vững) từ ảnh gốc để tạo ra đặc trưng MS nên chúng có thể chống lại các tấn công toàn cục phổ biến, chẳng hạn như các tấn công thay đổi độ sáng hay các tấn công lọc ảnh. Tuy vậy, các thuật toán này chưa thực sự hiệu quả với các tấn công hình học.

Để chống lại các tấn công hình học, hầu hết các thuật toán thủy vân thực hiện một chiến lược ước lượng các giá trị góc xoay, tỷ lệ và độ dịch chuyển [15] để khôi phục ảnh gốc từ ảnh đã bị tấn công hình học và cơ bản trong số chúng đều cần sử dụng tới ảnh gốc để thực hiện việc này. Điều này sẽ gặp phải những hạn chế trong các ứng dụng thực tế bởi việc sử dụng ảnh gốc để phục hồi các ảnh đã bị tấn công sẽ không đáp ứng được các yêu cầu xử lý trong thời gian thực và tiêu tốn nhiều bộ nhớ để lưu trữ dữ liệu . Ví dụ, Thanh et al. [16] đã đề xuất một lược đồ thủy vân rỗng dựa trên đối sánh các điểm đặc trưng của framepatch với các điểm đặc trưng của tất cả các frame khác trong video. Để thực hiện việc này, họ cần lưu các frame-patch từ các frame trong video để trích xuất các đặc trưng bền vững cho việc đối sánh với tất cả các frame, sau đó ước lượng các tham số RST. Điều này sẽ gây ra các hạn chế cho các ứng dụng thực tế muốn áp dụng thuật toán của họ. Ở khía cạnh khác, Niu et al. [17] thực hiện một thuật toán thủy vân dựa trên radial harmonic Fourier moments, cũng như DWT và DCT. Thuật toán này cho kết quả tốt với các tấn công xoay ảnh. Shi et al. [18] đã đề xuất một thuật toán thủy vân rỗng dựa trên đa đặc trưng, tác giả gọi là ROI (region of interest) và RONI (region of non-interest), để nhận được các đặc trưng bền vững từ các ảnh gốc. Trong pha trích xuất thủy vân, thông tin về ROI và RONI cần phải được cung cấp để khôi phục lại các ảnh đã bị tấn công trước khi trích xuất thủy vân rỗng.

Dựa trên các phân tích ở trên, các kỹ thuật đối sánh dựa trên các điểm đặc trưng bền vững có nhiều triển vọng để áp dụng cho thuật toán thủy vân rỗng mà không cần sử dụng tới các ảnh gốc.

1.2. Những đóng góp của bài báo

Để giải quyết các vấn đề ở trên, trong bài báo này chúng tôi trình bày một thuật toán thủy vân rỗng mới dựa trên miền tần số kết hợp (DWT và DCT) với kỹ thuật đối sánh các điểm đặc trưng quan trọng để khôi phục lại các ảnh đã bị tấn công trước khi trích xuất thủy vân. Trong lược đồ của chúng tôi, trước tiên ảnh gốc được phân tách thành ba thành phần (Y, Cr, Cb). Sau đó, thành phần Y sẽ được sử dụng để trích xuất đặc trưng bằng cách áp dụng DWT 3 mức trên đó để nhận được băng con LL3, sau đó biến đổi DCT trên băng con LL3 và tiến hành nhị phân hóa để tạo ra MS của ảnh gốc. Sau khi tiến hành biến đổi Arnold trên thủy vân, giá trị OS được sinh ra bằng cách áp dụng phép toán XOR giữa thủy vân đã bị xáo trộn và MS. Theo đó, những đóng góp chính của bài báo được trình bày dưới đây:

(1) Đề xuất số lượng điểm đặc trưng bền vững cần sử dụng để khôi phục ảnh đã bị tấn công: Các phương pháp thủy vân rỗng luôn trích xuất các đặc trưng nội tại để tạo ra các MS. Sau đó, thủy vân rỗng (OS) được tạo ra bằng việc mã hóa MS với thủy vân sử dụng phép toán XOR. Tuy nhiên, khi ảnh gốc bị xử lý bởi các tấn công như thêm nhiễu, nén JPEG, đặc

biệt là các thấn công hình học (xoay ảnh, lấy tỷ lệ, dịch chuyển ảnh - RST), các đặc trưng nội tại của ảnh cũng sẽ bị thay đổi. Do đó, thủy vân rỗng không được trích xuất một cách chính xác. Để khôi phục ảnh đã bị tấn công, chúng tôi đề xuất sử dụng các điểm đặc trưng (*e.g*, SIFT [19], SURF [20], KAZE [16], AKAZE [21], ORB [22], ...) để đối sánh, sau đó khôi phục lại ảnh đã bị tấn công. Tuy nhiên, để đáp ứng yêu cầu ứng dụng thực tế, chúng tôi không thể lưu trữ ảnh gốc trong cơ sở dữ liệu. Chúng tôi đề xuất phương pháp tính toán để xác định số lượng điểm đặc trưng tối thiểu cần lưu trữ trong cơ sở dữ liệu để sử dụng cho việc đối sánh đặc trưng và khôi phục lại ảnh đã bị tấn công mà không cần sử dụng tới ảnh gốc.

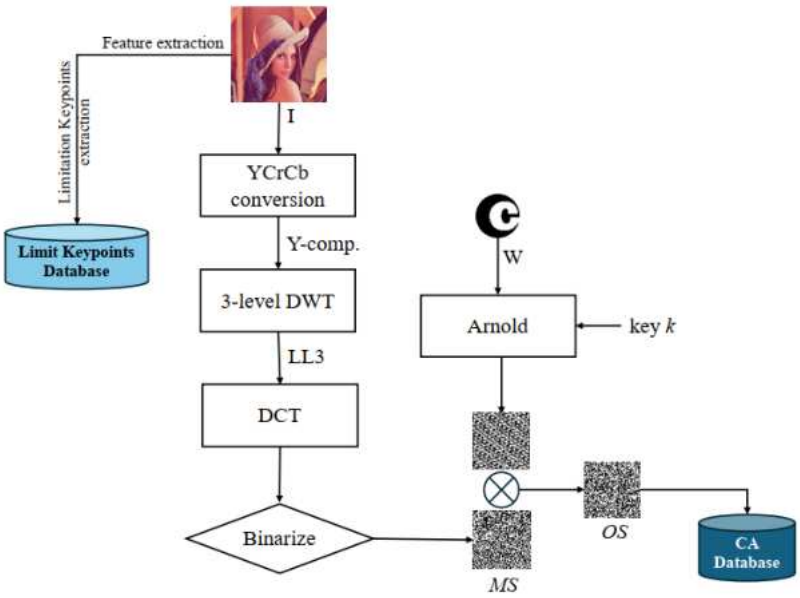
(2) Đề xuất phương pháp ước lượng các tham số của tấn công RST dựa trên kỹ thuật đối sánh các điểm đặc trưng: Hầu hết các thuật toán thủy vân rỗng trích xuất MS dựa trên các đặc trưng nội tại. Chúng không xem xét để khôi phục lại các ảnh đã bị tấn công để trích xuất thủy vân. Bởi vậy, các thuật toán này không bền vững trước các tấn công hình học. Để cải thiện tính bền vững của thuật toán, chúng tôi đề xuất một quy trình mới để tự động ước lượng các tham số của tấn công RST như góc xoay α, hệ số tỷ lệ β, và các tọa độ dịch chuyển (Δx, Δy). Quy trình được đề xuất có thể cải thiện tính bền vững của thuật toán thủy vân rỗng.

(3) Chứng minh tính hiệu quả của thuật toán đề xuất trên ảnh màu: Chúng tôi áp dụng phương pháp đã đề xuất trên ảnh màu để chỉ ra phương pháp của chúng tôi phù hợp với các ứng dụng thực tế. Dựa trên kết quả thực nghiệm, thuật toán do chúng tôi đề xuất được xác định bền vững trước các tấn công xử lý ảnh thông dụng, như tấn công nhiễu, lọc, nén JPEG, xén ảnh và các tấn công hình học như xoay ảnh, lấy tỷ lệ và dịch chuyển ảnh.

2. Phương pháp được đề xuất

Phương pháp thủy vân rỗng của chúng tôi được chia thành hai giai đoạn: quá trình sinh thủy vân rỗng và quá trình xác thực bản quyền. Việc sinh thủy vân rỗng là quá trình trích xuất các đặc trưng nội tại của ảnh gốc để tạo ra MS. Việc xác minh thủy vân rỗng là để xác định bản quyền của ảnh gốc.

A. Quá trình sinh thủy vân rỗng



Hình 1. Quá trình sinh thủy vân rỗng

Thủy vân gốc là một ảnh nhị phân W với kích thước $N \times N$, ảnh gốc là một ảnh màu I với kích thước $M \times M$. Hình 1 diễn tả thủ tục sinh thủy vân rỗng. Các bước này được mô tả như ở dưới đây:

(1) I được biến đổi sang miền YCbCr. Chỉ thành phần Y được sử dụng để trích xuất các đặc trưng nội tại của ảnh I.

(2) Áp dụng biến đổi DWT 3 mức trên thành phần Y để nhận được băng con LL3 với kích thước bằng với kích thước của thủy vân gốc.

(3) Biến đổi DCT trên ảnh LL3, sau đó tiến hành nhị phân hóa trên ảnh DCT thu được để sinh ra đặc trưng master share MS.

(4) Để tăng tính bí mật của thủy vân W, chúng tôi áp dụng biến đổi Arnold [23] với khóa k on W để xáo trộn thủy vân gốc thành, Wk. Trong thực nghiệm, kích thước thủy vân là 64×64, do đó số vòng lặp là 48 và $k \in [1, 48]$.

(5) Áp dụng phép toán XOR giữa MS và Wk để nhận được thủy vân rỗng OS.

$$OS = MS \oplus W_k \quad (1)$$

Thủy vân rỗng OS được đăng ký với Văn phòng bản quyền Copyright Department (CD) để xác định quyền sở hữu khi xảy ra tranh chấp.

(6) Để khôi phục ảnh bị tấn công, chúng tôi sử dụng các đặc trưng SIFT/KAZE/AKAZE/ORB để trích xuất các điểm đặc trưng bền vững (keypoints) để đối sánh các điểm đặc trưng nhằm khôi phục lại ảnh bị tấn công. Số điểm đặc trưng giới hạn Pi, i = 1, 2, ..., L được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu các keypoints, trong đó L là số lượng ít nhất các keypoints cần lưu trữ. Trong bài báo, chúng tôi sẽ đi tìm giá trị nhỏ nhất của L.

Theo các bước ở trên, quá trình sinh thủy vân rỗng OS của chúng tôi kết thúc với việc kết hợp các đặc trưng nội tại của ảnh gốc (MS) với các thông tin thủy vân đã bị xáo trộn (Wk). CD sẽ lưu trữ OS trong cơ sở dữ liệu chứng chỉ xác thực (CA database) để quản lý bản quyền.

B. Xác minh thủy vân rỗng

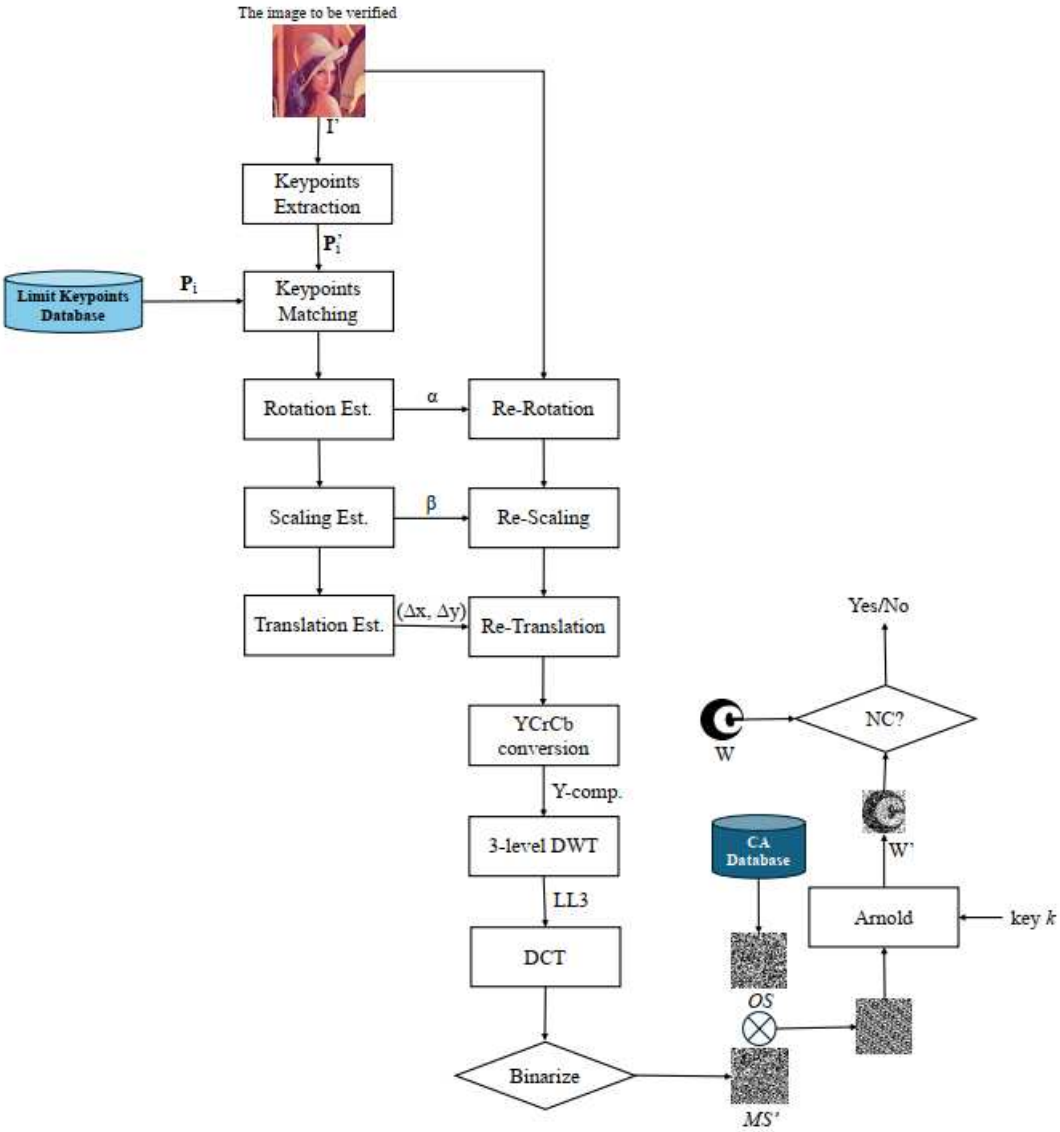
Quá trình xác minh thủy vân rỗng của chúng tôi được sử dụng để xác định thủy vân của ảnh đã bị tấn công. Hình 2 trình bày các bước của quá trình này, được mô tả như sau:

(1) Để khôi phục ảnh đã bị tấn công, các tham số RST (góc xoay α, hệ số tỷ lệ β, và tọa độ đã dịch chuyển (Δx, Δy)) sẽ được ước lượng từ ảnh bị tấn công. Cách ước lượng các tham số này có thể tham khảo ở bài báo [24], [25]. Tiến trình ước lượng được thực hiện bằng việc ước lượng góc xoay ảnh α, hệ số tỷ lệ β, và các tọa độ dịch chuyển (Δx, Δy).

Sau khi ước lượng toàn bộ các tham số RST, ảnh bị tấn công cần được khôi phục lại sử dụng các tham số đã ước lượng trước khi sử dụng để trích xuất thủy vân rỗng. Việc khôi phục ảnh được thực hiện như sau:

$$\begin{aligned} I_r &= Re_R(I', \alpha), \\ I_{rs} &= Re_S(Ir, \beta), \quad (2) \\ I_{rst} &= Re_T\,(Irs, (\Delta x, \Delta y)), \end{aligned}$$

trong đó I_r, I_{rs}, I_{rst} tương ứng là ảnh đã được xoay lại từ I', ảnh đã lấy lại tỷ lệ từ Ir, ảnh đã dịch chuyển lại từ Irs. Các hàm ReR(.), ReS(.), ReT (.) tham khảo từ các hàm biến đổi hình học ảnh của OpenCV1.



Hình 2. Quá trình xác minh thủy vân rỗng

(2) I*rst* được biến đổi sang miền YCbCr. Thành phần Y được sử dụng để trích xuất các đặc trưng nội tại của ảnh I*rst*.

(3) Thành phần Y được áp dụng biến đổi DWT 3 mức để nhận được băng con LL3 với kích thước bằng với W*k*.

(4) Áp dụng DCT trên ảnh LL3, sau đó nhị phân hóa kết quả để nhận được đặc trưng MS'.

(5) Để xác minh bản quyền, CD sử dụng thủy vân rỗng OS đã đăng ký từ CA database để giải mã với MS' bằng phép toán XOR:

$W k' = MS' \oplus OS$ (3)

(6) Để nhận được thủy vân bí mật W ′, chúng tôi áp dụng biến đổi Arnold với khóa k trên W*k*′.

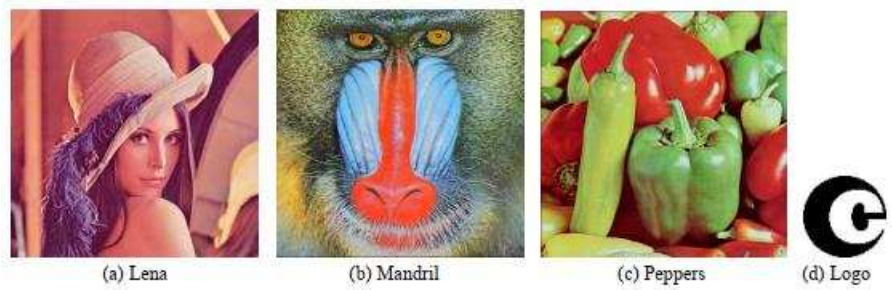
(7) Cuối cùng, để xác minh bản quyền của I′, giá trị tương quan chuẩn hóa (NC) được tính toán để quyết định bản quyền của hình ảnh.

Theo giai đoạn xác minh, phương pháp đề xuất có thể xác minh bản quyền của ảnh số ngay cả khi hình ảnh đã bị tấn công.

3. Kết quả thực nghiệm và phân tích

Môi trường thực nghiệm của chúng tôi được thiết lập trên máy tính Mac với cấu hình như sau: Hệ điều hành MacOS Monteray Version 12.3, 16 GB RAM, ngôn ngữ Python và nền tảng jupyter notebook để tiến hành thực nghiệm. Chúng tôi sử dụng Python version 3.6.13, các thư viện sklearn 0.24.2, tensorFlow 2.6.2, numpy 1.19.2, pandas 1.1.5, và các công cụ khác để phân tích các kết quả thực nghiệm.

Từ tập dữ liệu ảnh màu nổi tiếng USC-SIPI2, chúng tôi chọn ra ba ảnh màu với kích thước $M \times M = 512 \times 512$ pixels làm các ảnh gốc, được thể hiện ở Hình 3(a-c). Chúng tôi cũng lựa chọn một ảnh logo nhị phân làm ảnh thủy vân như ở Hình 3(d).

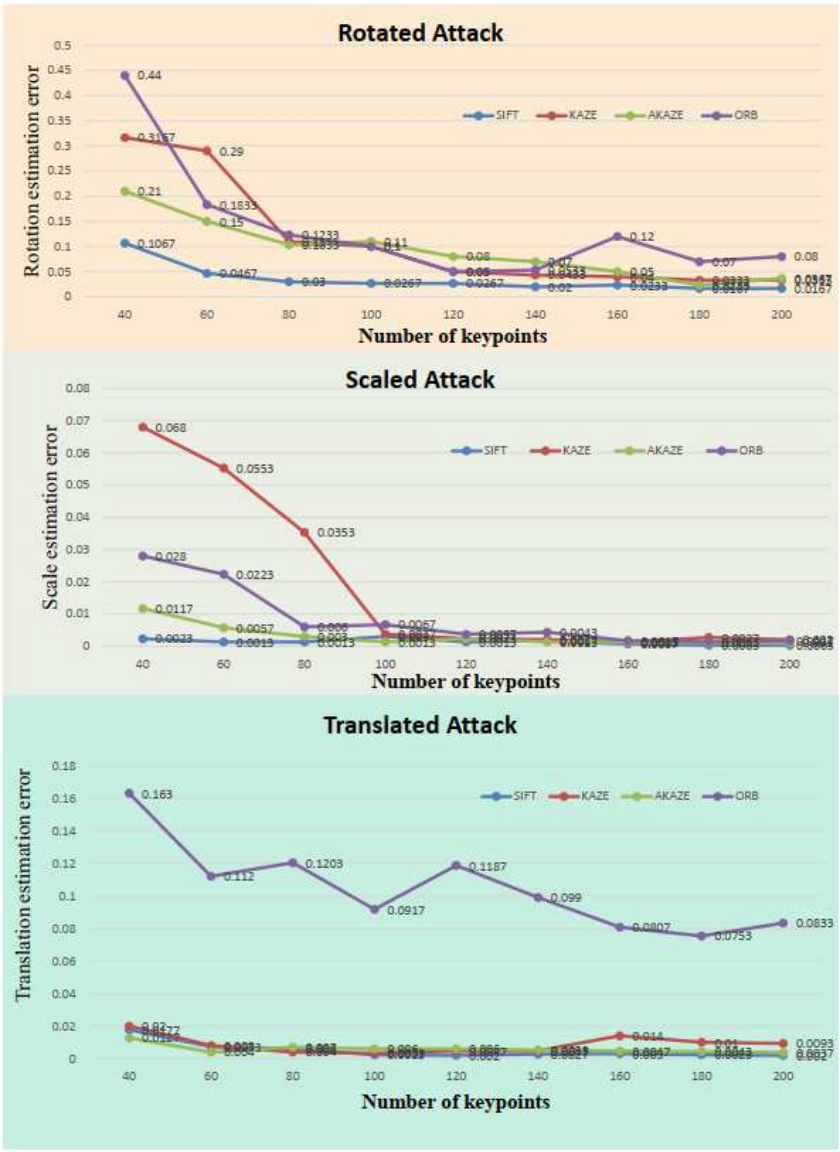


Hình 3. Ba ảnh màu gốc để thực nghiệm (a-c) và ảnh thủy vân (d)

Để đánh giá chất lượng của ảnh, chúng tôi sử dụng độ đo tỷ lệ nhiễu trên đỉnh (PSNR) [23]. Chúng tôi cũng đánh giá độ bền vững của thuật toán đề xuất bằng giá trị đo tương quan chuẩn hóa NC [23] giữa thủy vân được trích xuất và thủy vân gốc.

Chúng tôi thực hiện nhiều tấn công hình học trên các ảnh gốc để đánh giá độ bền vững của thuật toán thủy vân rỗng được đề xuất. Các tấn công như xoay ảnh (5◦, 10◦, 15◦, 20◦, 25◦, 30◦), lấy tỷ lệ (70%, 80%, 90%, 110%, 120%), dịch chuyển ảnh (Δx =10, 20, 30, 40) được thực hiện trên tập các ảnh màu đã chọn.

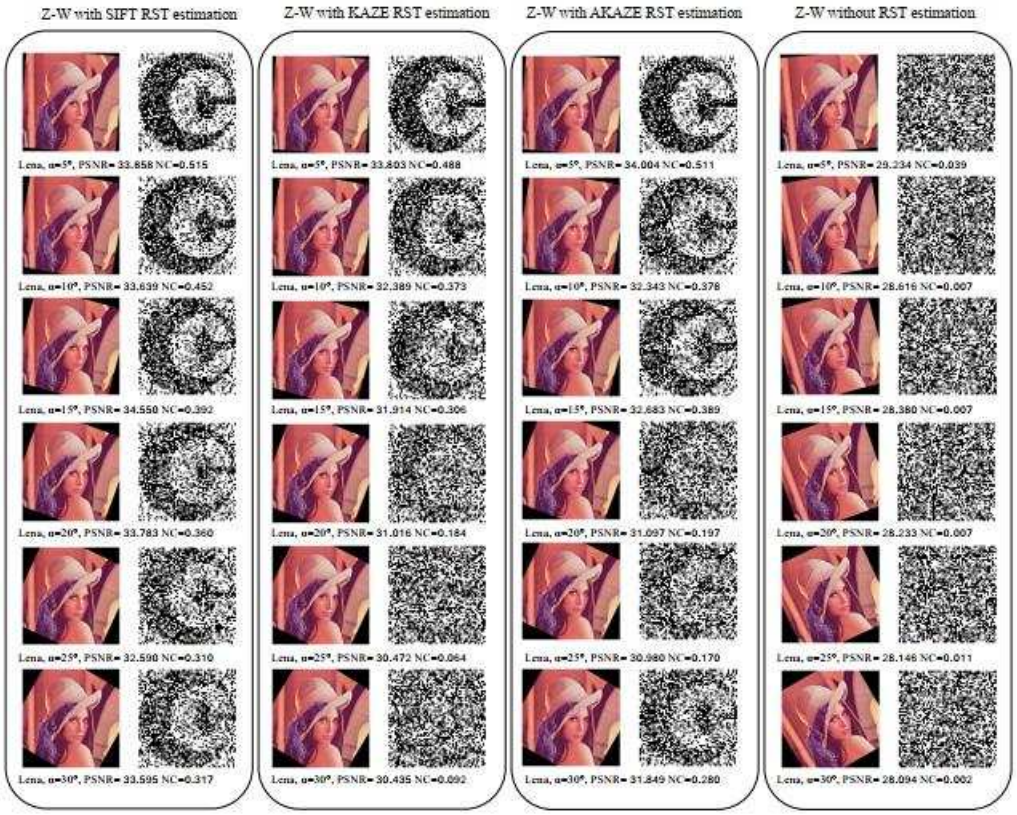
Trước tiên, chúng tôi tấn công các ảnh gốc bằng các phép biến đổi hình học (RST). Chúng tôi tiến hành thực nghiệm với số lượng điểm đặc trưng (keypoints) từ 40 đến 200 điểm. Các điểm đặc trưng này không được chọn một cách ngẫu nhiên mà được lựa chọn dựa trên khoảng cách từ điểm đó tới tâm ảnh, theo thứ tự ưu tiên chọn các điểm gần tâm ảnh với lý do các điểm đặc trưng này sẽ có khả năng được bảo toàn cao hơn sau các phép tấn công hình học như xoay ảnh, lấy tỷ lệ và dịch chuyển ảnh. Sau đó chúng tôi ước lượng các tham số RST và tính toán sai số trung bình của các ước lượng trên toàn bộ tập ảnh đầu vào. Giá trị sai số trung bình của các ước lượng được chỉ ra trong Hình 4.



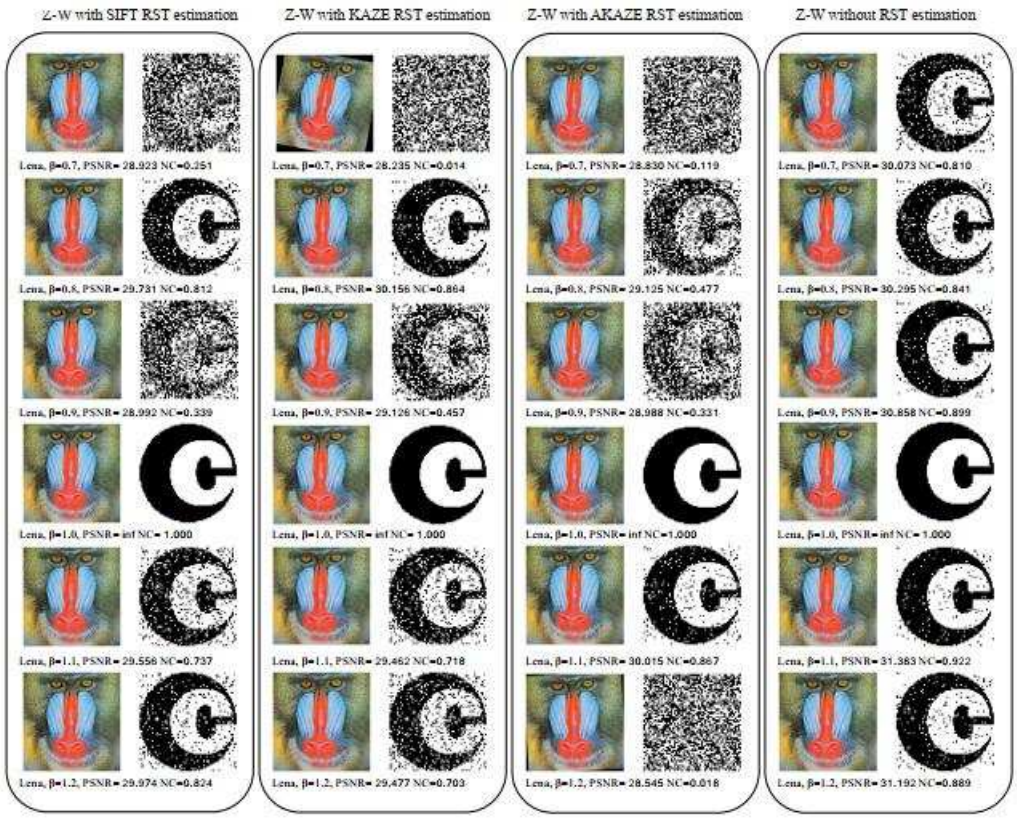
Hình 4. Sai số trung bình của ước lượng RST theo số điểm đặc trưng

Dựa trên kết quả thực nghiệm, ta thấy rằng nếu số điểm đặc trưng được sử dụng càng lớn thì việc ước lượng các tham số RST sẽ càng chính xác. Tuy nhiên, do giá trị sai số dự đoán cũng rất nhỏ khi số điểm đặc trưng là 40 điểm nên chúng tôi quyết định sử dụng 40 điểm đặc trưng từ ảnh gốc để khôi phục các ảnh bị tấn công.

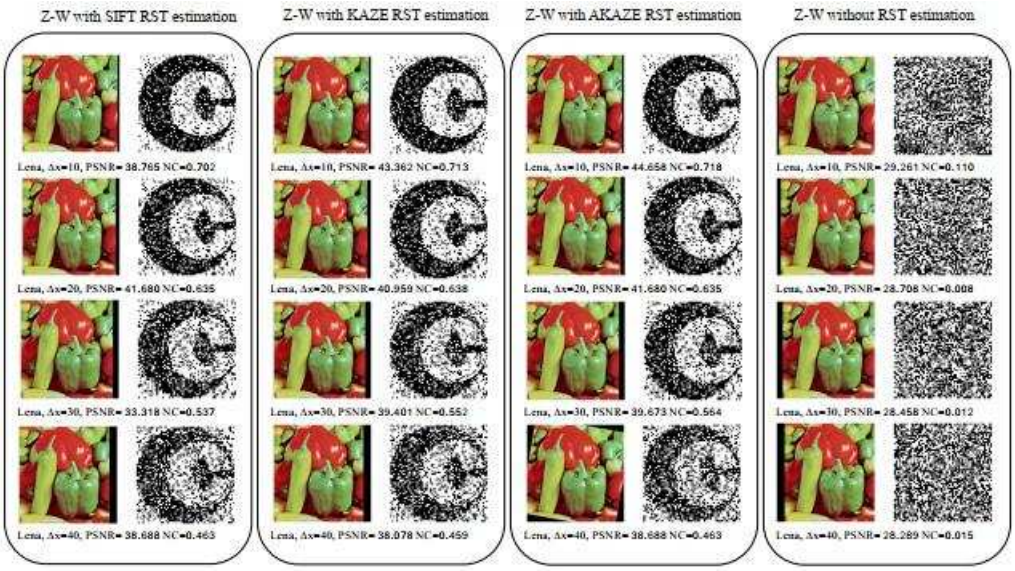
Chúng tôi so sánh phương pháp thủy vân rỗng do chúng tôi đề xuất kết hợp với ước lượng RST và phương pháp này khi không kết hợp với ước lượng RST. Các kết quả chỉ ra ở Hình 5, 6, and 7. Dựa trên các kết quả thu được, có thể khẳng định rằng sau khi áp dụng quy trình tự động ước lượng các tham số RST để khôi phục ảnh bị tấn công trước khi trích xuất thủy vân, các thủy vân rỗng được trích xuất với chất lượng tốt hơn hẳn so với khi không sử dụng ước lượng RST. Điều này là do các tấn công xoay ảnh, lấy tỷ lệ, dịch chuyển ảnh sẽ làm mất đồng bộ quá trình tìm kiếm thủy vân.



Hình 5. So sánh phương pháp của chúng tôi khi sử dụng ước lượng RST với khi không sử dụng ước lượng RST (Tấn công xoay ảnh).



Hình 6. So sánh phương pháp của chúng tôi khi sử dụng ước lượng RST với khi không sử dụng ước lượng RST (Tấn công lấy tỷ lệ).



Hình 7. So sánh phương pháp của chúng tôi khi sử dụng ước lượng RST với khi không sử dụng ước lượng RST (Tấn công dịch chuyển ảnh).

Phương pháp của chúng tôi có thể đồng bộ vị trí của các ảnh đã bị tấn công trước khi trích xuất thủy vân.

4. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất một lược đồ thủy vân rỗng cho ảnh màu dựa trên miền tần số DWT-DCT và biến đổi Arnold cùng với việc tự động ước lượng các tham số RST dựa trên kỹ thuật đối sánh các điểm đặc trưng để khôi phục lại ảnh đã bị tấn công dựa trên số lượng điểm đặc trưng hữu hạn được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu. Các kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng thuật toán do chúng tôi đề xuất bền vững trước các tấn công xử lý ảnh thông dụng, đặc biệt là các tấn công hình học. Trong tương lai, chúng tôi sẽ tiến hành thực nghiệm thuật toán trên bộ dữ liệu lớn hơn, đồng thời so sánh tính bền vững cũng như thời gian xử lý của thuật toán với các thuật toán thủy vân rỗng khác. Chúng tôi cũng sẽ tiếp tục nghiên cứu để cải thiện tính bảo mật và bền vững của thuật toán nhằm đáp ứng tốt cho các hệ thống thực tế như các ứng dụng trong lĩnh vực y tế, quốc phòng an ninh, ...

Tài liệu tham khảo

[1] L. Kumari, P. K. Singh, and M. Chandra, “Password-protected lossless visible watermarking technique for digital image,” in Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies, P. K. Singh, S. T. Wierzchon', J. K. Chhabra, and S. Tanwar, Eds. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 419–431.

[2] Z. Gong, N. Qin, and G. Zhang, “Visible watermarking in document images using two-stage fuzzy inference system,” Vis. Comput., vol. 38, no. 2, p. 707–718, feb 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00371-020-02045-7

[3] D. G. Savakar and A. Ghuli, “Robust invisible digital image watermarking using hybrid scheme,” Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 44, pp. 3995 – 4008, 2019. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139710980

[4] E. Hatami, H. Rashidy Kanan, K. Layeghi, and A. Harounabadi, “An optimized robust and invisible digital image watermarking scheme in contourlet domain for protecting rightful ownership,” Multimedia Tools Appl., vol. 82, no. 2, p. 2021–2051, jun 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11042-022-13197-0

[5] M. Begum, S. B. Shorif, M. S. Uddin, J. Ferdush, T. Jan, A. Barros, and M. Whaiduzzaman, “Image watermarking using discrete wavelet transform and singular value decomposition for enhanced imperceptibility and robustness,” Algorithms, vol. 17, no. 1, 2024.
[Online]. Available: https://www.mdpi.com/1999-4893/17/1/32

[6] A. P. Mayssa Tayachi, Laurent Nana and F. Benzarti, “A zerowatermarking approach for dicom images authentication based on jacobian model,” Information Security Journal: A Global Perspective, vol. 0, no. 0, pp. 1–20, 2024.
[Online]. Available: https://doi.org/10.1080/19393555.2024.2337732

[7] A. Daoui, H. Karmouni, M. Sayyouri, and H. Qjidaa, “Robust 2d and 3d images zero - watermarking using dual hahn moment invariants and sine cosine algorithm,” Multimedia Tools Appl., vol. 81, no. 18, p. 25581–25611, jul 2022.
[Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11042-022-12298-0

[8] N. Ren, S. Guo, C. Zhu, and Y. Hu, “A zero-watermarking scheme based on spatial topological relations for vector dataset,” Expert Systems with Applications, vol. 226, p. 120217, 2023.
[Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417423007194

[9] X. Xi, Y. Hua, Y. Chen, and Q. Zhu, “Zero-watermarking for vector maps combining spatial and frequency domain based on constrained delaunay triangulation network and discrete fourier transform,” Entropy, vol. 25, no. 4, 2023.
[Online]. Available: https://www.mdpi.com/1099- 4300/25/4/682

[10] B. Zou, J. Du, X. Liu, and Y. Wang, “Distinguishable zero-watermarking scheme with similarity-based retrieval for digital rights management of fundus image,” Multimedia Tools Appl., vol. 77, no. 21, p. 28685–28708,nov 2018.

[11] J. Yang, K. Hu, X. Wang, H. Wang, Q. Liu, and Y. Mao, “An efficient and robust zero watermarking algorithm,” Multimedia Tools Appl., vol. 81, no. 14, p. 20127–20145, jun 2022.
[Online]. Available:https://doi.org/10.1007/s11042-022-12115-8

[12] K. Hu, X. Wang, J. Hu, H. Wang, and H. Qin, “A novel robust zero-watermarking algorithm for medical images,” Vis. Comput., vol. 37, no. 9–11, p. 2841–2853, sep 2021.
[Online]. Available:https://doi.org/10.1007/s00371-021-02168-5

[13] X.-b. Kang, G.-f. Lin, Y.-j. Chen, F. Zhao, E.-h. Zhang, and C.-n. Jing, “Robust and secure zero-watermarking algorithm for color images based on majority voting pattern and hyper-chaotic encryption,” Multimedia Tools Appl., vol. 79, no. 1–2, p. 1169–1202, jan 2020.
[Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11042-019-08191-y

[14] T. M. Thanh and G. N. Dan, “Pseudo zero-watermarking technique based on non-blind watermarking and vss,” Multimedia Tools Appl., vol. 81, no. 20, p. 29119–29136, aug 2022.
[Online]. Available:https://doi.org/10.1007/s11042-022-12079-9

[15] D. Zheng, Y. Liu, J. Zhao, and A. E. Saddik, “A survey of rst invariant image watermarking algorithms,” ACM Comput. Surv., vol. 39, no. 2, p. 5–es, jul 2007.
[Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1242471.1242473

[16] T. M. Thanh, P. T. Hiep, T. M. Tam, and K. Ryuji, “Frame-patch matching based robust video watermarking using kaze feature,” in 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), 2013, pp. 1–6

[17] P.-P. Niu, L. Wang, F. Wang, H.-Y. Yang, and X.-Y. Wang, “Fast quaternion log-polar radial harmonic fourier moments for color image zero-watermarking,” J. Math. Imaging Vis., vol. 64, no. 5, p. 537–568, jun 2022.
[Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10851-022-01084-0

[18] H. Shi, S. Zhou, M. Chen, and M. Li, “A novel zero-watermarking algorithm based on multi-feature and dna encryption for medical images,” Multimedia Tools Appl., vol. 82, no. 23, p. 36507–36552, mar 2023.
[Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11042-023-15074-w

[19] D. G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,”International Journal of Computer Vision, vol. 60, pp. 91–110, 2004.
[Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:174065

[20] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Speededup robust features (surf)," Computer Vision and Image Understanding, vol. 110, no. 3, pp. 346–359, 2008, similarity Matching in Computer Vision and Multimedia.
[Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314207001555

[21] P. F. Alcantarilla, J. Nuevo, and A. Bartoli, "Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces," in British Machine Vision Conference, 2013. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:8488231

[22] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, "Orb: An efficient alternative to sift or surf," in 2011 International Conference on Computer Vision, 2011, pp. 2564–2571.

[23] P. T. Nha and T. M. Thanh, "A new block selection strategy from lu decomposition domain for robust image watermarking," Multimedia Tools and Applications, jul 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11042-023-16254-4

[24] W. Tang, F. Jia, and X. Wang, "Image large rotation and scale estimation using the gabor filter," Electronics, vol. 11, no. 21, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2079-9292/11/21/3471

[25] T. M. Thanh, P. T. Hiep, T. M. Tam, and K. Tanaka, "Robust semi-blind video watermarking based on frame-patch matching," AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 68, no. 10, pp. 1007–1015, 2014.
[Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841114001393

❑

Visible and infrared image fusion for UAV-based object detection: A survey

Nguyen Thi Lan[1], Cao Truong Tran[1]

[1]*Institute of Information and Communication Technology, Le Quy Don Technical University*

[*] *Email: lannt.simtech@lqdtu.edu.vn, Contact number: 0961700989*

Abstract

UAV-based object detection is vital for applications like surveillance, disaster management, and military operations. Traditional methods often face challenges under poor lighting and occlusions. Recent research addresses these issues by fusing visible and infrared images, combining the strengths of both modalities: visible images provide detailed texture and color, while infrared images are resilient to lighting variations and can reveal hidden objects. Despite growing interest, there is a lack of surveys focused on this domain. This paper reviews state-of-the-art visible and infrared image fusion (VIF) methods for UAV-based detection, covering pixel-level, feature-level, and decision-level fusion, with an emphasis on deep learning-based approaches. Benchmark datasets are analyzed, challenges discussed, and future research directions outlined. The study also re-evaluates existing models, demonstrating that multi-modal fusion outperforms single-modality methods. Advanced techniques, particularly those incorporating deep learning and transformers, show strong potential for improved detection in complex scenarios. This survey provides valuable insights for researchers in VIF and UAV-based detection.

Keywords: *Object detection, deep learning, multi-modal fusion, image fusion, transformer.*

1. Introduction

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become indispensable tools across diverse applications such as surveillance, disaster response, and military operations, thanks to their ability to capture high-resolution imagery over expansive areas. Object detection in UAV imagery plays a critical role in these applications, enabling actionable insights for decision-making. However, traditional object detection approaches face substantial challenges in complex environments, including poor lighting, occlusions, and variable weather conditions. These limitations highlight the need for more robust and adaptive methods capable of performing reliably in diverse and dynamic scenarios.

Recent research has shown that fusing visible (RGB) and infrared (IR) imagery significantly enhances object detection performance by leveraging the complementary strengths of these modalities. RGB images provide rich texture and color information crucial for detailed scene analysis but struggle in low-light or obscured settings. Conversely, IR images are robust to lighting variations and can reveal objects hidden in shadows or fog. By integrating these two modalities, image fusion methods combine their strengths, enabling more robust and accurate detection, especially in UAV-based applications where environmental variability is common.

Despite the increasing interest in image fusion for UAV object detection, there remains a gap in the literature. While general surveys on image fusion exist, they do not specifically address the challenges and requirements unique to UAV-based object detection. This paper bridges this gap by offering a comprehensive review of VIF techniques, with a particular emphasis on their application in UAV imagery. The survey categorizes existing methods into pixel-level, feature-level, and decision-level fusion strategies, with a special focus on deep learning-based approaches.

Additionally, the paper reviews publicly available benchmark datasets that reflect diverse environmental conditions and scenarios, providing a foundation for advancing research in the field. To further contribute to this domain, the study re-evaluates and implements state-of-the-art models, objectively comparing their performance to emphasize the superiority of multi-modal fusion over single-modal approaches. Finally, it highlights persistent challenges such as modality alignment, conflicts between RGB and IR images, the scarcity of annotated RGB-IR datasets, and the need for computational efficiency in real-time application.

In summary, this article makes the following contributions:

- Dedicated Survey: This is the first comprehensive survey focused on visible and infrared image fusion methods for UAV-based object detection.

- Dataset Analysis: It evaluates benchmark datasets and their relevance to real-world applications.

- Implementation and Comparison: Re-implementation and performance evaluation of state-of-the-art models, showcasing the benefits of multi-modal fusion methods over single-modal approaches.

- Future Directions: The paper identifies key challenges and potential research directions, highlighting how emerging technologies such as transformer-based architectures and advanced fusion strategies can address existing limitations.

By providing these insights, this paper aims to serve as a valuable reference for researchers seeking to explore or expand their work in this fast-evolving domain.

2. Visible and infrared image fusion techniques

VIF has become a critical technique in UAV-based object detection, enabling systems to leverage the complementary strengths of RGB and IR modalities. In UAV applications, fusion techniques can enhance object visibility in challenging conditions, improve detection robustness, and reduce errors due to lighting variations or occlusions. In this section, we review the primary fusion techniques, which are broadly categorized into pixel-level, feature-level, and decision-level fusion (figure 1). Each approach offers distinct advantages, tradeoffs, and challenges, and we discuss their applications and effectiveness in UAV-based remote sensing scenarios.

2.1. Pixel-level fusion

Pixel-level fusion combines RGB and IR images at the pixel level, creating a fused image by merging pixel values from each modality [1]. This approach employs various computational methods to integrate information from multiple images, broadly categorized into spatial domain fusion methods and transform domain fusion methods. Spatial domain methods, such as channel concatenation [2] and weighted averaging [3], directly manipulate pixel intensities to merge data from different modalities. Channel substitution [4] is another example, where specific channels are replaced to highlight critical features. Transform domain methods, on the other hand, involve converting the input images into a different domain, such as the frequency or wavelet domain, before performing fusion operations. Techniques like discrete wavelet transform (DWT) or discrete cosine transform (DCT) enable more nuanced integration of information by focusing on key frequency components. These methods strive to balance contributions from different modalities while preserving essential details.

The primary advantage of pixel-level fusion lies in its ability to fully exploit the rich information embedded within the images, capturing both global and detailed features without relying on pre-extracted details from higher levels, such as feature or region levels. However, this approach has notable limitations, including susceptibility to image misalignment [3], the risk of incorporating redundant or irrelevant information, and vulnerability to noise amplification. Addressing these challenges requires advanced techniques such as noise reduction, image sharpness enhancement, and precise alignment to improve the quality and accuracy of the fused images [1].

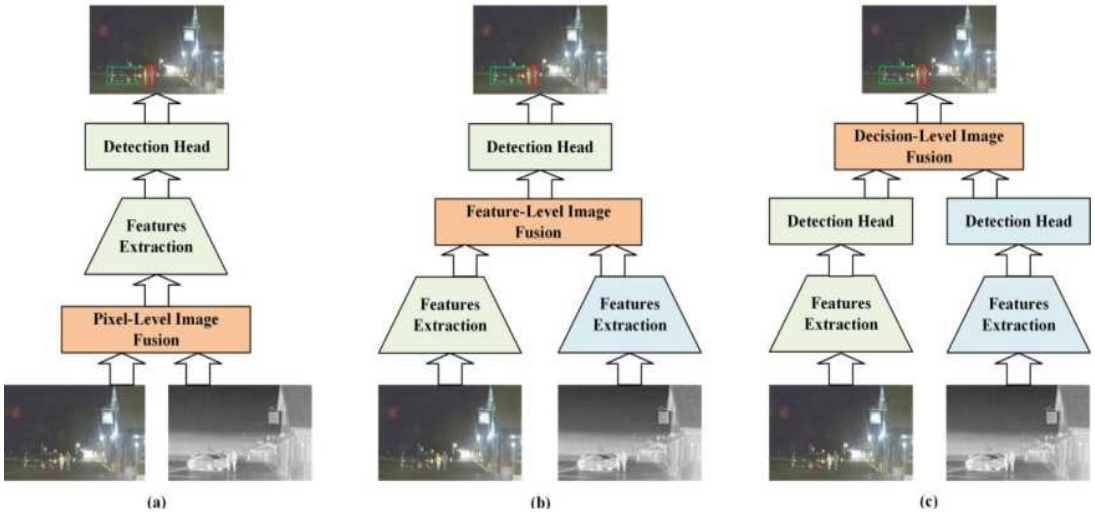


Fig.1. Three ways of fusing visible and infrared images in multimodal object detection task: (a) show pixel-level fusion, (b) show feature-level fusion, (c) show decision-level fusion [1].

2.2. Feature-level fusion

Feature-level fusion integrates information from RGB and IR images by combining features extracted at an intermediate level rather than raw pixel values [1]. This method leverages CNNs, which excel at identifying essential characteristics such as textures, edges, and shapes from each modality. Depending on the design, feature extraction can occur using a single shared CNN or two independent networks tailored to the specific properties of RGB and IR images. The resulting feature maps are then fused using approaches like feature concatenation, which stacks the channels to create a richer representation [5], or feature weighting [6], which balances contributions from each modality based on their importance. Attention mechanisms are often incorporated to refine feature maps by emphasizing critical regions and suppressing irrelevant or noisy data, enhancing the overall fusion process [1].

Feature-level fusion offers several key benefits over pixel-level methods. By focusing on feature representations, it minimizes the influence of noise and redundancy inherent in raw data, producing cleaner and more semantically meaningful results. The ability to integrate attention-based modules allows models to prioritize relevant information, significantly improving performance in complex tasks like object detection. Additionally, feature-level fusion provides flexibility for adapting task-specific architectures, making it a versatile choice for applications requiring robust integration of RGB and IR modalities. This capability is particularly valuable in scenarios with occlusions or poor lighting, where individual modalities may fail to provide reliable results [7, 8].

Despite its advantages, feature-level fusion also poses challenges. The extraction and fusion processes often demand significant computational resources, making real-time application challenging on resource-constrained platforms such as UAVs. Furthermore, the quality of the fused features heavily depends on the effectiveness of the underlying network architecture and the availability of high-quality training datasets. Inadequate data or poorly designed networks can result in suboptimal fusion performance, undermining its potential [7]. Balancing computational efficiency with the precision of feature representation remains a critical area of research to enhance the practicality of feature-level fusion in real-world applications [8].

2.3. Decision-level fusion

Decision-level fusion is a technique employed to combine information from IR and visible images at the final stage of processing, after feature extraction and classification. In this approach, each modality is processed independently, often using separate models or networks. These networks generate outputs such as confidence scores, object labels, or bounding box coordinates. Once the individual decisions are made, they are combined to form a final output. Common methods for this fusion include weighted fusion [9, 10], where the results from each network are summed with different weights, and decision combination [11], where the best bounding box from both modalities is selected based on the highest confidence score. This approach ensures that the strengths of both modalities are leveraged to provide the most accurate and reliable result in object detection tasks [1].

The primary advantage of decision-level fusion lies in its ability to combine the complementary strengths of different modalities, thereby enhancing robustness in challenging conditions. This approach is computationally efficient, as it operates on high-level outputs, which simplifies the fusion process compared to earlier-stage methods like feature-level fusion. Moreover, decision-level fusion provides flexibility by allowing the use of separate models or networks for each modality, enabling independent optimization for improved performance.

However, decision-level fusion faces several challenges. It may overlook valuable feature interactions available at earlier stages and relies heavily on the accuracy of individual classifiers. Errors from one modality can propagate to the final decision, especially if the fusion strategy lacks proper balancing. Additionally, while it enhances robustness, decision-level fusion may be less effective than feature-level fusion in complex tasks requiring deeper cross-modal interactions.

In summary, VIF enhances UAV-based object detection by leveraging RGB and IR images. Each method has unique advantages suited to different conditions and constraints. Advances in deep learning, especially transformer-based models, offer promising opportunities for more adaptive and effective fusion strategies in complex UAV applications.

3. Deep learning for visible and infrared image fusion in uav-based object detection

3.1. Motivation for using deep learning in VIF for UAV-based object detection

Deep learning has become a transformative approach in UAV-based object detection through RGB-IR image fusion. Traditional methods often rely on manually designed techniques for feature extraction and fusion, which struggle to handle the complexities of dynamic and diverse environments. These methods are limited by their reliance on handcrafted rules and

cannot easily adapt to challenging conditions like low visibility, poor lighting, or occlusions. In contrast, deep learning leverages powerful neural networks that learn intricate patterns directly from data, enabling automated and effective integration of RGB and infrared information. This results in improved detection accuracy and robustness in real-world scenarios.

In UAV-based object detection pipelines, deep learning supports fusion at multiple stages, including feature extraction, feature fusion, and decision-making. CNNs, in particular, excel at extracting complementary features from both RGB and infrared images. RGB images provide detailed information such as texture and edges, while infrared images capture thermal signatures, which are essential for identifying objects in low-light or obstructed environments. By combining these modalities, deep learning creates a comprehensive feature representation, enhancing the reliability and precision of object detection.

The primary motivation for adopting deep learning in RGB-IR image fusion lies in its ability to adapt to diverse environments and eliminate the limitations of manual feature engineering. Deep learning models unify the fusion and detection processes into a single framework, enabling end-to-end optimization. This approach not only improves detection accuracy but also ensures scalability and efficiency, making it particularly suitable for real-time UAV applications where speed and precision are critical.

A deep learning-based RGB-IR fusion system has three stages: feature extraction from RGB and infrared images, fusion for a unified representation, and object detection using networks like YOLO or Faster R-CNN. This approach enhances performance in complex UAV-based object detection.

3.2. Deep learning-based VIF methods

To the best of our knowledge, VEDAI [12], introduced in 2015, was the first aerial image database to include paired RGB and IR images. However, the dataset is relatively small in scale and lacks sufficient dark-night scenarios, limiting its ability to demonstrate the complementarity of the two modalities [13]. Furthermore, research utilizing this dataset has primarily focused on the challenge of small object detection rather than image fusion [14,15,16].

In 2022, the DroneVehicle dataset was introduced, featuring paired RGB and infrared images collected in various urban environments. This dataset supports research in cross-modal vehicle detection. It covers multiple modalities, diverse scenarios, varying lighting conditions, multiple viewing angles and heights, and includes a large number of finely annotated objects. DroneVehicle is the first and largest dataset capable of significantly advancing UAV-based RGB-infrared vehicle detection research [13].

Since the introduction of the DroneVehicle dataset, numerous in-depth studies on image fusion have emerged, aiming to enhance the effectiveness of UAV-based object detection. Notably, these image fusion techniques are predominantly based on deep learning approaches, with a strong emphasis on transformer architectures. These advancements have significantly contributed to improving the accuracy and robustness of object detection in UAV applications.

Therefore, this section will present deep learning-based image fusion methods developed from 2022 to the present in the field of UAV-based object detection, highlighting the latest advancements and their contributions to the domain.

To address the challenges of the self-constructed DroneVehicle dataset, Sun and colleagues proposed the uncertainty-aware cross-modality vehicle detection (UA-CMDet) framework [13], which extracts complementary information from RGB and Infrared images to significantly improve detection performance in low-light conditions. The framework includes an uncertainty-aware module (UAM) that quantifies the uncertainty weights of each modality based on the cross-modal Intersection over Union (IoU) and RGB illumination values. Additionally, an illumination-aware cross-modal non-maximum suppression (NMS) algorithm was developed to better integrate modality-specific information during inference. The input to UA-CMDet consists of a pair of RGB-Infrared images, which are processed by feature extractors (ResNet [17] in this case). The extracted feature maps are passed to a cross-modal fusion module, where they are concatenated along the channel dimension and processed by a 1×1 convolution for dimensionality reduction and cross-channel interaction. The resulting feature maps are then sent to their respective detection heads. This feature-level fusion method effectively combines RGB and Infrared feature maps, enhancing detection performance by integrating complementary information from both modalities in a simple yet effective manner.

Yuan et al. proposed a module [18] to tackle a critical challenge in integrating RGB and IR data for object detection, particularly in aerial imagery. Unlike natural RGB-IR datasets, aerial RGB-IR images experience weak cross-modal misalignment, characterized by deviations in position, size, and orientation of the same object across modalities. The authors offer a comprehensive analysis of the causes behind this misalignment and introduce the innovative Translation-Scale-Rotation Alignment (TSRA) module. This module addresses the issue by predicting and correcting misalignment through the alignment of feature maps from both modalities, employing a Modality-Selection (MS) strategy to further enhance alignment performance. Additionally, they present a two-stream feature alignment detector (TSFADet) built on the TSRA module, specifically designed for robust RGB-IR object detection in aerial imagery. Extensive experiments conducted on the DroneVehicle dataset validate the effectiveness of their approach, showing significant reductions in the effects of cross-modal misalignment and achieving accurate and stable detection results.

From 2023 onwards, numerous studies have explored the use of transformers to address challenges in UAV-based image fusion, highlighting the growing importance of advanced architectures in this field [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Among these, Yuan et al. propose C2Former [22], a novel Calibrated and Complementary Transformer, to address the challenges of modality miscalibration and fusion imprecision in RGB-IR object detection. The model introduces two key modules: the Inter-modality Cross-Attention (ICA) module, which learns cross-attention relationships to calibrate and extract complementary features between RGB and IR modalities, and the Adaptive Feature Sampling (AFS) module, which reduces computational cost by decreasing feature map dimensions.

Xiao et al. [19] introduced a novel approach that tackles the issue of semantic conflicts arising from the heterogeneity of RGB and IR data in multispectral object detection. Unlike traditional methods that rely on rudimentary accumulation operations, their Cross-modal Conflict-Aware Learning Network (CALNet) incorporates two innovative modules: the Cross-Modal Conflict Rectification (CCR) Module and the Selected Cross-Modal Fusion (SCF)

Module. The CCR module resolves semantic conflicts by analyzing the contextual information of analogous pixels, while the SCF module enhances fusion by selecting semantically rich features and mining complementary information across modalities. Integrated into a two-stream one-stage detector, CALNet demonstrates superior performance, as evidenced by its state-of-the-art accuracy and robust handling of cross-modal semantic conflicts.

In addition, there are several other notable studies proposed based on various methods such as GAN [26], attention [27, 28], distillation [29], and other techniques [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]. Among them, the model by Yuan stands out. Yuan et al. introduce E2E-MFD [38], a novel end-to-end algorithm for multimodal fusion detection aimed at addressing challenges in autonomous driving. While existing methods have made progress in fusing texture details and semantic information, they often involve complex training processes that limit their broader applicability. E2E-MFD overcomes this by simplifying the process into a single training phase and employing synchronous joint optimization across components, thereby avoiding the suboptimal solutions typically arising from treating tasks separately. Moreover, the algorithm incorporates a comprehensive optimization strategy within the gradient matrix for shared parameters, ensuring convergence to an optimal fusion-detection configuration.

3.3. Experiment on DroneVehicle dataset

We evaluated multi-modal object detection methods against single-modal approaches using the test set of the DroneVehicle dataset [13]. Experiments were conducted on a system equipped with a Tesla P40 GPU (23 GB VRAM) running driver version 535.183.01 and CUDA 12.2. Optimal parameters for each model were selected based on their respective publications to maximize performance. The CalNet model was trained for 50 epochs, while the remaining models were trained using the mmRotate framework for 12 to 14 epochs.

As shown in table 1, multi-modal methods consistently outperformed single-modal approaches. Single-modal methods achieved mAP scores ranging from 50% to 58% for RGB images and slightly higher scores of 65% to 70% for Infrared images. In contrast, multi-modal methods demonstrated significantly better performance, achieving mAP scores between 72% and 77%, representing approximately 15% higher performance than RGB-only results and 10% higher than Infrared-only results.

Table 1. Comparison of single and multi-modal methods on DroneVehicle dataset

Detectors	**Model Type**	**mAP**						**Modal**
		Car	**Truck**	**Freight**	**Bus**	**Van**	**mAP**	
R3Det	One-stage	75.8	41.4	31.5	74.7	27.1	50.1	RGB
S2ANet	One-stage	76.9	49.6	36.1	77.9	37.0	55.5	
Yolov5(l)-OBB	One-stage	85.0	49.6	37.9	80.8	28.6	56.4	
RoiTrans	Two-stage	78.0	51.3	38.7	78.7	39.9	57.3	
Oriented -RCNN	Two-stage	77.7	50.2	39.4	78.4	37.8	56.7	
Oriented-Reppoints	Two-stage	76.9	50.4	36.7	79.3	36.5	56.0	
R3Det	One-stage	89.7	56.7	44.9	86.5	36.3	62.8	Infrared
S2ANet	One-stage	89.9	64.1	51.3	88.7	40.6	66.9	
Yolov5(l)-OBB	One-stage	95.6	57.2	47.5	89.4	35.2	65.0	

RoiTrans	Two-stage	90.1	65.0	52.6	88.9	44.9	68.3	
Oriented -RCNN	Two-stage	90.1	64.4	53.3	88.6	42.2	67.7	
Oriented-Reppoints	Two-stage	90.1	63.5	51.5	87.4	41.9	68.8	
UA-CMDet	Two-stage	88.5	56.1	72.6	88.7	54.3	72.1	RGB+IR
C2Former	Two-stage	90.2	68.3	64.4	89.8	58.5	74.2	
E2E-MFD	Two-stage	90.3	79.3	64.6	89.8	63.1	77.4	
CalNet	One-stage	90.2	72.9	88.9	59.7	50.5	72.4	

Among the multi-modal approaches, the E2E-MFD method, leveraging Multi-task Learning, achieved the highest accuracy. Specifically, this method improved detection accuracy for various vehicle types, with mAP0.5 gains of 90.3% for cars, 79.3% for trucks, 64.6% for freight cars, 89.8% for buses, and 63.1% for vans. These findings highlight the significant advantages of integrating multi-modal data for achieving robust and accurate object detection in UAV-based applications.

4. Datasets for visible and infrared image fusion in uav-based object detection

The evaluation of RGB-IR image fusion techniques for UAV-based object detection relies on robust datasets and appropriate performance metrics to ensure reliable and meaningful assessments. Given the diversity of environments, object types, and challenges in UAV-based remote sensing, suitable datasets and metrics play a critical role in benchmarking and comparing fusion methods. This section provides an overview of commonly used RGB-IR datasets (Table 2) for UAV-based object detection, highlighting their key features to evaluate fusion techniques.

4.1. VEDAI Dataset

The Vehicle Detection in Aerial Imagery (VEDAI) dataset [12] is a well-established benchmark for vehicle detection in aerial imagery. Designed for evaluating object detection algorithms, it provides a diverse collection of RGB and IR images captured from UAVs or satellite platforms. The dataset emphasizes detecting small objects and occluded vehicles in complex environments, making it particularly challenging and valuable for research in remote sensing and UAV-based object detection.

The VEDAI dataset consists of 1,200 image pairs, each containing one RGB image and one infrared image. The dataset includes two different image sizes: 1,024 × 1,024 pixels and 512 × 512 pixels. A total of 1,733,678 vehicle instances are annotated across nine distinct classes. The vehicle types include cars, trucks, buses, and other common vehicles, making the dataset suitable for a wide range of vehicle detection tasks. The annotations include both bounding boxes and oriented bounding boxes, enabling the study of both traditional and oriented object detection methods.

Table 2. Datasets for object detection in RGB-I/T images captured from UAV

No.	Datasets	Scenario	Modality	Quantity	Year
1	VEDAI	Aerial	R+NI	1,200 pairs	2015
2	DroneVehicle	Drone	R+I	28,439 pairs	2021
3	RTDOD	UAV	R+T	16,200 pairs	2023
4	RGBTDronePerson	Drone	R+T	6,125 pairs	2023

The dataset poses several challenges, including small object sizes, varied orientations, and occlusions caused by reflections and shadows. These factors make it an ideal benchmark for testing algorithms that aim to handle multiscale, multi-directional, and complex environmental conditions.

4.2. DroneVehicle Dataset

The DroneVehicle dataset [13] serves as a benchmark for detecting vehicles in UAV aerial imagery. Captured under diverse lighting conditions, ranging from day to night, the dataset represents real-world scenarios with occlusions and significant scale variations. This makes it an ideal resource for evaluating object detection algorithms in complex environments.

The dataset comprises a total of 15,532 image pairs, amounting to 31,064 images. Each pair includes one RGB image and one IR image, ensuring an equal distribution between the two modalities. This multimodal composition facilitates the study of RGB-IR fusion techniques and their applications in UAV-based detection tasks. DroneVehicle provides annotations for 441,642 vehicle instances. These instances are categorized into five classes: car, truck, bus, van, and feright-car.

To account for different angles and orientations, the dataset utilizes oriented bounding boxes for annotating vehicles. These annotations enable precise localization and facilitate research into oriented object detection methods, which are critical for UAV imagery where objects often appear at arbitrary angles.

4.3. RTDOD dataset

The RGB-Thermal Domain-incremental Object Detection (RTDOD) dataset [39] is a comprehensive resource tailored for object detection in UAV applications, specifically designed to address the challenges of detecting objects under gradually changing weather conditions. It is intended to improve object detection performance in scenarios where objects appear in varying weather conditions, such as from sunny to foggy, evening, or night environments.

The dataset comprises 40 video streams captured simultaneously by a UAV equipped with both color and thermal cameras. RTDOD includes 16,200 RGB-T image pairs, meticulously annotated across 10 distinct object categories: people, animals, vehicles, and other common entities. Each object is annotated with bounding boxes, enabling precise object localization. The dataset includes diverse environmental conditions, with categories such as Sunny, Foggy, Evening, and Night, ensuring ample data coverage across different settings. Each environment contains at least 23,877 images, providing a robust training and testing dataset for evaluating object detection algorithms in a variety of real-world UAV scenarios.

The RTDOD dataset is notable for its incremental nature. The weather conditions gradually change over time, making it especially useful for detecting objects that emerge in response to changing environmental factors. The primary challenges of RTDOD include handling the domain gap between RGB and thermal modalities, as objects may appear differently in each modality due to lighting variations, weather conditions, and temperature differences. Additionally, the dataset captures various types of occlusions and partial visibility, further complicating detection tasks.

4.4. RGBTDronePerson dataset

The RGBTDronePerson dataset [40] is a pioneering large-scale benchmark designed for detecting individuals in RGB-Thermal (RGBT) imagery captured by drones. This dataset is specifically tailored for person detection in aerial imagery, addressing the challenges of detecting small objects in complex environments, with a particular focus on individuals in dynamic outdoor scenes. It provides a comprehensive testbed for evaluating the effectiveness of detection algorithms in multi-modal settings, using both RGB and thermal infrared images captured simultaneously by UAVs.

The RGBTDronePerson dataset consists of 6,125 pairs of RGBT images, with a total of 70,880 annotated instances. The images span a wide variety of scenes, capturing individuals in different lighting conditions and weather variations, which makes the dataset highly valuable for training and testing algorithms in real-world, unpredictable environments. The dataset includes scenes with individuals at varying distances, orientations, and levels of occlusion, creating a challenging setting for object detection tasks.

A key challenge of the RGBTDronePerson dataset is its small object size, averaging 11.7 pixels, with 98% of annotations under 20 pixels. This makes it ideal for evaluating small object detection algorithms, a critical issue in UAV-based monitoring.

4.5. DVTOD dataset

The DVTOD dataset [41] represents a significant advancement in the field of multispectral object detection, particularly for drone-based applications in real-world scenarios. Unlike existing datasets that rely on manually aligned visible-thermal image pairs, DVTOD adopts a novel approach by capturing inherently misaligned image pairs, which better reflect the complexities of practical deployments. This innovation makes it an excellent resource for developing and evaluating methods tailored to handle the challenges of misaligned multispectral object detection.

Comprising 2179 visible-thermal image pairs across 54 diverse scenes and 16 challenging attributes, DVTOD incorporates factors such as occlusion, extreme weather conditions (rain, snow, fog), varying illumination (darkness, extreme exposure), and special material occlusion. These attributes ensure a realistic and comprehensive representation of environmental conditions. Furthermore, the dataset's high-resolution images (1920×1080 for visible and 640×512 for thermal) guarantee the fine-grained details necessary for robust research and development.

A unique strength of DVTOD lies in its temporal diversity, with data collected across various times of day and all seasons, providing researchers with the opportunity to analyze temporal variations in multispectral detection performance. By combining challenging attributes, high-quality imagery, and temporal breadth, DVTOD emerges as a versatile and indispensable resource for advancing the state of the art in object detection under real-world conditions.

5. Key challenges and future directions

Despite significant advancements in RGB-IR image fusion techniques for UAV-based object detection, several key challenges persist. Addressing these challenges is essential for developing more robust, accurate, and efficient models capable of operating in complex and

dynamic environments. This section highlights the current obstacles and suggests promising future research directions to overcome these limitations and improve fusion methods for UAV applications.

5.1. Misalignment between RGB and IR Images

Misalignment between RGB and IR images remains a significant issue due to differences in sensor perspectives, resolutions, and environmental factors. This misalignment results in variations in the position, size, and orientation of objects across the two images (figure 3). Such inconsistencies can cause inaccuracies in fusion, especially at the pixel and feature levels, where spatial alignment is critical. While some methods attempt to pre-align images, dynamic misalignments that occur during UAV flights are especially challenging. Deep learning may offer potential solutions, as demonstrated by two studies [42, 43], which jointly learn image fusion and registration. These approaches could provide more robust and automated solutions for real-time alignment. Future research should focus on alignment-free fusion methods or models that are resilient to misalignment, incorporating techniques such as geometric transformations or spatial attention mechanisms [1, 44].

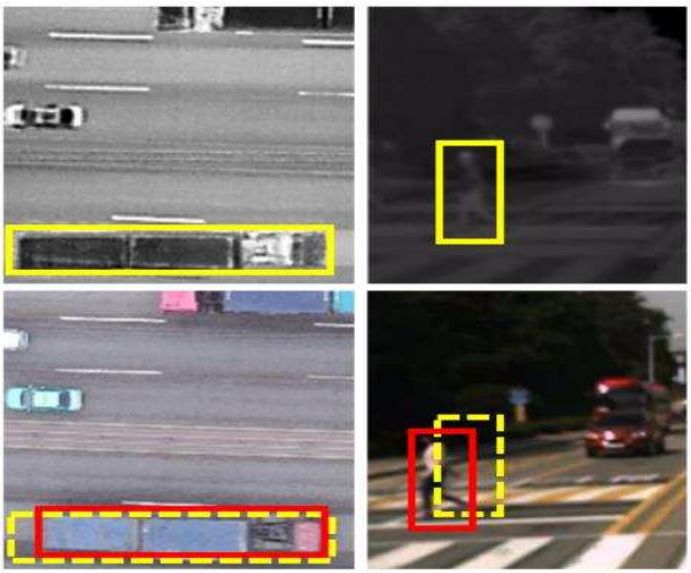


Fig. 3. An example of miscalibration between RGB and Infrared modalities. The yellow and red boxes represent annotations of same objects in the IR and RGB images, respectively

5.2. Conflict between RGB and Infrared Images

A critical challenge in RGB-IR fusion arises from the inherent differences between the two modalities. RGB images capture detailed textures and colors, providing rich visual information, while infrared images highlight thermal characteristics and are less sensitive to lighting variations, making them effective in low-light or night-time conditions. However, these differences can create conflicts during fusion, especially when the two modalities show inconsistent object appearances or varying contrasts due to environmental factors. This can result in loss of important information or the blending of false details, which hampers the quality of fusion [45]. To address this challenge, future research should focus on developing advanced fusion techniques that are capable of resolving conflicts between RGB and infrared data, enhancing the quality of the fused image while preserving critical information from both

modalities. Innovations in deep learning and attention mechanisms could play a key role in improving fusion quality by better handling modality-specific discrepancies [46].

5.3. Integration of Transformer-based Architectures

Transformer-based architectures have shown great potential in capturing long-range dependencies and contextual relationships, which could enhance feature extraction and integration in RGB-IR fusion. However, their computational demands pose challenges for deployment on UAVs. Research should explore efficient and lightweight transformer models tailored to UAV limitations [47]. Hybrid models combining CNNs and transformers [48] could offer a scalable solution, allowing for more efficient fusion while maintaining high performance, particularly in complex environments with high spatial diversity, such as urban or forested areas.

5.4. Limited Annotated RGB-IR Datasets

A significant limitation in RGB-IR fusion research is the lack of comprehensive, annotated RGB-IR datasets that reflect real-world UAV scenarios. Existing datasets often have limited object categories, viewing angles, and environmental conditions, restricting model generalization. Annotating such datasets is resource-intensive and requires careful alignment between the modalities [45]. Future work should prioritize the creation of large-scale, diverse datasets that capture various object types, environmental conditions, and altitudes, better reflecting the challenges UAVs face in real-world settings. Furthermore, semi-supervised or unsupervised learning methods could be explored to leverage unannotated data and promote more robust models.

5.5. Real-time Processing and Computational Efficiency

Real-time processing capabilities are crucial for UAV-based systems operating in resource-constrained environments. Deep learning-based fusion techniques often involve high computational demands, which makes it challenging to deploy these models on UAV platforms with limited computational power [45]. To address this, future research should focus on developing lightweight, efficient fusion models capable of processing RGB-IR data in real time, without compromising accuracy. This is particularly important for tasks such as object detection and tracking, where rapid decision-making is necessary.

6. Conclusion

This survey has provided a comprehensive review of state-of-the-art VIF methods for UAV-based object detection, addressing challenges such as poor lighting, occlusions, and misalignment between modalities. By leveraging the complementary strengths of visible and infrared images, these techniques enhance detection capabilities in complex environments.

We analyzed various fusion approaches, with a particular focus on deep learning-based methods and discussed benchmark datasets and persistent challenges. Notably, misalignment remains a significant obstacle, and the limited availability of annotated RGB-IR datasets further hinders progress in this field. Future research should prioritize the creation of comprehensive and diverse RGB-IR datasets, as well as explore innovative alignment techniques, lightweight architectures, and advanced technologies such as multimodal transformers to meet the unique demands of UAV applications. We expect that this study will serve as a valuable reference for

researchers, offering insights into current trends and inspiring further advancements in this rapidly evolving field.

References

[1] Yuxuan Sun, et al. (2023). Visible and infrared image fusion for object detection: A survey. In International Conference on Image, Vision and Intelligent Systems, pages 236-248.

[2] J¨org Wagner, Volker Fischer, et al. (2016). Multispectral pedestrian detection using deep fusion convolutional neural networks. In ESANN, volume 587, pages 509–514.

[3] Geoffrey French, et al (2018). Multi-spectral pedestrian detection via image fusion and deep neural networks. Journal of Imaging Science and Technology, pages 176–181.

[4] Maarten Vandersteegen, et al. (2018). Real-time multispectral pedestrian detection with a single-pass deep neural network. In Image Analysis and Recognition: 15th International Conference, ICIAR 2018, pages 419-426. Springer.

[5] Jung Uk Kim, et al. (2021). Uncertainty-guided cross-modal learning for robust multispectral pedestrian detection. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 32(3):1510-1523.

[6] Yan Zhang, et al. (2023). Illumination-guided rgbt object detection with inter-and intra-modality fusion. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 72:1–13.

[7] Yongyu Luo and Zhongqiang Luo (2023). Infrared and visible image fusion: Methods, datasets, applications, and prospects. Applied Sciences, 13(19):10891.

[8] Kechen Song, Ying Zhao, et al (2023). Rgb-t image analysis technology and application: A survey. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 120:105919.

[9] Yifan Zhuang, et al. (2021). Illumination and temperature-aware multispectral networks for edge-computing-enabled pedestrian detection. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 9(3):1282–1295.

[10] Qing Li, et al. (2022). Confidence-aware fusion using dempster-shafer theory for multispectral pedestrian detection. IEEE Transactions on Multimedia, 25:3420-3431.

[11] Zuhui Hu, et al. (2023). Decision-level fusion detection method of visible and infrared images under low light conditions. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing.

[12] Sebastien Razakarivony (2016). Vehicle detection in aerial imagery: A small target detection benchmark. Journal of Visual Communication and Image Representation, 187-203.

[13] Yiming Sun, et al. (2022). Drone-based rgb-infrared cross-modality vehicle detection via uncertainty-aware learning. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 32(10):6700–6713.

[14] Jiaqing Zhang, et al. (2023). Superyolo: Super resolution assisted object detection in multimodal remote sensing imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

[15] Yin Zhang, Mu Ye, et al. (2024). Ffca-yolo for small object detection in remote sensing images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

[16] Moran Ju, Jiangning Luo, et al. (2019). A simple and efficient network for small target detection. IEEE Access, 7:85771–85781.

[17] Kaiming He, et al. (2016). Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 770–778.

[18] Maoxun Yuan, et al. (2022). Translation, scale and rotation: cross-modal alignment meets rgb-infrared vehicle detection. In European Conference on Computer Vision, pages 509–525.

[19] Xiao He, et al. (2023). Multispectral object detection via cross-modal conflict-aware learning. In the 31st ACM International Conference on Multimedia, pages 1465–1474.

[20] Junlin Ouyang, et al. (2023). Multi-modal and cross-scale feature fusion network for vehicle detection with transformers. In 2023 International Conference on Machine Vision, Image Processing and Imaging Technology (MVIPIT), pages 175–180. IEEE.

[21] Shuai You, et al. (2023). Multi-scale aggregation transformers for multispectral object detection. IEEE Signal Processing Letters.

[22] Maoxun Yuan, et al. (2024). C2former: Calibrated and complementary transformer for rgb-infrared object detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

[23] Maoxun Yuan, et al. (2024). Improving rgb-infrared object detection with cascade alignment-guided transformer. Information Fusion, 105:102246.

[24] Yunfan Chen, et al. (2024). Transformer fusion-based scale-aware attention network for multispectral victim detection. Complex & Intelligent Systems, pages 1-14.

[25] Jiyuan Qiu, et al. (2024). Etformer: An efficient transformer based on multimodal hybrid fusion and representation learning for rgb-dt salient object detection. IEEE Signal Processing Letters.

[26] Chenhong Sui, et al. (2024). Ig-gan: Interactive guided generative adversarial networks for multimodal image fusion. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

[27] Sijie Hu, Fabien Bonardi, et al. (2024). Rethinking self-attention for multispectral object detection. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.

[28] Yuxuan Hu, et al. (2023). Dual attention feature fusion for visible-infrared object detection. In International Conference on Artificial Neural Networks, pages 53-65. Springer.

[29] Zhanchao Huang, et al. (2023). Multimodal knowledge distillation for arbitrary-oriented object detection in aerial images. In ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pages 1–5. IEEE.

[30] Zhilong Cui and Chongyang Zhang. (2024). Common extraction and distribution guided for weakly supervised rgb-ir vehicle detection. In 2024 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), pages 1–8. IEEE.

[31] Minghang Zhou, et al. (2024). Dmm: Disparity-guided multispectral mamba for oriented object detection in remote sensing. arXiv preprint arXiv:2407.08132.

[32] Jinpeng Wang, et al. (2024). Multi-modal object detection of uav remote sensing based on joint representation optimization and specific information enhancement. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.

[33] Simiao Wang, et al. (2024). Mask-guided mamba fusion for drone-based visible-infrared vehicle detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

[34] Jin Xie, et al. (2023). Cross-modal local calibration and global context modeling network for rgb-infrared remote sensing object detection. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.

[35] Hufei Zhu, et al. (2024). Unmanned aerial vehicle (uav) object detection algorithm based on keypoints representation and rotated distance-iou loss. Journal of Real-Time Image Processing, 21(2):58.

[36] Yuanfeng Wu, et al. (2023). Vehicle detection based on adaptive multi-modal feature fusion and cross-modal vehicle index using rgb-t images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.

[37] Xu Sun, et al. (2024). Low-rank multimodal remote sensing object detection with frequency filtering experts. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

[38] Jiaqing Zhang, et al. (2024). E2e-mfd: Towards end-to-end synchronous multimodal fusion detection. arXiv preprint arXiv:2403.09323.

[39] Hangtao Feng, et al. (2023). Rtdod: A large-scale rgb-thermal domain-incremental object detection dataset for uavs. Image and Vision Computing, 140:104856.

[40] Yan Zhang, et al. (2023). Drone-based rgbt tiny person detection. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 204:61–76.

[41] Kechen Song, et al. (2024). Misaligned visible-thermal object detection: A drone-based benchmark and baseline. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles.

[42] Di Wang, et al. (2022). Unsupervised misaligned infrared and visible image fusion via cross-modality image generation and registration. arXiv preprint arXiv:2205.11876.

[43] Han Xu, et al. (2022). Rfnet: Unsupervised network for mutually reinforcing multi-modal image registration and fusion. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, pages 19679–19688.

[44] Lu Zhang, et al. (2019). Weakly aligned cross-modal learning for multispectral pedestrian detection. In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pages 5127–5137.

[45] Khaled Bayoudh, et al. (2022). A survey on deep multimodal learning for computer vision: advances, trends, applications, and datasets. The Visual Computer, 38(8):2939–2970.

[46] Xingchen Zhang, et al. (2023). Visible and infrared image fusion using deep learning. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 45(8):10535–10554.

[47] Gracile Astlin Pereira and Muhammad Hussain. A review of transformer-based models for computer vision tasks: Capturing global context and spatial relationships. arXiv preprint arXiv:2408.15178, 2024.

[48] Willy Fitra Hendria, Quang Thinh Phan, Fikriansyah Adzaka, and Cheol Jeong. Combining transformer and cnn for object detection in uav imagery. ICT Express, 9(2):258–263, 2023.

Tổng quan về hợp nhất ảnh khả kiến và ảnh hồng ngoại trong bài toán phát hiện đối tượng trên ảnh UAV

Tóm tắt: *Phát hiện đối tượng dựa trên ảnh UAV đóng vai trò quan trọng trong các ứng dụng như giám sát, quản lý thảm họa và quân sự. Tuy nhiên, các phương pháp truyền thống thường gặp khó khăn khi điều kiện ánh sáng kém hoặc vật thể bị che khuất. Gần đây, việc kết hợp ảnh khả kiến và ảnh hồng ngoại đã được nghiên cứu nhằm tận dụng lợi thế của cả hai loại dữ liệu: Ảnh khả kiến cung cấp thông tin chi tiết về kết cấu và màu sắc, trong khi ảnh hồng ngoại có khả năng hoạt động tốt trong môi trường ánh sáng phức tạp và giúp phát hiện các vật thể ẩn. Mặc dù lĩnh vực này đang nhận được nhiều sự quan tâm, nhưng vẫn còn thiếu các nghiên cứu tổng quan chuyên sâu. Bài báo này khảo sát các phương pháp hợp nhất ảnh khả kiến và hồng ngoại (VIF) tiên tiến trong bài toán phát hiện đối tượng trên ảnh UAV, với trọng tâm là các phương pháp dựa trên học sâu. Chúng tôi phân tích các bộ dữ liệu phổ biến, thảo luận về những thách thức hiện có và đề xuất các hướng nghiên cứu trong tương lai. Ngoài ra, bài báo cũng đánh giá lại các mô hình hiện tại, cho thấy rằng hợp nhất đa modal giúp cải thiện đáng kể hiệu suất so với các phương pháp chỉ sử dụng một nguồn dữ liệu. Đặc biệt, các kỹ thuật tiên tiến như học sâu và Transformer thể hiện tiềm năng mạnh mẽ trong việc nâng cao hiệu quả phát hiện đối tượng trong các điều kiện phức tạp. Khảo sát này cung cấp những thông tin hữu ích cho các nhà nghiên cứu quan tâm đến VIF và phát hiện đối tượng dựa trên ảnh UAV.*

Từ khoá: Phát hiện đối tượng, học sâu, hợp nhất ảnh, Transformer.

❑

Enhancing Phishing URL Detection with Graph Neural Networks: A Combination of URL and HTML Features

Le Thi Vuong[1]

[1]*Institute of Information and Communication Technology, Le Quy Don Technical University*

Email: levuongthi@lqdtu.edu.vn

Abstract

Phishing websites are designed to steal sensitive user information, causing financial damage. Detecting and blocking these websites before users provide personal data is a critical task in cybersecurity. This paper proposes HUGPhish, a phishing URL detection method using URL and HTML feature extraction. The method extracts n-gram features from URLs and constructs hyperlink graphs from the hyperlinks of each URL. HTML content is also analyzed and represented as graphs based on tags. HUGPhish uses Graph Neural Networks (GNNs) to extract embeddings from hyperlink and HTML graphs. These embeddings, combined with selected n-gram features, form a robust feature set, which is then classified using a LightGBM model.

Keywords: *Phishing sites detection; cybersecurity; urls; graph neural networks; graph-based embeddings; HTML features*

1. Introduction

Phishing attacks are cybercrimes that use social engineering tactics and technology to steal sensitive information [1]. Social engineering is used to deceive users and obtain their personal identification or financial data. They often impersonate legitimate organizations, targeting victims through fake emails or messages sent via platforms like Gmail, Outlook, Twitter, or Facebook. Victims may unknowingly share sensitive information or download harmful attachments, making them vulnerable [2]. In addition, technical methods can include deploying malware to steal data directy, such as capturing usernames and passwords or redirecting victims to fraudulent websites [1].

In recent years, phishing attacks have continued to evolve and target various industries and platforms [1]. According to [1]: The 2023 Anti-Phishing Working Group (APWG) report, nearly five million phishing attacks were recorded in 2023, marking it as the worst year on record. In the fourth quarter of 2023 alone, APWG observed 1,077,501 phishing attacks, highlighting the persistence of this cyber threat. Attacks against social media platforms surged dramatically, accounting for 42.8% of all phishing attacks in late 2023. Meanwhile, "vishing" or voice phishing - a phishing method involving phone calls - has seen consistent growth, with the number of attacks increasing each quarter. Business Email Compromise (BEC) attacks involving wire transfers also rose by 24% in the fourth quarter compared to the previous quarter. APWG member FORTRA reported that BEC attacks caused $51 billion in losses from 2013 to 2022, according to the FBI. Most phishing attacks aim to trick users into clicking on fake URLs that are carefully designed to look like real ones, making them hard to detect. Therefore, developing an effective method to detect phishing URLs is essential for ensuring user safety.

1.1. Relate works

Researchers have been actively working on phishing detection methods, which are generally classified into blacklist approaches, rule based techniques, machine learning models

and deep learning model [2, 3]. The blacklist approach relies on a database of phishing URLs reported by trusted organizations like Phishtank [4]. When a URL is accessed, the system checks if it is on the list. This method is fast and easy to implement, but it has a major drawback. New phishing URLs are created constantly, and users can still fall victim to attacks before these URLs are identified and added to the blacklist. The rule-based technique uses a set of predefined rules to classify URLs as phishing or benign. However, similar to the blacklist approach, attackers can exploit these rules by creating URLs that closely resemble legitimate ones, allowing them to bypass detection easily.

To overcome the weaknesses of the two methods above, machine learning methods have been applied because they can learn patterns and features from data. Most machine learning techniques use manually extracted features from URLs, such as IP addresses, domain names, or URL length [5, 6]. However, using only simple features directly from URLs often limits the model to recognizing known URLs, which reduces its ability to detect new phishing URLs effectively. To improve accuracy, more advanced features are needed, such as statistical patterns in URL strings, bag-of-words, or n-grams [7-9]. While machine learning can identify new patterns, it sometimes struggles in phishing URL detection due to certain challenges. One major challenge is the sparsity of the data. For example, in a bag-of-words approach, every character or string that appears in a URL becomes a feature [3]. Since URLs are usually short, most features are missing, which can make it harder for the model to learn. Additionally, with so many possible features, it is difficult to choose the most important ones, making it harder to optimize the model.

As a result, recent years have seen the adoption of deep learning (DL) models to automatically extract features from complex, multi-layered data directly from raw URLs. Commonly used methods include convolutional neural networks (CNNs), recurrent neural networks (RNNs), and long short-term memory (LSTM) network [10, 11]. With advancements in natural language processing (NLP) [12], several approaches have been introduced for phishing URL detection. However, these methods come with challenges. Deep learning models require large datasets, and with limited or imbalanced data, they are prone to overfitting. Additionally, URL strings differ significantly from natural language. Specifically, while natural language comprises sequences of characters or words that convey semantic meaning, URL strings are typically short and lack inherent meaning. Consequently, deep learning models are often less effective than traditional machine learning algorithms in specific contexts.

Phishing URL detection utilizes three primary types of features: URL-based, host-based, and content-based. URL-based features are extracted directly from the URL itself, such as IP address, URL length, domain length, and special characters [13]. These features are easy to obtain but can be easily bypassed by attackers. To enhance their effectiveness, complex methods like bag-of-words or n-grams are often used, which increase the number of features and processing time. Additionally, relying solely on URL-based features may overlook important information like page titles or webpage content. In addition, host-based features include server attributes such as location, identity, and management style, including IP

information, WHOIS data, and geographic location [14, 15]. While these features are crucial for identifying phishing URLs, they require querying third-party services like WHOIS, which can limit the number of queries and cause delays, making them unsuitable for real-time detection. Moreover, content-based features are derived from the webpage's content, including images, JavaScript, text, hypertext, and malicious files [16]. These features are essential for distinguishing malicious URLs but pose risks like inadvertently executing malicious JavaScript code and handling the complexity of JavaScript, making processing challenging.

1.2. Contribution

Recent studies have demonstrated that representing URL data as graphs and utilizing Graph Neural Networks (GNNs) yield exceptional results in phishing detection [17, 18]. These methods have shown excellent results, confirming their potential as a promising direction. PhishGNN integrates the graph-based representation of a website's hyperlinks with manually extracted URL features. However, the manual extraction of URL features can limit the model's adaptability and scalability. Additionally, representing HTML content as graphs presents a promising approach for enhancing detection capabilities. Our research identifies PhishDet as one of the most advanced methods that seamlessly integrate both URL and HTML features [19]. PhishDet automates the extraction of URL features and applies deep learning models to graph data generated from the webpage's HTML content, thereby improving detection accuracy and reducing manual intervention.

Building on these advancements, we propose HUGPhish, a novel method designed to enhance phishing URL detection by combining URL-based features, their associated hyperlinks, and content-based HTML features. Our approach begins by representing URLs as n-grams to identify the most relevant URL features. Subsequently, we model the hyperlinks and HTML content of the webpage as graphs based on HTML tags. These graphs are then processed using GNN models to extract meaningful features. Finally, we train a LightGBM model on the combined set of URL, hyperlink, and HTML features. Experimental results indicate that HUGPhish achieves higher accuracy compared to traditional machine learning methods and existing GNN-based techniques.

2. Method

The overview of the proposed method, HUGPhish, is illustrated in Figure 1. The input for the process combines three types of data: URL strings, hyperlinks, and HTML content. For URL strings, n_gram representation is utilized, and these features are trained using the LightGBM model. The best features selected during training are referred to as the top n_gram URL features. Hyperlinks and URLs are represented as a graph, which is processed by GNNs to generate meaningful features known as Hyperlink Graph Embeddings. For HTML content, the process begins by saving the HTML files of the websites. Once the HTML files are obtained, the tags within them are analyzed. The HTML content is then represented as a graph. A similar embedding process is applied to this graph using GNNs, resulting in HTML graph embeddings. Finally, a robust and comprehensive feature set is constructed. This feature set is then input into the LightGBM model to classify URLs as either legitimate or phishing.

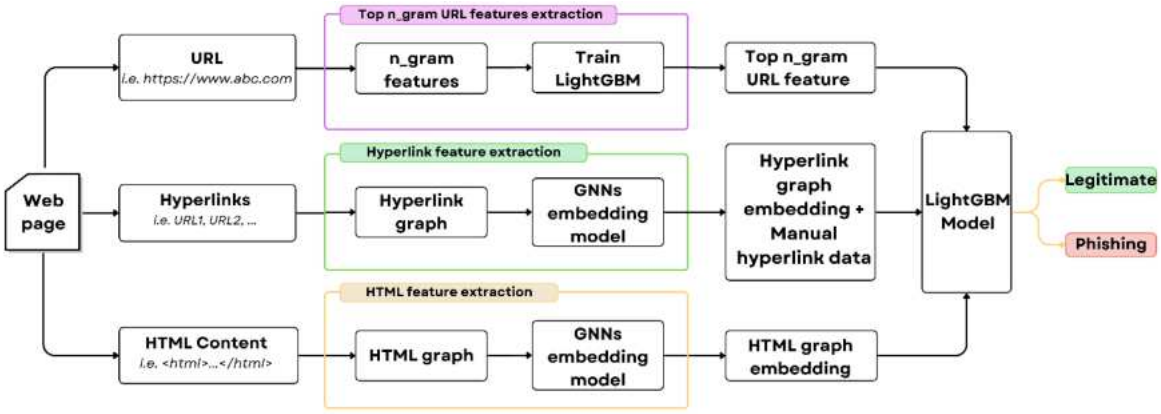


Figure 1. Overview of the Proposed Method: HUGPHISH

Graph embedding use GNNs

The dataset for training Graph Neural Networks (GNNs) was prepared using the PyTorch Geometric (PyG) framework. Each data instance was transformed into a graph representation with node features (X), edge connections ($edge_index$), and a label (y). The adjacency matrix (A) was processed to extract edge indices, while node features and labels were converted into PyTorch tensors. Each graph was encapsulated in a PyG Data object containing X, $edge_index$, and y. The resulting dataset, comprising graph objects and labels, was used with data loader for batching and training, preserving the structural and relational properties of the data. Graph-structured data is processed by the GNN model to extract meaningful embeddings. The GNN embedding methodology is based on the GCNdimReduce model, which consists of three graph convolutional layers and two fully connected layers. Additionally, the model includes a specialized dimensionality reduction function (dimReduce) that bypasses the final classification layers to directly output reduced-dimension embeddings. This approach enables the generation of compact and informative graph representations.

Top n_gram URL feature extraction

URLs were converted into character-level n-grams (range 1-4) using CountVectorizer, followed by TF-IDF transformation to evaluate feature relevance. A LightGBM model was trained on these features, and the top 200 n-grams were identified based on gain and split importance. These selected features were then re-fitted with CountVectorizer for subsequent tasks.

Hyperlink feature extraction

The hyperlink feature extraction method involves constructing a graph where nodes represent URL and their hyperlinks, while edges represent URL-hyperlink connections. The node features are derived from the top n_gram URL features extracted from the hyperlinks. These graphs are processed using GNNs to generate hyperlink graph embeddings. Supplementary graph-based features, such as maximum, minimum, and average node values (Manual Hyperlink Data), are combined with GNN embeddings to create a comprehensive representation of the hyperlinks, capturing both structural and relational properties.

HTML feature extraction

First, the HTML files of the websites are extracted and represented as graphs. The HTML graph G is represented by a feature matrix X and an adjacency matrix A. Based on the

tags in the HTML content, each HTML tag and its attributes are represented as nodes, while the relationships between the tags and their child attributes are represented as edges. The features of each node include the label and value of the corresponding tag or attribute.

For example, with the HTML snippet:

```
<form>
  <input type="text" name="username"/>
</form>
```

The nodes created include the ‘form’ tag, the ‘input’ tag, its attribute ‘type’ and ‘name’ labeled as 1, 2, 2_1, 2_2 respectively. The edges in the graph are defined as (1, 2): Represents the parent-child relationship between the ‘form’ tag and the ‘input’ tag; (2, 2_1): Represents the relationship between the ‘input’ tag and its attribute ‘type’; (2, 2_2): Represents the relationship between the ‘input’ tag and its attribute ‘type’.

Table 1. Example of Graph Features Generated from an HTML Snippet

Node / Feature	Label	Value
1	form	none
2	input	none
2_1	type	text
2_2	name	username

3. Results and Discussion

3.1. Data and valuation

The dataset used in this study consists of 2,648 URLs, including 1,932 benign URLs and 716 phishing URLs. Similar to previous research, the phishing URLs were collected from reputable sources such as PhishTank and OpenPhish, while the benign URLs were sourced from Alexa. A significant challenge in collecting phishing URLs is their short lifespan, often lasting only a few days or even hours. To ensure reliability, the dataset was filtered to include only active URLs, and the corresponding HTML files were successfully saved.

HUGPhish was compared against traditional machine learning methods, such as LightGBM, using manually extracted features from either URL-only data or HTML-only data. Deep learning methods focusing on URL features, including URLNet [20] (based on CNN), and hybrid models combining 1D CNNs and LSTM (e.g. LSTMConv with a single convolutional layer and MultiConv with multiple convolutional layers), were also evaluated. Additionally, advanced methods combining HTML and URL features, such as Hybrid DLM [21] (Detecting phishing attacks using a combined model of LSTM and CNN) and PhishDet [19] (leveraging Long-term Recurrent Convolutional Networks and Graph Convolutional Networks), were tested. Finally, the state-of-the-art GNN-based method, PhishGNN [18], was included for comparison.

All methods, including the proposed HUGPhish, were trained and evaluated on the same dataset. The training set comprised 80% of the original data, while the remaining 20% was used for testing. The class distribution between legitimate and phishing URLs was maintained across the training, testing, and original datasets to ensure balanced evaluation. To evaluate the

performance of the phishing URL detection model, we selected AUC, F1 Score, Precision, and Recall, as they are well-suited for imbalanced datasets. AUC (Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve) measures the area under the ROC curve, which plots the True Positive Rate (Recall) against the False Positive Rate at various threshold values, quantifying the model's ability to distinguish between phishing and non-phishing URLs, with higher values indicating better discrimination. F1 Score balances Precision and Recall, reflecting the model's overall effectiveness, while Precision highlights the proportion of correctly predicted phishing URLs, and Recall assesses the model's ability to detect all actual phishing URLs. Accuracy was excluded as it can be misleading in imbalanced datasets, where a model predicting all URLs as non-phishing could achieve high Accuracy while failing to detect phishing URLs, making it unsuitable for this task.

3.2. Comparison of HUGPhish with other algorithms

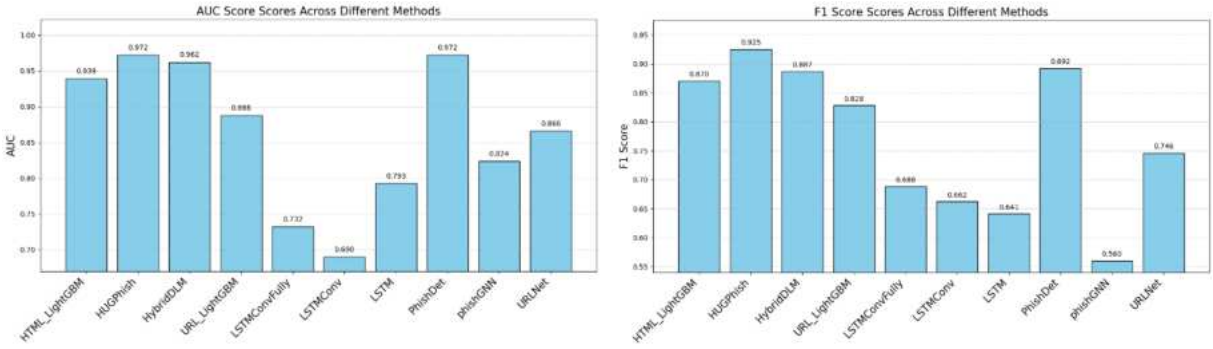


Figure 2. Performance comparison of phishing URL detection methods. The left plot shows AUC (Area Under the Curve), indicating the ability to distinguish phishing from non-phishing URLs, while the right plot presents F1 Score, balancing Precision and Recall for imbalanced datasets.

Experimental results demonstrate that HUGPhish outperforms all competing methods across all metrics. It achieves the highest AUC (0.972) and F1-Score (0.925) as shown in Figure 2, effectively balancing Precision (0.912) and Recall (0.867) as detailed in Table 2.

Table 2. Metrics (AUC, F1-Score, Precision, Recall) of detection methods

Methods	AUC	F1-score	Precision	Recall
HTML_LightGBM	0.939	0.870	0.793	0.832
HUGPhish	0.972	0.925	0.912	0.867
HybridDLM	0.962	0.887	0.838	0.832
URL_LightGBM	0.888	0.828	0.779	0.713
LSTMConvFully	0.732	0.688	0.718	0.392
LSTMConv	0.690	0.662	0.594	0.399
LSTM	0.793	0.641	0.430	0.811
PhishDet	0.972	0.892	0.771	0.944
phishGNN	0.824	0.560	1.000	0.144
URLNet	0.866	0.746	0.566	0.776

These results highlight the superiority of HUGPhish in phishing URL detection, especially in highly imbalanced datasets. Following HUGPhish, PhishDet and HybridDLM also deliver strong performance. PhishDet achieves an AUC of 0.972 and an F1-Score of 0.892

(Figure 2), although its lower Precision (0.771) reduces its effectiveness in minimizing false positives (Table 2). HybridDLM, with an AUC of 0.962 and an F1-Score of 0.887, shows robust detection capabilities with Precision (0.838) and Recall (0.832), further demonstrating the benefits of combining URL-based and HTML-based features.

LightGBM-based methods, including HTML_LightGBM and URL_LightGBM, show stable results with AUCs of 0.939 and 0.888, and F1-Scores of 0.870 and 0.828, respectively (Figure 2). These results suggest that LightGBM is a promising approach for phishing URL detection, further strengthened by its fast processing and stable performance. URLNet, with an AUC of 0.866 and an F1-Score of 0.746, performs moderately well, benefiting from a high Recall (0.776) but limited by low Precision (0.566) (Table 2). Methods like phishGNN and LSTM-based models (LSTM, LSTMConv, LSTMConvFully) perform significantly worse. While phishGNN achieves perfect Precision (1.0) (Table 2), its Recall is extremely low (0.144), resulting in an F1-Score of only 0.560 (Figure 2), indicating its inability to detect many phishing URLs. LSTM-based models struggle with both Precision and Recall, with F1-Scores ranging from 0.641 (LSTM) to 0.662 (LSTMConv) (Figure 2), making them unsuitable for phishing URL detection, where a balance between accuracy and detection capability is critical.

4. Conclusion

In this study, we introduced HUGPhish, an innovative approach that combines graph embedding using GNNs and LightGBM to detect phishing URLs. This method integrates two types of features from both URL and HTML, fully leveraging the strengths of LightGBM in detecting and classifying phishing URLs.

Experimental results demonstrate that HUGPhish outperforms existing methods, achieving higher values for AUC, F1-Score, Precision, and Recall, confirming its effectiveness and reliability in detecting phishing URLs. HUGPhish highlights the potential of combining graph embedding and machine learning to address complex challenges in cybersecurity.

The generated embeddings provide rich and comprehensive information, optimizing the ability of LightGBM to learn the most relevant features for phishing URL classification. By combining these approaches, HUGPhish not only significantly improves the accuracy of phishing detection but also reduces the risk of overfitting, a common issue in traditional methods when handling imbalanced datasets.

References

[1] Anti-Phishing Working Group, "Phishing Attack Trends Report - 4Q 2023," 2023.

[2] S. Asiri, Y. Xiao, S. Alzahrani, S. Li and T. Li, "A Survey of Intelligent Detection Designs of HTML URL Phishing Attacks," *IEEE,* vol. 11, pp. 6421 - 6443, 18 January 2023.

[3] Ozgur Koray Sahingoz a , Ebubekir Buber b , Onder Demir b , Banu Diri c, "Machine learning based phishing detection from URLs," *Expert Systems with Applications,* vol. 117, pp. 345-357, 2019.

[4] "PhishTank".

[5] Fatima Hussain; Rasheed Hussain; Syed Ali Hassan; Ekram Hossain, "Machine Learning in IoT Security:," *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 22, no. 3, pp. 1686 - 1721, 2020.

[6] Yang Xin; Lingshuang Kong; Zhi Liu; Yuling Chen; Yanmiao Li; Hongliang Zhu, "Machine Learning and Deep Learning Methods for Cybersecurity," *IEEE Access ,* vol. 6, pp. 35365 - 35381, 2018.

[7] Mehmet Korkmaz; Emre Kocyigit; Ozgur Koray Sahingoz; Banu Diri, "Phishing Web Page Detection Using N-gram Features Extracted From URLs," *2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA),* 2021.

[8] Yongjie Huang; Qiping Yang; Jinghui Qin; Wushao Wen, "Phishing URL Detection via CNN and Attention-Based Hierarchical RNN," *2019 18th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications/13th IEEE International Conference On Big Data Science And Engineering (TrustCom/BigDataSE),* 2019.

[9] Manuel Sánchez-Paniagua; Eduardo Fidalgo Fernández; Enrique Alegre; Wesam Al-Nabki; Víctor González-Castro, "Phishing URL Detection: A Real-Case Scenario Through Login URLs," *IEEE Access,* vol. 10, pp. 42949 - 42960, 2022.

[10] Youness Mourtaji, Mohammed Bouhorma, Daniyal Alghazzawi, Ghadah Aldabbagh, Abdullah Alghamdi, "Hybrid Rule-Based Solution for Phishing URL Detection Using Convolutional Neural Network," *Wiley Online Library,* 2021.

[11] Sanjiban Sekhar Roy, Ali Ismail Awad, Lamesgen Adugnaw Amare , Mabrie Tesfaye Erkihun and Mohd Anas, "Multimodel Phishing URL Detection Using LSTM, Bidirectional LSTM, and GRU Models," *Future Internet,* 2022.

[12] A. Lakshmanarao; M. Raja Babu; M M Bala Krishna, "Malicious URL Detection using NLP, Machine Learning and FLASK," *2021 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES),* 2021.

[13] ES Aung, CT Zan, H Yamana, "A survey of URL-based phishing detection," *DEIM forum,* 2019.

[14] Gopinath Palaniappan, Sangeetha S, Balaji Rajendran, Sanjay, Shubham Goyal, Bindhumadhava B S, "Malicious domain detection using machine learning on domain name features, host-based features and web-based features," *Procedia Computer Science,* vol. 171, pp. 654-661, 2020.

[15] Samiya Hamadouche, Ouadjih Boudraa, Mohamed Gasmi, "Combining Lexical, Host, and Content-based features for Phishing Websites detection using Machine Learning Models," *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems ,* vol. 11, 2024.

[16] Korkmaz M., Kocyigit E., Sahingoz O. K., DİRİ B., "A hybrid phishing detection system using deep learning-based URL and content analysis," *Elektronika ir Elektrotechnika,* vol. 28, pp. 80-89, 2022.

[17] C.L. Tan, K.L. Chiew, K.S. Yong, S.N. Sze, J. Abdullah, Y. Sebastian, "A graph-theoretic approach for the detection of phishing webpages," *Computers & Security,* vol. 95, 2020.

[18] T. Bilot, G. Geis, B. Hammi, "PhishGNN: A Phishing Website Detection Framework using Graph Neural Networks," *19th International Conference on Security and Cryptography,* p. 428–435, 2022.

[19] Subhash Ariyadasa; Shantha Fernando; Subha Fernando, "Combining Long-Term Recurrent Convolutional and Graph Convolutional Networks to Detect Phishing Sites Using URL and HTML," *IEEE Access ,* vol. 10, pp. 82355 - 82375.

[20] Hung Le, Quang Pham, Doyen Sahoo, Steven C.H. Hoi, "URLNet: Learning a URL Representation with Deep Learning for Malicious URL Detection," *arXiv.*

[21] Subhash Ariyadasa, Subha Fernando, Shantha Fernando , "Detecting phishing attacks using a combined model of LSTM and CNN," *International Journal of Advanced and Applied Sciences ,* pp. 56-67, 2020.

MetaLog: Impact of Parameters and Token Count in Pre-Trained Embeddings

Cong Minh Vu, Minh Thien Long Vo, Van Loi Cao

Institute of Information and Communication Technology, Le Quy Don Technical University

[*] *Email: congminh410tn@gmail.com, Contact number: 0968951750*

Abstract

Log-based anomaly detection is critical to maintaining the stability, reliability, and security of software systems. MetaLog, a generalizable cross-system anomaly detection model, surpasses traditional approaches such as LogRobust and DeepLog by effectively handling scenarios with limited labeled data through meta-learning. This study investigates the influences of MetaLog's key parameters, including those governing its meta-train and meta-test learning phases, and evaluates the effect of varying token counts in pre-trained GloVe embeddings on its performance. By conducting comprehensive experiments using the BGL dataset, we analyze the impact of these factors on MetaLog's anomaly detection capabilities. Our findings reveal the significant role of parameter tuning and embedding token count in enhancing the robustness and generalizability of the model, providing actionable insights for optimizing MetaLog configuration in diverse environments.

Keywords*: Meta-learning, Anomaly detection, System logs, Word embedding.*

1. Introduction

Anomaly detection plays a crucial role in the development and maintenance of computer systems, helping to identify unusual patterns or behaviors in data that often signal potential problems such as system errors, security breaches, or fraudulent activities. By enabling early detection, anomaly detection improves system optimization, improving both reliability and performance. In modern digital environments, log data has become a fundamental resource for anomaly detection, capturing detailed records of events within software applications, server infrastructures, and IoT devices. These logs document operational states, errors, and interactions, making them indispensable for uncovering anomalous patterns that might remain hidden using traditional detection methods.

The log-based anomaly detection process has been systematically reviewed by Chen et al., who outlined four key steps: *log collection*, *log parsing*, *feature extraction*, and *anomaly detection* [1]. Each of these steps contributes to the transformation of raw log data into actionable insights. Log parsing structures the data for algorithmic analysis, while log representation leverages formats such as vectors or graphs to enable effective anomaly detection using machine learning techniques. However, despite these advances, one of the persistent challenges in log-based anomaly detection is the scarcity of accurately labeled data, especially for anomalous logs, as noted in studies such as [2]. The high volume of system logs makes manual labeling labor intensive and impractical.

To address this challenge, researchers have explored meta-learning, a paradigm that focuses on improving a model's ability to adapt to new tasks with limited data. This approach is particularly effective in scenarios where mature systems with extensive labeled logs (source systems) must aid in anomaly detection for new systems (target systems) with scarce labeled data, a task referred to as Generalizable Cross-System Log Anomaly Detection (GCLAD).

Notable works, such as LogTransfer [3] and LogTAD [4], have explored transfer learning for cross-system anomaly detection, but face limitations when there are substantial distribution gaps between the source and target systems [5]. To overcome these issues, Zhang et al. introduced MetaLog [6], a meta-learning-based framework that combines globally consistent semantic embedding (GCSE) and metalearning techniques to achieve effective anomaly detection across diverse log systems.

MetaLog addresses two critical challenges in GCLAD: the syntactic and semantic variability of logs across systems and the need to generalize effectively from source to target systems with limited labeled data. The GCSE phase ensures a consistent representation of log events using pre-trained GloVe [7] embeddings vectors, enabling a unified semantic space. The meta-learning component further enhances generalization by optimizing the MetaLog network for both meta-train and meta-test tasks, balancing adaptation and generalization.

This study systematically explores the factors influencing the performance of the MetaLog model, focusing on the size of the vocabulary in pre-trained embeddings and the impact of key parameters. By conducting experiments using HDFS as the source dataset and BGL as the target dataset, we provide actionable insights for configuring MetaLog for robust and generalizable log-based anomaly detection. The main contributions of this study are summarized as follows:

• **Analyzing the Impact of Vocabulary Size**: Assess the effect of varying the number of tokens in pre-trained embedding vectors on the performance of the MetaLog model.

• **Analyzing the Impact of Parameters**: Optimize MetaLog by fine-tuning key parameters (α, β, and γ) that govern its learning behavior and evaluate how these factors influence the model's ability to detect anomalies.

The structure of this paper is organized as follows: Sections 2 and 3 provide an overview of meta-learning and the MetaLog method, along with a discussion of recent meta-learning-based approaches for anomaly detection. Section 4 focuses on analyzing the influence of vocabulary size and hyperparameters and proposes survey ideas for further exploration. Section 5 presents the experimental analysis and compares the results with those of relevant studies. Finally, Section 6 summarizes the key findings and outlines potential directions for future research.

2. Background

This section briefly provides a general problem statement for meta-learning. Following this, a generalizable cross-system anomaly detection approach, MetaLog, is presented.

2.1. Meta learning

The definition of meta-learning is introduced by Hospedales et al. [8]. Meta-learning, often referred to as "learning to learn", is a process in which a learning algorithm is optimized across multiple learning episodes or tasks. Unlike traditional machine learning, which focuses on improving model performance by learning from a large number of data instances, meta-learning aims to enhance the ability of a learning algorithm to adapt to new tasks more efficiently. In *base learning*, an *inner learning* algorithm, also known as the *base learner*, is trained to solve a specific task, such as image classification [9], using a given dataset and

objective. This *inner* algorithm learns to make predictions based on the data it encounters. In *meta-learning*, an *outer learning* algorithm, sometimes called the *meta-learner*, operates at a higher level, adjusting the basic parameters of the learner or the learning process to optimize an overarching objective. This outer objective could involve improving the generalization performance of the base algorithm on unseen tasks or increasing the speed with which the base algorithm learns new tasks, thus enhancing its overall adaptability and efficiency.

2.2. MetaLog method

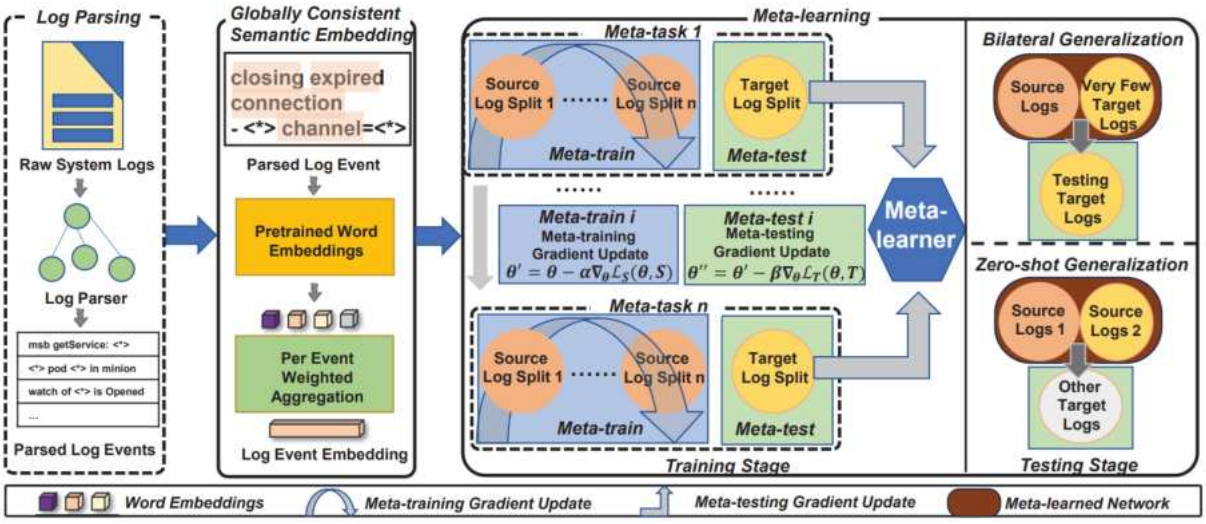


Figure 1. The pipeline for MetaLog [6]

The MetaLog system consists of three primary modules: Log parsing, Globally consistent semantic embedding (GCSE) and the MetaLog network, which utilizes a meta-learning technique, shown in Figure 1.

The process begins by handling unstructured raw logs from various industrial systems using the classical log parsing method, Drain [10]. This method extracts individual log events and organizes them into processed log event sequences. Building on previous work [3], [4], [11], [12], the system extracts semantic embeddings for each log event, as these representations have been shown to provide more meaningful insights than traditional index-based approaches.

Following log parsing, the GCSE stage generates globally consistent semantic embeddings by processing log events. Non-character tokens are removed, and composite tokens are split using the Camel Case method [13]. GloVe pre-trained embeddings [7] are applied to map words into a unified 300-dimensional space. Semantic embeddings for log events are then created using TF-IDF-weighted aggregation, a method proven effective in prior studies [11], [14].

These globally consistent log event embeddings are then inputted into the MetaLog network, which detects anomalies by analyzing sequences of these embeddings, as shown in Figure 1.

The meta-learner is designed to generalize knowledge from the source system logs, denoted as $\{S\}$, to the target system logs, denoted as $\{T\}$, through a series of metatasks. Each meta-task consists of two phases: meta-training and meta-testing. In the i-th meta-task, the

parameters of the MetaLog network, θ, are updated based on the gradient derived from the source system's data during the meta-training phase, using the following equation:

$$\theta' = \theta - \alpha \nabla_{\theta} \mathcal{L}_S(\theta, S_i) \tag{1}$$

Here, $\mathcal{L}_T$ represents the loss function computed on the source data S_i.

Once all splits in the source logs have been processed, the updated MetaLog network parameters are recorded as θ_S. In the *i-th* meta-test, loss functions computed over multiple subsets of the target dataset are aggregated to produce a consolidated measure of performance as follows:

$$\mathcal{L}_T(\theta'_S, \{T\}) = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \mathcal{L}_T(\theta'_S, T_i) \tag{2}$$

Finally, the meta-learning process optimizes the MetaLog network by considering the aggregated loss values from both the source and target systems, resulting in the following optimization equation:

$$\theta = \theta - \gamma \frac{\partial \left(\mathcal{L}_S(\theta, \{S\}) + \beta \mathcal{L}_T \left(\theta - \alpha \nabla_{\theta} \mathcal{L}_S(\theta, \{S\}), \{T\} \right) \right)}{\partial \theta} \tag{3}$$

where the term $\theta - \alpha \nabla_{\theta} \mathcal{L}_S(\theta, \{S\})$ refers to the meta-training gradient update, and α, β, γ are meta-learning rate parameters. As seen from the above equation, MetaLog leverages information from both the source and target log systems to optimize the network parameters, enabling it to effectively address GCLAD task.

3. Related Works

Log-based anomaly detection has been widely studied due to its importance in ensuring system reliability and security. Early methods relied on statistical or rule-based approaches, which were effective for structured environments but struggled with the dynamic nature of modern log data. Clustering-based techniques, such as Drain [10], have been employed to group similar log events and infer fuzzy labels, although these methods often suffer from scalability issues and dependency on domain-specific configurations.

To address the scarcity of labeled data, transfer learning approaches have been explored, including LogTransfer [3] and LogTAD [4]. While these methods enable cross-system anomaly detection, they face limitations when there is a significant distribution gap between the source and target systems. Meta-learning has emerged as a promising alternative, focusing on generalizing models to adapt effectively to new systems with minimal labeled data. Techniques like MAML [15] have shown success in improving adaptability, and Zhang et al. [6] extended this paradigm to log anomaly detection with the MetaLog framework.

MetaLog introduces globally consistent semantic embeddings using GloVe [7] and employs meta-learning to balance adaptation and generalization in diverse systems. This combination addresses the syntax and semantic variability in the logs while using limited labeled data in the target systems. These advancements form the foundation of our study, which

further explores the impact of embedding vocabulary size and hyperparameter tuning on the MetaLog model's performance.

4. Proposed method

As discussed in Subsection 2.2, the MetaLog system consists of three components: Log parsing, GCSE, and the MetaLog network. The performance of MetaLog is influenced by two key factors: the ability to generate globally consistent semantic embeddings and the ability to generalize knowledge from the source system to the target system. One important factor that affects performance is the size of the vocabulary used in the embedding process. A larger vocabulary can capture more detailed information from the logs, enriching the feature representation. However, it may also introduce additional noise and increase computational complexity, which could negatively impact the overall performance of the system. In this section, we propose a comprehensive investigation of the impact of vocabulary size on the effectiveness of generating semantic embeddings, the parameters α and β, and their influence on the performance of the MetaLog network.

To investigate the effect of vocabulary size, we propose an incremental approach to vocabulary size. This involves systematically varying the size of the vocabulary by including different subsets of the most frequent terms in the logs. For example, we can use vocabulary sizes of 6 billion (6B), 42 billion (42B), and 840 billion (840B) tokens, etc., to observe how the performance changes as the vocabulary size increases. For each vocabulary size, the performance of the MetaLog model will be evaluated using the same metrics as before, such as the F1 score. This will enable us to identify the optimal vocabulary size that strikes the right balance between performance and complexity.

The parameters α and β are crucial to balance the influence of the source system and the target system during the transfer learning process in MetaLog. Specifically, α is the learning rate for meta-training. Controls the step size for parameter updates θ during the meta-training phase, when the network is optimized on the source dataset S. α determines how much the model adjusts its parameters based on the gradient of the loss function of the source data $\mathcal{L}_S$. If α is too large, the parameter updates may become too large, leading to instability and difficulty in convergence. In contrast, if α is too small, the updates will be too slow, affecting the learning process. β is the source loss and the target loss balance factor. Adjusts the relative importance of the loss function in the target data $\mathcal{L}_T$ compared to the source data $\mathcal{L}_S$ during the meta-learner optimization phase. If β is too large, the model may over-prioritize optimizing for the target data, which could hinder its ability to learn from the source data. On the other hand, if β is too small, the model may not be able to properly generalize to the target data, reducing its performance on the target system.

To assess the impact of these parameters, we propose performing a grid search across a range of values for α and β. This approach will allow us to systematically evaluate how different combinations of these parameters affect the performance of the model in terms of detection accuracy, precision, and recall.

5. Experiments and Discussion

5.1. Experimental settings

This study conducts a comprehensive investigation into the bilateral generalization capability of the MetaLog method, evaluating its performance in varying configurations. The experiments are designed to address two critical scenarios: variations in the size of the pre-trained vocabulary and the fine-tuning of key model parameters. Through the application of MetaLog to these scenarios, we provide a systematic analysis of its effectiveness and identify potential directions for future research to enhance its generalizability and performance. Additionally, this study aims to investigate the impact of vocabulary size and parameters, including α, β, γ, as these factors play a crucial role in MetaLog performance. Given the primary focus on analyzing these parameters, we do not re-evaluate MetaLog against baseline methods, as such comparisons have already been conducted in the MetaLog publication [6].

For the first scenario, we assess the impact of vocabulary size on performance by using three GloVe [7] pre-trained word vectors1 , with token counts of 6B, 42B, and 840B from the Common Crawl dataset. By systematically testing these different pre-trained vectors, we aim to explore how increasing the vocabulary size, and thus the richness of the word embeddings, influences the efficacy of MetaLog in log-based anomaly detection tasks. This experiment will provide valuable insights into the role of vocabulary size in enhancing the model's ability to generalize and detect anomalies across different log systems.

In the second scenario, we investigate the effects of key parameters - α, β, γ, which govern task-specific adaptation, generalization across tasks, and trade-off between these two aspects. The performance of each configuration is measured using the F1 score, a metric that balances precision and recall. The results are presented as graphs and tables to visualize and compare F1 scores across varying vocabulary sizes and parameter settings, providing insights into the factors that influence the accuracy and generalizability of MetaLog's anomaly detection capabilities.

5.1.1. Dataset

To ensure compatibility, we selected HDFS[1] and BGL[2] datasets to evaluate bilateral generalization, following a methodology similar to that of [6]. The description in Table 1 is sampled to create datasets for the two scenarios mentioned above.

HDFS, the Hadoop Distributed File System, is designed to operate on commodity hardware and has been extensively studied in the literature due to its widespread popularity. The log dataset used in this study is generated in a private cloud environment using benchmark workloads and manually labeled through handcrafted rules to identify anomalies [16]. The logs are segmented into traces based on block IDs, and each trace corresponding to a specific block ID is assigned a ground truth label of normal or anomaly [17].

BGL is a publicly available dataset of logs collected from the BlueGene/L supercomputer at Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in Livermore, California.

[1] http://hadoop.apache.org/hdfs
[2] https://www.usenix.org/cfdr-data

This system comprises 131,072 processors and 32,768 GB of memory. The logs include both alert and non-alert messages, distinguished by alert category tags, with "-" in the first column indicating non-alert messages and other entries representing alerts. The dataset label information is well-suited for research in alert detection and prediction. BGL has been widely used in studies on log parsing, anomaly detection, and failure prediction [17], [18].

Table 1. The description of datasets usage

Metric	HDFS (Source)	BGL (Target)
Dataset	HDFS	BGL
Anomaly Rate	100%	1%
Training Set	40%	30%
Testing Set	0	70%

In this setup, the HDFS dataset served as the source log system, with its small set of labels (typically 40%) used to meta-train the MetaLog network. The BGL dataset was designated as the target system, with only 1% of its anomaly labels and a small subset (typically 30%) of normal labels used to meta-test the MetaLog network. The remaining majority of the BGL data was reserved for testing the model performance.

5.1.2. Parameter settings

In the first experiment, we evaluated the impact of varying the vocabulary size in the GloVe [7] pre-trained vectors by testing three difference numbers of tokens: 6 billion (6B), 42 billion (42B), and 840 billion (840B) tokens. The parameters used for this experiment are consistent with those outlined in their original studies [6], specifically setting $\alpha = 2e - 3$, $\gamma = 2e - 3$, and $\beta = 4$. This setup aims to analyze how the vocabulary size influences the performance of the MetaLog model under fixed parameters.

For the second experiment, we focus on parameter tuning while using the pretrained vectors with 840B tokens. We explore different values for α and γ from the set $1e - 3$, $2e - 3$, $4e - 3$, $8e - 3$, and for β from the set 0.5, 1, 2, 4, 8. Following the findings in [19], α and γ are always set at equal values. This experiment seeks to determine the optimal combination of parameters to enhance the model's anomaly detection performance. The purpose of this experiment is to systematically assess how different configurations of α, γ, and β influence the performance of the MetaLog model in detecting anomalies in log data. By testing these combinations, our goal is to identify the optimal parameter settings that maximize the effectiveness of the model, providing information on the role of these parameters in the fine-tuning of MetaLog for improved anomaly detection.

All experiments were carried out in Python using Scikit-learn 1.5.1 and PyTorch 2.5.0. The experiments were executed on a macOS Sequoia 15.1.1 operating system, equipped with an Apple M1 Pro chip that features 8 performance cores, 2 efficiency cores, and 16 GB of RAM.

5.1.3. Evaluation metrics

In our experiments, the F1 score is used as a primary metric to evaluate the performance of the proposed approach and its comparison with related studies. The F1 score is a widely used

machine learning metric that quantifies the accuracy of a model by incorporating both precision and recall. It is calculated as the harmonic mean of these two measures, promoting the balance between them.

To calculate the F1 score, precision and recall are first defined as:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \qquad Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \tag{4}$$

where *TP*, *TN*, *FP*, and *FN* represent True Positives, True Negatives, False Positives, and False Negatives, respectively.

The F_1 score is then given by:

$$F_1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}, \tag{5}$$

which highlights the harmonic mean of *precision* and *recall*. For consistency and fairness, all competing methods use a fixed threshold of 0.5 to determine anomalies in the system logs, the same as in the original study [6]. These metrics are particularly valuable for evaluating model performance in highly imbalanced scenarios, which are common in anomaly detection tasks.

Due to the significant difference in the sizes of word embedding models (e.g., 990MB for glove.6B.300d.txt vs. 5.26GB for glove.840B.300d.txt), evaluating computational costs, including training and testing time, as well as memory consumption, is also an important factor affecting the model's efficiency and practicality. However, this study primarily focuses on analyzing the F1 score because it provides a direct and standardized measure of anomaly detection performance, balancing both precision and recall. Since detecting anomalies often involves dealing with highly imbalanced data, F1 score is a more reliable metric compared to accuracy. Assessments of computational costs will be addressed in future research.

5.2. Experimental results and Analysis

This section provides analysis and discussion on the experimental results of the two scenarios. The Figure 2 and Table 2 illustrate the results for the first scenario, while the results for the second scenario are shown in Tables 2.

5.2.1. Change vocabulary size

This section provides an in-depth analysis of the experimental results for the first scenario, in which we trained and evaluated the MetaLog model using consistent parameters, specifically setting $\alpha = 2e{-}3$, $\beta = 4$ and $\gamma = 2e{-}3$, while varying the GloVe [7] pre-trained word vectors. The primary objective of this experiment was to assess the impact of different pre-trained embeddings on the model's performance. To this end, we used embedding vectors derived from the Common Crawl dataset, with three distinct token sizes: 6 billion (**6B**), 42 billion (**42B**), and 840 billion (**840B**) tokens.

The results presented in Figure 2 clearly demonstrate that the performance of the MetaLog model improves as the vocabulary size of the pre-trained word vectors increases. Specifically, we observe a steady increase in performance, with the F1 score increasing from 0.7909 for the 6B token model to 0.8531 for the 840B token model. However, it is important to

note that while the token size increases significantly - **7 times** from 6B to 42B and **20 times** from 42B to 840B - the improvement in the F1 score is relatively modest, with increases of only 0.3 for both cases.

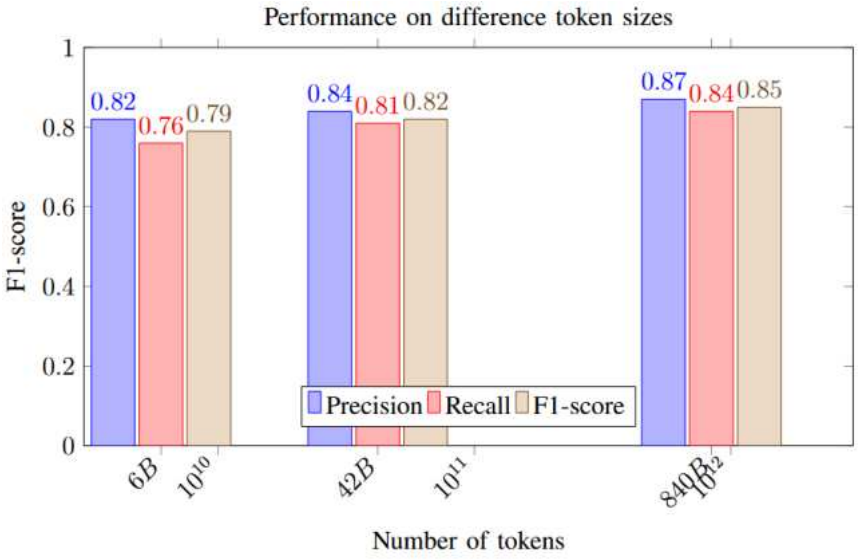


Figure 2. Performance on difference token sizes

Upon closer examination, we find that the improvement in the F1 score aligns with the probability of a word appearing in the token set. This suggests that the real impact behind the number of tokens is not merely the size of the vocabulary but rather the out-of-vocabulary (OOV) rate. The OOV rate, which quantifies the proportion of words in the dataset that are not present in the pre-trained embeddings, plays a critical role in determining the model's performance. As the vocabulary size increases, the OOV rate decreases, leading to a more accurate representation of log data and, consequently, a better F1 score.

Table 2. The OOV rate of each embedding vectors token size

OOV rate	**6B**	**42B**	**840B**
HDFS	0.5116	0.4729	0.3178
BGL	0.7409	0.7223	0.6275
Total	0.7354	0.7143	0.6153

This discovery is a key novelty of our research. While previous studies have focused on increasing vocabulary size to improve model performance, we have identified that the underlying factor driving this improvement is the reduction in the OOV rate. This insight highlights the importance of minimizing the OOV rate to enhance the semantic representation of log data, which directly impacts the model's ability to detect anomalies effectively.

To better understand the relationship between the out-of-vocabulary (OOV) rate of word vectors and the performance of the MetaLog model, we propose an in-depth analysis of the in-vocabulary (IV) rate. The IV rate quantifies the proportion of words in the dataset that are successfully aligned with entries in the pre-trained word embeddings, serving as a complementary metric to the OOV rate. By investigating the interplay between these two

metrics, we aim to identify patterns and dependencies that impact the effectiveness of the MetaLog model. This analysis will be visually represented through the Figure 3, providing valuable insights into how the inclusion of vocabulary within pre-trained embeddings correlates with model performance.

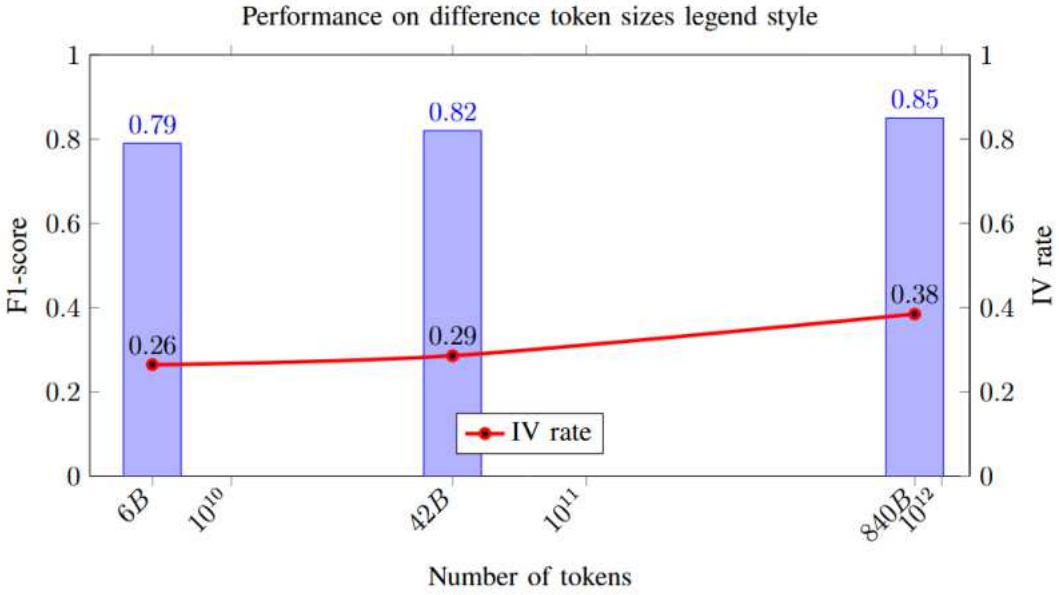


Figure 3. The connection IV rate and the model performance

In summary, our findings underscore the significant influence of vocabulary size on the performance of the MetaLog model, as well as its potential impact on other semantic log-based anomaly detection models. A larger vocabulary size enhances the richness of word embeddings, enabling the model to better capture the semantic relationships present in the log data. However, the real driver of this improvement is the reduction in the OOV rate, which directly affects the model's ability to represent unseen or domain-specific terms in the logs effectively.

In this paper, our primary focus is to investigate the impact of vocabulary size on the F1 score, and therefore, we do not conduct experiments involving preprocessing techniques such as WordPiece, text cleaning, stop words removal, etc. These techniques, while potentially beneficial, are outside the scope of this study and will be explored in future work. Addressing the OOV rate and further optimizing the vocabulary size will be a key focus of our future research.

5.2.2. Change parameters

In this section, we conduct a comprehensive evaluation of the MetaLog model using the pre-trained embedding word vectors with 840 billion (840B) tokens, which, as demonstrated in the previous experiment, yield the best performance among the various vocabulary sizes tested. Building on this foundation, we further investigate the impact of different combinations of hyperparameters, specifically focusing on the values of α (as γ) and β. The parameter α and γ will be varied within the set $1e-3$, $2e-3$, $4e-3$, $8e-3$, while β will be tested across the set 0.5, 1, 2, 4, 8. This results in a total of 20 distinct combinations $4 \times 5 = 20$ that will be evaluated. The results obtained are presented in table 3.

Table 3. Performance results for different combinations of β and α values

β	α =	0.001	0.002	0.004	0.008
0.5		**85.57**	84.11	76.23	90.53
1		82.27	83.39	**90.66**	92.50
2		82.27	**86.89**	86.84	86.00
4		82.76	85.31	86.32	83.66
8		82.28	86.18	88.99	**92.57**

The results of the experiment indicate that the relationship between α and β values and the performance of the model is complex and highly unpredictable. However, a notable trend is evident: As the value of α increases, achieving optimal performance requires a proportional increase in the value of β. This suggests that the critical factor influencing performance may not be the individual values of α or β, but rather the relationship between them.

To understand this phenomenon, it is essential to revisit the roles of α and β in the MetaLog framework. α represents the learning rate constant for the meta-train phase, while β governs the learning rate during the meta-test phase. If the ratio between α and β is either too large or too small, the gradient optimization process becomes unbalanced. A disproportionately large α relative to β overemphasizes the meta-train phase, potentially leading to overfitting to the training data. Conversely, a disproportionately small α relative to β shifts the focus excessively toward the meta-test phase, compromising the model's ability to generalize effectively. This observation highlights the importance of maintaining a balanced ratio between α and β to ensure effective gradient generalization in both phases. Future investigations should focus on analyzing this ratio more systematically to identify optimal configurations that enhance the MetaLog model's generalizability and robustness.

6. Conclusion

This study systematically investigates the factors influencing the performance of the MetaLog model for log-based anomaly detection, focusing on the impact of pretrained GloVe embeddings and the optimization of key hyperparameters. By conducting experiments with HDFS as the source dataset and BGL as the target dataset, we analyzed the role of vocabulary size and parameters in enhancing the generalizability and robustness of MetaLog.

The experimental results reveal that larger vocabulary sizes in pre-trained embeddings significantly improve the model's anomaly detection capabilities. This highlights the importance of reducing the out-of-vocabulary (OOV) rate to enhance the semantic representation of log data. In contrast, the impact of parameters, such as α, β, and γ, was found to be minor and inconsistent. However, the results suggest that the ratio between α and β may play a small but critical role in balancing the meta-train and meta-test phases of the MetaLog framework.

Future work will focus on reducing the OOV rate by developing domain-specific word embeddings tailored to system logs, incorporating frequently occurring terms, and exploring alternative tokenization methods such as WordPiece Tokenization and BERT-based encoders.

Additionally, we will further investigate the impact of the α-to-β ratio to optimize the model's generalization across diverse datasets. Another key direction is evaluating computational costs, including training time, inference time, and memory consumption, to assess the practicality of using different word embedding sizes. These efforts aim to enhance both the accuracy and efficiency of log-based anomaly detection systems, contributing to more scalable and robust cross-system solutions.

References

[1] Z. Chen, J. Liu, W. Gu, Y. Su, and M. R. Lyu, "Experience report: Deep learning-based system log analysis for anomaly detection," *arXiv preprint arXiv:2107.05908*, 2021.

[2] T. Jia, Y. Li, Y. Yang, G. Huang, and Z. Wu, "Augmenting log-based anomaly detection models to reduce false anomalies with human feedback," in *Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2022, pp. 3081–3089.

[3] R. Chen, S. Zhang, D. Li, Y. Zhang, F. Guo, W. Meng, D. Pei, Y. Zhang, X. Chen, and Y. Liu, "Logtransfer: Cross-system log anomaly detection for software systems with transfer learning," in *2020 IEEE 31st International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE).* IEEE, 2020, pp. 37–47.

[4] X. Han and S. Yuan, "Unsupervised cross-system log anomaly detection via domain adaptation," in *Proceedings of the 30th ACM international conference on information & knowledge management*, 2021, pp. 3068–3072.

[5] J. Wu and J. He, "A unified meta-learning framework for dynamic transfer learning," *arXiv preprint arXiv:2207.01784*, 2022.

[6] C. Zhang, T. Jia, G. Shen, P. Zhu, and Y. Li, "Metalog: Generalizable cross-system anomaly detection from logs with meta-learning," in *Proceedings of the IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering*, ser. ICSE '24. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2024. doi: 10.1145/3597503.3639205. ISBN 9798400702174. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/3597503.3639205

[7] J. Pennington, R. Socher, and C. Manning, "GloVe: Global vectors for word representation," in *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, A. Moschitti, B. Pang, and W. Daelemans, Eds. Doha, Qatar: Association for Computational Linguistics, Oct. 2014. doi: 10.3115/v1/D14-1162 pp. 1532–1543. [Online]. Available: https://aclanthology.org/D14-1162/

[8] T. Hospedales, A. Antoniou, P. Micaelli, and A. Storkey, "Meta-learning in neural networks: A survey," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 44, no. 9, pp. 5149–5169, 2021.

[9] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks," *Advances in neural information processing systems*, vol. 25, 2012.

[10] P. He, J. Zhu, Z. Zheng, and M. R. Lyu, "Drain: An online log parsing approach with fixed depth tree," in *2017 IEEE international conference on web services (ICWS)*. IEEE, 2017, pp. 33–40. 12

[11] L. Yang, J. Chen, Z. Wang, W. Wang, J. Jiang, X. Dong, and W. Zhang, "Semi-supervised log-based anomaly detection via probabilistic label estimation," in *2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE)*. IEEE, 2021, pp. 1448–1460.

[12] X. Zhang, Y. Xu, Q. Lin, B. Qiao, H. Zhang, Y. Dang, C. Xie, X. Yang, Q. Cheng, Z. Li et al., "Robust log-based anomaly detection on unstable log data," in *Proceedings of the 2019 27th ACM joint meeting on European software engineering conference and symposium on the foundations of software engineering*, 2019, pp. 807–817.

[13] B. Dit, L. Guerrouj, D. Poshyvanyk, and G. Antoniol, "Can better identifier splitting techniques help feature location?" in *2011 IEEE 19th International Conference on Program Comprehension. IEEE*, 2011, pp. 11–20.

[14] G. Salton and C. Buckley, "Term-weighting approaches in automatic text retrieval," *Information processing & management*, vol. 24, no. 5, pp. 513–523, 1988.

[15] C. Finn, P. Abbeel, and S. Levine, "Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks," in *International conference on machine learning*. PMLR, 2017, pp. 1126–1135.

[16] W. Xu, L. Huang, A. Fox, D. Patterson, and M. I. Jordan, "Detecting large-scale system problems by mining console logs," in *Proceedings of the ACM SIGOPS 22nd Symposium on Operating Systems Principles*, ser. SOSP '09. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2009. doi: 10.1145/1629575.1629587. ISBN 9781605587523 p. 117–132.

[17] J. Zhu, S. He, P. He, J. Liu, and M. R. Lyu, " Loghub: A Large Collection of System Log Datasets for AI-driven Log Analytics ," in *2023 IEEE 34th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE)*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, Oct. 2023. doi: 10.1109/ISSRE59848.2023.00071 pp. 355–366.

[18] A. Oliner and J. Stearley, "What supercomputers say: A study of five system logs," in *37th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'07)*, 2007. doi: 10.1109/DSN.2007.103 pp. 575–584.

[19] D. Li, Y. Yang, Y.-Z. Song, and T. M. Hospedales, "Learning to generalize: meta-learning for domain generalization," in *Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence and Thirtieth Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference and Eighth AAAI Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence*, ser. AAAI'18/IAAI'18/EAAI'18. AAAI Press, 2018. ISBN 978-1-57735- 800-8.

Hiệu chỉnh mô hình ngôn ngữ cho bài toán hỏi đáp văn bản luật

Vũ Thị Kim Như

Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: kimnhu276@gmail.com

Tóm tắt:

Phân tích văn bản luật có nhiều ứng dụng quan trọng trong việc tìm hiểu và ra quyết định trọng lĩnh vực pháp lý. Tuy nhiên, ngôn ngữ pháp lý có những đặc điểm khác biệt so với ngôn ngữ tự nhiên thông thường, bao gồm cách diễn đạt chặt chẽ, cấu trúc câu phức tạp, thuật ngữ chuyên ngành và sự phụ thuộc vào bối cảnh luật pháp. Do đó, các mô hình tiền huấn luyện (pretrained models) trên dữ liệu văn bản tổng quát như BERT hay GPT có thể chưa đạt hiệu năng cao khi áp dụng trực tiếp vào xử lý văn bản luật. Bài báo này xây dựng mô hình ngôn ngữ tiền huấn luyện dựa trên kiến trúc XLM-RoBERTa trong lĩnh vực văn bản pháp lý tiếng Việt. Chất lượng của các mô hình được đánh giá dựa trên bộ dữ liệu hỏi-đáp văn bản luật ALQUAC. Kết quả thực nghiệm cho thấy việc hiệu chỉnh giúp tăng khả năng hiểu ngôn ngữ trong lĩnh vực luật của mô hình được cải thiện đáng kể. Mặc dù chỉ sử dụng bộ dữ liệu 112 văn bản luật, mô hình hiệu chỉnh cải thiện mô hình gốc độ đo F1 tăng 7.14%, Precision tăng 6.45%, và vượt trội so với một số mô hình khác như BERT, XLM-R, DeBERTa được tiền huấn luyện trên văn bản tổng quát. Không chỉ giới hạn trong bài toán hỏi đáp, các mô hình tiền huấn luyện còn có khả năng xử lý nhiều tác vụ khác nhau như phân loại văn bản, nhận diện thực thể, và tìm kiếm.

Từ khóa: Học máy, học sâu, hệ hỏi đáp, đọc hiểu văn bản, văn bản quy phạm pháp luật Việt Nam.

1. Giới thiệu

Bài toán hỏi đáp văn bản luật là một nhánh quan trọng của trí tuệ nhân tạo trong luật, nhằm tự động hóa quá trình truy xuất và phân tích thông tin pháp lý. Mục tiêu của hệ thống là cung cấp câu trả lời chính xác dựa trên dữ liệu từ văn bản luật, án lệ, điều khoản pháp lý, hoặc các quy định hiện hành. Bài toán hỏi đáp văn bản luật có thể được chia thành nhiều dạng khác nhau tùy theo cách thức xử lý câu hỏi và cung cấp câu trả lời: Hỏi đáp dựa trên trích xuất thông tin (tìm kiếm và trích xuất thông tin từ các văn bản luật để trả lời câu hỏi), hỏi đáp dựa trên suy diễn pháp lý (hệ thống không chỉ trích xuất thông tin mà còn phải suy luận từ nhiều điều luật khác nhau để đưa ra câu trả lời hợp lý), hỏi đáp dựa trên sinh văn bản (sử dụng mô hình học sâu để tóm tắt hoặc sinh ra câu trả lời thay vì chỉ truy xuất dữ liệu có sẵn),...

Giải quyết bài toán hỏi đáp văn bản luật là một vấn đề đầy thách thức vì các tài liệu pháp lý phức tạp hơn nhiều so với các văn bản thông thường về thuật ngữ, cấu trúc và các mối quan hệ thời gian và logic. Thậm chí còn khó khăn hơn để thực hiện hỏi đáp hợp pháp đối với các ngôn ngữ tài nguyên thấp như tiếng Việt, nơi dữ liệu được dán nhãn là rất hiếm và các mô hình ngôn ngữ được đào tạo trước vẫn còn hạn chế.

Bài toán hỏi đáp văn bản luật có thể được giải quyết theo nhiều hướng tiếp cận khác nhau, trong đó ba hướng chính gồm: Hướng tiếp cận End-to-End (end2end), hướng tiếp cận dựa trên mô hình tiền huấn luyện và hướng tiếp cận tinh chỉnh mô hình. Thứ nhất, End-to-End là quá trình đào tạo một mô hình từ đầu cho bài toán cụ thể về hỏi đáp văn bản pháp luật Việt Nam. Tuy nhiên hướng tiếp cận này cần lượng dữ liệu rất lớn để có thể huấn luyện hiệu quả. Hướng tiếp cận thứ hai là dựa trên mô hình tiền huấn luyện, sử dụng các mô hình ngôn ngữ lớn (Large Language Models - LLMs) đã được tiền huấn luyện trên dữ liệu tổng quát và sau đó áp dụng vào bài toán hỏi đáp pháp luật mà không cần tinh chỉnh lại mô hình. Khi có câu hỏi, mô hình dự đoán câu trả lời dựa trên kiến thức đã học mà không cần thêm dữ liệu huấn luyện chuyên biệt. Ưu điểm là

không cần nhiều dữ liệu huấn luyện chuyên biệt, có thể áp dụng ngay lập tức, mô hình mạnh mẽ, có thể trả lời các câu hỏi phức tạp với kiến thức rộng. Nhưng vẫn có nhiều hạn chế: độ chính xác không cao trong ngữ cảnh pháp lý vì mô hình không được huấn luyện chuyên biệt cho dữ liệu luật. Không đảm bảo tính chính xác do mô hình có thể dựa vào kiến thức chung thay vì căn cứ pháp lý chính xác. Hướng tiếp cận thứ ba là tinh chỉnh mô hình ngôn ngữ lớn trên tập dữ liệu pháp lý chuyên biệt, giúp cải thiện độ chính xác trong việc hỏi đáp văn bản luật. Việc này giúp cải thiện độ chính xác đáng kể so với việc sử dụng trực tiếp mô hình tiền huấn luyện. Mô hình được tối ưu hóa theo ngữ cảnh pháp lý, giúp đảm bảo tính chính xác của câu trả lời.

Để khắc phục các khó khăn đang gặp phải khi nghiên cứu bài toán hỏi đáp về văn bản pháp luật tiếng Việt, cần thiết phải hiệu chỉnh các mô hình ngôn ngữ trên các tập dữ liệu chuyên biệt và phù hợp với bối cảnh pháp lý. Bài báo này tập trung nghiên cứu và đề xuất các phương pháp hiệu chỉnh các mô hình ngôn ngữ tiên tiến, bao gồm Multilingual BERT, XLM-Roberta, Multilingual DeBERTa,... đồng thời phân tích hành vi của mô hình để nâng cao hiệu quả của hệ thống hỏi đáp đối với văn bản luật tiếng Việt. Thông qua việc tinh chỉnh trên các tập dữ liệu pháp luật chuyên biệt, nghiên cứu này không chỉ hướng tới tối ưu hóa khả năng đọc hiểu ngữ nghĩa phức tạp của văn bản pháp lý áp dụng cho bài toán hỏi đáp văn bản luật, mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực hỗ trợ pháp lý và tư vấn luật tự động.

2. Các nghiên cứu liên quan

2.1. Xử lý văn bản luật

Văn bản pháp luật Việt Nam có đặc điểm cấu trúc phức tạp và ngôn ngữ chuyên ngành, gây khó khăn cho việc xử lý tự động bằng các mô hình ngôn ngữ tự nhiên (Natural Language Processing - NLP). Cụ thể, sự phức tạp của văn bản luật Việt Nam được thể hiện: Câu văn dài, nhiều mệnh đề phụ, thường chứa các điều khoản, quy định được liên kết chặt chẽ với nhau. Sử dụng thuật ngữ pháp lý chuyên biệt, khác xa với ngôn ngữ tự nhiên thông thường. Sự phụ thuộc ngữ nghĩa phức tạp, trong đó một điều luật có thể tham chiếu đến nhiều văn bản pháp lý khác nhau. Tính cập nhật liên tục, do hệ thống pháp luật thường xuyên thay đổi và bổ sung.

Những đặc điểm này khiến bài toán hỏi đáp trên văn bản luật trở nên khó khăn hơn so với các bài toán QA thông thường. Các mô hình ngôn ngữ tổng quát như BERT, RoBERTa hay GPT chưa được tối ưu để xử lý đặc thù của văn bản pháp luật, đòi hỏi phải hiệu chỉnh trên dữ liệu chuyên ngành để nâng cao hiệu quả.

Đã có một số nghiên cứu liên quan đến bài toán hỏi đáp văn bản luật Việt Nam nhưng không dùng phương pháp hiệu chỉnh mô hình, tiêu biểu như: Nhóm nghiên cứu gồm Dương Hữu Thành và Hồ Quốc Bảo [1] xây dựng một hệ thống đặt tên là vLawyer, là hệ thống trả lời câu hỏi tiếng Việt để trả lời các câu hỏi đơn giản về văn bản luật doanh nghiệp Việt Nam. Các câu hỏi có thể đề cập đến các quy định, quy trình, thủ tục và chế tài trong luật doanh nghiệp. Hệ thống cho phép một câu hỏi dưới dạng ngôn ngữ tự nhiên và câu trả lời là một điều, một khoản hoặc một câu trong điều, khoản có liên quan. Hệ thống gồm 2 thành phần chính là xử lý câu hỏi và lựa chọn câu trả lời. Câu hỏi sau khi đưa vào hệ thống sẽ được chuyển đổi thành chữ thường và xóa các từ dừng, các từ đặc biệt, mã hóa, chỉ định trình gắn thẻ POS cho truy vấn và trích xuất các cụm từ khóa/từ khóa để xây dựng vào truy vấn Lucene để tìm kiếm các tài liệu có liên quan. Dựa trên các tài liệu đã tìm kiếm ở giai đoạn trên, trích xuất các bài viết để tính toán sự tương đồng với truy vấn của người dùng và kết hợp một số phương pháp tìm kiếm để chọn câu

trả lời tốt nhất. Độ chính xác của hệ thống đạt được là khoảng 70% tuy nhiên hệ thống chỉ đưa ra câu trả lời là một điều, khoản hoặc một đoạn văn bản có nội dung liên quan đến câu hỏi, chưa đưa ra được câu trả lời trực tiếp đáp ứng yêu cầu của câu hỏi.

2.2. Hiệu chỉnh mô hình

Phương pháp được sử dụng là hiệu chỉnh các mô hình ngôn ngữ đã được huấn luyện sẵn. Trong học máy, hiệu chỉnh mô hình là một phương pháp của học chuyển giao (transfer learning) [2] [3], sử dụng trọng số của một mô hình đã được đào tạo sẵn để đào tạo với một bộ dữ liệu mới, phù hợp với mục đích của người dùng và số lượng dữ liệu thường nhỏ hơn khi tiền huấn luyện. Các mô hình ngôn ngữ được đào tạo trước có thể được tinh chỉnh cho các trường hợp cụ thể để phù hợp với mỗi bài toán cần giải quyết. Việc này giúp làm tăng độ chính xác của mô hình hơn so với việc đào tạo trực tiếp với bộ dữ liệu nhỏ của chúng ta.

Một trong những hướng tiếp cận nổi bật trong xử lý ngôn ngữ tự nhiên cho pháp lý là LegalBERT do Chalkidis và cộng sự phát triển [4]. Đây là một phiên bản mở rộng của BERT, được tiền huấn luyện trên tập dữ liệu luật pháp quy mô lớn. Những điểm mạnh của LegalBERT bao gồm: Hiệu suất vượt trội trong các tác vụ pháp lý, như phân loại tài liệu, trích xuất thông tin, và hỏi đáp luật. Khả năng hiểu thuật ngữ pháp lý, nhờ được huấn luyện trên văn bản luật chuyên biệt thay vì dữ liệu tổng quát. Ứng dụng thành công trong nhiều hệ thống pháp lý khác nhau, bao gồm phân tích hợp đồng, hỗ trợ pháp lý tự động, và suy diễn pháp lý.

Bên cạnh đó cũng có một số nghiên cứu về bài toán hỏi đáp trong văn bản luật như: Paulo và cộng sự trình bày một hệ thống hỏi đáp cho các tài liệu pháp lý của Bồ Đào Nha. Cách tiếp cận của họ dựa trên một khuôn khổ ngôn ngữ tính toán và sử dụng nhiều nguồn: phân tích cú pháp tiếp theo là phân tích ngữ nghĩa; và cuối cùng là giải thích ngữ nghĩa/thực dụng bằng cách sử dụng bản thể học và suy luận logic. Monroy và cộng sự mô tả một hệ thống trả lời câu hỏi cho tiếng Tây Ban Nha ở cấp độ nông bằng cách sử dụng đồ thị. Hệ thống có thể đưa ra một tập hợp các bài viết liên quan đến câu hỏi dựa trên sự tương đồng, tức là TF-IDF, giữa các tài liệu thông qua các thuật ngữ trong tài liệu.

Tuy nhiên, các phương pháp nêu trên đều chủ yếu được phát triển cho tiếng Anh và một số ngôn ngữ Châu Âu [5] [6], trong khi tiếng Việt có đặc thù ngữ pháp và hệ thống luật pháp khác biệt. Điều này đặt ra nhu cầu cần xây dựng hoặc tinh chỉnh các mô hình ngôn ngữ chuyên biệt cho luật pháp Việt Nam. Bài báo này xây dựng mô hình ngôn ngữ tiền huấn luyện trong lĩnh vực văn bản pháp lý tiếng Việt. Tương tự như các mô hình ngôn ngữ khác BERT, XLM-R, DeBERTa, mô hình tiền huấn luyện hướng đến khả năng hiểu ngôn ngữ pháp lý, áp dụng cho các tác vụ phân tích khác nhau cho văn bản Luật Việt Nam.

3. Giải pháp

3.1. Các mô hình ngôn ngữ tiền huấn luyện

Chúng tôi đã nghiên cứu một số mô hình phổ biến cho kết quả tốt về các chủ đề tiếng Việt, chủ đề hỏi đáp và đọc hiểu văn bản nói chung và hỏi đáp và đọc hiểu văn bản pháp luật tiếng Việt nói riêng. Đây đều là các mô hình đa ngôn ngữ có khả năng xử lý tiếng Việt, có khả năng tận dụng kiến thức từ các luật quốc tế, giúp mô hình hiểu các thuật ngữ pháp lý tốt hơn, ví dụ:

Mô hình Multilingual BERT [7] [8]: Multilingual BERT (mBERT) là phiên bản đa ngôn ngữ của mô hình BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) – một mô

hình học sâu được phát triển bởi Google, nổi bật với khả năng xử lý ngôn ngữ tự nhiên. mBERT được huấn luyện trên dữ liệu từ 104 ngôn ngữ khác nhau, bao gồm cả tiếng Việt, và có thể áp dụng cho nhiều tác vụ như phân loại văn bản, nhận diện thực thể, trích xuất thông tin và hỏi đáp.

Mô hình XLM-Roberta [9] [10]: XLM-Roberta (XLM-R) là một phiên bản cải tiến của mô hình RoBERTa, được thiết kế để hỗ trợ đa ngôn ngữ. XLM-R được phát triển bởi Facebook AI [11] và được huấn luyện trên dữ liệu văn bản lớn từ 100 ngôn ngữ khác nhau, bao gồm cả tiếng Việt. Mô hình này khắc phục nhiều hạn chế của Multilingual BERT (mBERT) và đạt hiệu suất cao hơn trong nhiều tác vụ xử lý ngôn ngữ tự nhiên. Đặc biệt, trong các ứng dụng cần xử lý tiếng Việt, XLM-R có thể đạt hiệu suất cao nếu được tinh chỉnh trên tập dữ liệu chuyên ngành.

Mô hình Multilingual DeBERTa [12]: Multilingual DeBERTa (mDeBERTa) là phiên bản đa ngôn ngữ của **DeBERTa** (Decoding-enhanced BERT with disentangled attention), một mô hình ngôn ngữ tiên tiến được Microsoft phát triển. Nó kế thừa các đặc tính vượt trội của DeBERTa trong xử lý ngôn ngữ tự nhiên (NLP) và mở rộng để hỗ trợ nhiều ngôn ngữ, bao gồm cả tiếng Việt.

Về mặt kiến trúc, các mô hình có điểm tương đồng về cấu trúc mô hình gồm 12 tầng (layers), 768 chiều ẩn (hidden size), 12 đầu chú ý (attention heads). Tất cả ba mô hình đều nhận đầu vào dưới dạng chuỗi văn bản đã được mã hóa thành token. Tuy có một số khác biệt về cách xử lý dữ liệu đầu vào nhưng đầu ra của cả 3 mô hình trong bài toán hỏi đáp đều là vị trí bắt đầu (start_logits) và kết thúc (end_logits) của câu trả lời trong đoạn văn.

3.2. Hiệu chỉnh mô hình ngôn ngữ cho văn bản luật

Chúng ta cần giải quyết 2 vấn đề chính của bài toán hỏi đáp văn bản pháp luật tiếng Việt. Đầu tiên là khả năng đọc hiểu văn bản. Chúng ta cần xây dựng một hệ thống có thể xác định một câu hỏi có thể trả lời được hay không. Nếu có thể trả lời được, trích xuất câu trả lời từ đoạn văn. Thứ hai là độ phức tạp của văn bản pháp luật tiếng Việt. Mô hình cần được huấn luyện trên 1 lượng dữ liệu lớn văn bản pháp luật tiếng Việt để có thể dự đoán câu trả lời với độ chính xác cao.

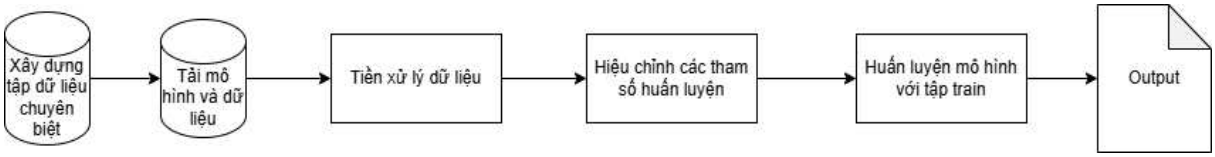
Đầu tiên, để huấn luyện mô hình cho tác vụ hỏi đáp, chia tập dữ liệu thành 2 phần: tập dữ liệu huấn luyện (train dataset) và tập dữ liệu thử nghiệm (test dataset). Tải dữ liệu từ tập dữ liệu huấn luyện vào các cụm: Bối cảnh (context) $C=\{C_1,C_2,...,C_n\}$, câu hỏi (question) $Q=\{Q_1,Q_2,...,Q_n\}$ và câu trả lời (answer) $A=\{A_1,A_2,...,A_n\}$. Tập dữ liệu thử nghiệm có đầu vào bao gồm các cụm: bối cảnh và câu hỏi. Nhiệm vụ của chúng tôi là huấn luyện mô hình trên tập dữ liệu huấn luyện để mô hình có thể tìm ra câu trả lời đúng cho câu hỏi (câu trả lời là văn bản rỗng hoặc một khoảng được trích xuất từ đoạn văn). Để mô hình có thể hiểu được ngôn ngữ của con người, chúng ta cần chuyển đổi các đoạn văn, câu hỏi và câu trả lời từ dạng văn bản sang dạng số. Chúng tôi sử dụng mô hình ngôn ngữ tokenizer tương thích với mô hình ngôn ngữ tiền huấn luyện. Sau đó, chúng tôi tiến hành xử lý dữ liệu để trích xuất các tính năng cần thiết cho mô hình, đưa các tính năng được trích xuất từ tập dữ liệu huấn luyện vào mô hình và huấn luyện. Mô hình sau khi được huấn luyện có thể xác định xem câu hỏi có câu trả lời trong đoạn văn hay không. Đối với các câu hỏi có thể trả lời, khoảng kết quả được trích xuất từ ngữ cảnh được tính bằng cách lấy các giá trị vị trí bắt đầu và vị trí kết thúc của câu trả lời có xác suất cao nhất trong số các vị trí mà mô hình dự đoán. Các trường hợp mà mô hình trả về văn

bản rỗng, bao gồm: câu trả lời nằm trong câu hỏi, câu trả lời có vị trí bắt đầu lớn hơn vị trí kết thúc và xác suất nhỏ hơn ngưỡng rỗng. Hình 1 dưới đây mô tả quá trình hiệu chỉnh mô hình cho tác vụ hỏi đáp.



Hình 1. Quá trình hiệu chỉnh mô hình cho tác vụ hỏi đáp.

Thứ hai, để hiệu chỉnh mô hình đa ngôn ngữ tăng khả năng đọc hiểu văn bản pháp luật Việt Nam, chúng tôi chuẩn bị tập dữ liệu chuyên biệt về pháp luật Việt Nam dưới dạng văn bản thô, không gắn nhãn. Các mô hình được hiệu chỉnh trên Masked Language Modeling (MLM). MLM là một kỹ thuật phổ biến trong việc huấn luyện và hiệu chỉnh các mô hình ngôn ngữ. Trong kỹ thuật này một số token trong văn bản được mask (che đi), thường chiếm khoảng 15% tổng số token. Mô hình được yêu cầu dự đoán các token bị che đó dựa trên ngữ cảnh còn lại của câu. Sau khi xây dựng tập dữ liệu chuyên biệt về pháp luật Việt Nam, tiến hành token hóa văn bản sử dụng tokenizer của mô hình đa ngôn ngữ sau đó che đi (mask) các token ngẫu nhiên trong văn bản để mô hình dự đoán. Tập dữ liệu được chia thành 2 phần: tập dữ liệu huấn luyện (train dataset) và tập dữ liệu đánh giá (eval dataset). Nhiệm vụ của chúng tôi là huấn luyện mô hình trên tập dữ liệu huấn luyện giúp mô hình học cách hiểu rõ hơn các đặc điểm ngữ nghĩa, cú pháp và ngữ cảnh trong dữ liệu văn bản pháp luật tiếng Việt. Mô hình sau khi được huấn luyện có thể trở nên tốt hơn trong việc nắm bắt mối quan hệ giữa các từ và cụm từ, từ đó cải thiện hiệu suất trên các bài toán đọc hiểu. Hình 2 mô tả quá trình hiệu chỉnh mô hình trên Masked Language Modeling.



Hình 2. Quá trình hiệu chỉnh mô hình trên Masked Language Modeling

4. Thực nghiệm, kết quả và thảo luận

4.1. Chuẩn bị dữ liệu thực nghiệm

Để giải quyết 2 vấn đề chính của bài toán, chúng ta cần có 2 tập dữ liệu bao gồm: tập dữ liệu chuyên biệt về văn bản pháp luật tiếng Việt để tăng cường khả năng hiểu ngữ nghĩa phức tạp trong lĩnh vực pháp lý và tập dữ liệu hỏi đáp trên lĩnh vực pháp luật để hiệu chỉnh mô hình sử dụng cho tác vụ hỏi đáp văn bản pháp luật Việt Nam.

Tập dữ liệu không nhãn được xây dựng từ 112 văn bản pháp luật của Việt Nam được thu thập từ trang web luatvietnam.vn. Các văn bản luật sau khi tải về sẽ được tiền xử lý để loại bỏ các ký tự đặc biệt và các khoảng trắng không cần thiết, sau đó sẽ được chia thành các câu hoặc các đoạn văn có độ dài phù hợp (28045 câu/đoạn văn) để đưa vào huấn luyện mô hình Masked Language Model, tăng khả năng đọc hiểu ngữ nghĩa phức tạp trong lĩnh vực pháp lý.

Tập dữ liệu ALQAC [13] [14] [15] chứa 600 cặp câu hỏi và câu trả lời, được thiết kế đặc biệt cho tác vụ hỏi đáp liên quan đến văn bản pháp luật. Bộ dữ liệu này có cấu trúc dạng bảng với các cột như sau:

Context: Đoạn văn bản pháp luật làm ngữ cảnh. Các đoạn văn bản có từ một vài câu đến một đoạn văn bản dài, thường là các điều luật hoặc mô tả quy định pháp lý, có độ dài biến động, trung bình khoảng 100 - 300 từ.

Question: Câu hỏi liên quan đến ngữ cảnh. Đa số các câu hỏi có độ dài khoảng 10-20 từ.

Answer: Câu trả lời chính xác trích xuất từ ngữ cảnh.

4.2. Các độ đo đánh giá

Bài báo sử dụng các độ đo độ chính xác (Precision), độ nhạy (Recall), hiệu suất (F1-score) để đánh giá hiệu năng trích xuất thông tin của các mô hình.

Độ chính xác (Precision): Trong bài toán của chúng ta, Precision đánh giá mức độ chính xác của mô hình trong việc dự đoán các câu trả lời đúng. Cụ thể, nó đo lường trong tất cả các từ hoặc cụm từ mà mô hình dự đoán là câu trả lời, có bao nhiêu từ/cụm từ thực sự đúng.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Độ nhạy (Recall): Recall trong bài toán đo lường khả năng của mô hình trong việc phát hiện ra tất cả các từ hoặc cụm từ đúng mà câu trả lời tham chiếu yêu cầu. Nó đo lường trong tất cả các từ hoặc cụm từ đúng cần trích xuất, mô hình đã dự đoán được bao nhiêu phần.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Hiệu suất (F1-score): F1-score là độ đo đánh giá hiệu suất của mô hình bằng cách cân bằng giữa hai độ đo Precision và Recall. F1-score giúp đánh giá hiệu suất của mô hình khi xử lý bài toán hỏi đáp trích xuất thông tin. F1-score là trung bình điều hòa giữa Precision và Recall, đảm bảo rằng mô hình không ưu tiên quá mức một trong hai yếu tố.

$$F1 - score = 2\frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

Trong đó:

TP (True Positives): Số từ/cụm từ trong câu trả lời được mô hình dự đoán đúng và thực sự thuộc câu trả lời tham chiếu.

FP (False Positives): Số từ/cụm từ được mô hình dự đoán là câu trả lời nhưng không thuộc câu trả lời tham chiếu.

FN (False Negatives): Số từ/cụm từ thực sự đúng nhưng mô hình không dự đoán được.

4.3. Kết quả và thảo luận

Chúng tôi đã hiệu chỉnh và đánh giá 3 mô hình mà chúng tôi cho rằng có khả năng xử lý tốt bài toán: Multilingual BERT, XLM-Roberta, Multilingual DeBERTa. Đối với 3 mô hình này, chúng tôi sử dụng phương pháp là hiệu chỉnh mô hình cho tác vụ hỏi đáp văn bản luật với tập dữ liệu ALQAC.

Tuy nhiên, do tập dữ liệu ALQAC còn hạn chế về số lượng mẫu dữ liệu, để làm giàu mô hình trên miền pháp luật Việt Nam, chúng tôi chọn mô hình XLM-Roberta, sử dụng tập dữ liệu pháp luật Việt Nam không nhãn để hiệu chỉnh mô hình dưới hình thức Masked Language Model (tốc độ học (learning_rate) = 2e-5, số lượng mẫu (batch_size) = 16, số vòng lặp huấn

luyện (epochs) = 10), huấn luyện hoàn thành trong khoảng thời gian hơn 100 giờ, tăng khả năng đọc hiểu văn bản pháp luật Việt Nam, sau đó tiếp tục đào tạo mô hình với tập dữ liệu ALQAC.

Kết quả cuối cùng các độ đo đánh giá các mô hình trên tác vụ hỏi đáp được thể hiện ở Bảng 1 dưới đây:

Bảng 1. Kết quả thực nghiệm hiệu chỉnh các mô hình ngôn ngữ cho tác vụ hỏi đáp

Pretrained Model (Huggingface card)	**Precision**	**Recall**	**F1-score**
google-bert/bert-base-multilingual-cased	69.11	77.43	70.21
distilbert-multilingual-cased	51.74	62.05	51.21
xlm-roberta-base	69.45	76.87	66.64
microsoft/mDeBERTa-v3-base	70.42	75.89	73.05
xml-roberta-mlm-finetuned	**75.90**	**79.04**	**73.78**

Kết quả thực nghiệm cho thấy các mô hình đa ngôn ngữ đã được đào tạo sẵn sau khi được tinh chỉnh với tác vụ hỏi đáp đều cho kết quả tương đối khả quan (F1-score đạt từ 50-75%). Đồng thời cũng cho thấy việc hiệu chỉnh mô hình đa ngôn ngữ xlm-roberta-base với tập dữ liệu chuyên biệt về pháp luật Việt Nam có thể làm tăng đáng kể hiệu suất của mô hình so với mô hình ban đầu trong việc thực hiện tác vụ hỏi đáp văn bản luật Việt Nam. Điều này thể hiện tiềm năng rất lớn của việc làm giàu mô hình bằng dữ liệu không nhãn, cải thiện hiệu suất mô hình đa ngôn ngữ đối với văn bản pháp luật Việt Nam, mô hình sau khi được làm giàu không chỉ dừng lại ở việc sử dụng cho bài toán hỏi đáp, mà còn có thể được sử dụng cho nhiều bài toán khác liên quan đến pháp luật.

Bảng 2 trình bày kết quả dự đoán câu trả lời cho 1 số mẫu với ngữ cảnh cụ thể:

Bảng 2. Kết quả trích xuất thông tin một số mẫu dữ liệu được thử nghiệm với mô hình xlm-roberta-base trước và sau khi hiệu chỉnh.

Context	Quân nhân tại ngũ và quân nhân dự bị gồm có sĩ quan, quân nhân chuyên nghiệp, hạ sĩ quan và binh sĩ. Chế độ phục vụ của sĩ quan do Luật Sĩ quan Quân đội nhân dân Việt Nam quy định.	Các bộ, Ủy ban Nhà nước, các cơ quan khác thuộc Chính phủ, Ủy ban chỉ đạo giáo dục quốc phòng nhân dân, Ủy ban nhân dân tỉnh, thành phố trực thuộc trung ương và cấp tương đương có trường dạy nghề, trường trung học chuyên nghiệp, trường cao đẳng, trường đại học có trách nhiệm đào tạo cán bộ, nhân viên chuyên môn, kỹ thuật cho quân đội, theo kế hoạch của Bộ Quốc phòng đã được Chính phủ phê chuẩn.	Quân nhân tại ngũ và quân nhân dự bị được phong cấp bậc quân hàm tương ứng với chức vụ. Hệ thống cấp bậc quân hàm của Quân đội nhân dân Việt Nam do Ủy ban thường vụ Quốc hội quy định. Việc phong, thăng, giáng và tước cấp bậc quân hàm của sĩ quan do Luật Sĩ quan Quân đội nhân dân Việt Nam quy định. Việc phong, thăng, giáng và tước cấp bậc quân hàm của quân nhân chuyên nghiệp

			do Chính phủ quy định. Việc phong, thăng, giáng và tước cấp bậc quân hàm của hạ sĩ quan và binh sĩ do Bộ trưởng Bộ Quốc phòng quy định.
Question	Quân nhân tại ngũ và quân nhân dự bị bao gồm những đối tượng nào?	Kế hoạch đào tạo cán bộ và nhân viên kỹ thuật cho quân đội cần được ai phê chuẩn?	Việc phong, thăng, giáng và tước cấp bậc quân hàm của sĩ quan được quy định bởi luật nào?
Answer(true)	sĩ quan, quân nhân chuyên nghiệp, hạ sĩ quan và binh sĩ	Chính phủ	Luật Sĩ quan Quân đội nhân dân Việt Nam
Answer (Model xlm-roberta-base)	sĩ quan và binh sĩ	Chính phủ	Sĩ quan
Answer (Model xlm-roberta-mlm-finetuned)	sĩ quan, quân nhân chuyên nghiệp, hạ sĩ quan và binh sĩ	Bộ Quốc phòng	Bộ trưởng Bộ Quốc phòng

Với mẫu dữ liệu đầu tiên, mô hình sau khi được hiệu chỉnh thông qua MLM đã khắc phục được lỗi bỏ sót thông tin quan trọng, điều này chứng tỏ việc làm giàu mô hình đã đạt hiệu quả, giúo mô hình có thể xác định chính xác hơn thông tin cần trích xuất để đưa ra câu trả lời. Với mẫu dữ liệu số 2, mô hình sau khi hiệu chỉnh mắc lỗi xác định sai ngữ cảnh, do lẫn lộn giữa các thực thể có vai trò gần nhau (Chính phủ vs. Bộ Quốc phòng) và do ngữ cảnh xung quanh: Mô hình có thể bị ảnh hưởng bởi câu "theo kế hoạch của Bộ Quốc phòng đã được Chính phủ phê chuẩn" và chọn sai thực thể. Để khắc phục lỗi này, chúng tôi sẽ tăng cường dữ liệu huấn luyện có các câu hỏi tương tự để mô hình hiểu vai trò từng thực thể. Với mẫu dữ liệu số 3, cả 2 mô hình đều mắc lỗi chọn sai thực thể. Đối với mô hình xlm-roberta-base, mô hình tiếp tục mắc lỗi giống như mẫu dữ liệu đầu tiên đó là bỏ sót thông tin quan trọng, mô hình quá phụ thuộc vào các danh từ chung như "sĩ quan" thay vì nhận diện tên luật chính xác. Đối với mô hình xlm-roberta-mlm-finetuned do dữ liệu “context” có tính nhập nhằng, chứa nhiều thông tin tương tự nhau dẫn đến mô hình bị nhầm lẫn và trích xuất thông tin sai vị trí, dẫn đến câu trả lời sai. Để khắc phục lỗi ngày, chúng tôi sẽ tăng cường bộ dữ liệu không nhãn lớn hơn để hiệu chỉnh mô hình tăng khả năng đọc hiểu văn bản luật hơn nữa, đồng thời tăng cường dữ liệu huấn luyện có các câu hỏi tương tự, sử dụng câu hỏi có cấu trúc rõ ràng và tường minh hơn để mô hình có thể hiểu và trích xuất thông tin một cách chính xác hơn.

Trong các đa số các trường hợp trích xuất câu trả lời từ đoạn văn bản mô hình của tôi đều có thể đưa ra câu trả lời đúng. Tuy nhiên, trong trường hợp câu hỏi phức tạp, chưa thực sự tường minh, hoặc trong đoạn văn bản có chứa nhiều thông tin gần tương tự nhau thì mô hình vẫn còn dự đoán câu trả lời sai. Kết quả trên cho thấy việc hiệu chỉnh mô hình ngôn ngữ có thể giúp mô hình trích xuất thông tin chính xác hơn và đưa ra câu trả lời đúng với nội dung câu hỏi. Tuy nhiên vẫn còn một số trường hợp cả 2 mô hình đều trả lời sai hoặc mô hình sau khi hiệu chỉnh lại đưa ra câu trả lời sai so với mô hình ban đầu. Điều này chứng tỏ rằng việc hiệu chỉnh

mô hình có khả năng đọc hiểu các văn bản pháp lý cần được thực hiện một cách chi tiết hơn, với bộ dữ liệu đủ lớn và các tham số thích hợp để có thể tối ưu kết quả trích xuất thông tin, sử dụng trong bài toán hỏi đáp văn bản pháp luật Việt Nam.

5. Kết luận

Bài toán hỏi đáp văn bản luật với tập dữ liệu ALQAC đặt ra cho chúng ta nhiều thách thức. Thách thức lớn nhất là tìm ra câu trả lời chính xác cho các câu hỏi liên quan đến pháp luật. Các văn bản pháp luật có tính chất phức tạp, sử dụng ngôn ngữ chuyên ngành và yêu cầu sự hiểu biết sâu sắc để có thể trích xuất thông tin và trả lời câu hỏi một cách chính xác. Bên cạnh đó, câu hỏi sử dụng từ đồng nghĩa hoặc kiến thức tương đương cũng gây ra nhiều khó khăn cho các mô hình dự đoán. Do đó, chúng ta cần giải quyết các vấn đề này nếu muốn tăng độ chính xác của bài toán. Trong bài báo này, chúng tôi đã thử nghiệm thành công với nhiều mô hình dự đoán câu trả lời khác nhau, làm nổi bật hiệu suất của việc hiệu chỉnh các mô hình đa ngôn ngữ trên tập dữ liệu chuyên biệt văn bản pháp luật Việt Nam.

Tuy nhiên, hiệu suất của các mô hình mặc dù đã được cải thiện nhưng chưa thực sự đạt được hiệu suất cao. Do đó, mục tiêu trong tương lai của chúng tôi là tiếp tục xây dựng tập dữ liệu đa dạng hơn để hiệu chỉnh các mô hình đa ngôn ngữ tăng hiệu suất đọc hiểu văn bản pháp luật Việt Nam. Sau đó, chúng tôi kết hợp nó với truy hồi thông tin để xây dựng một hệ thống trả lời câu hỏi nguồn mở hoàn chỉnh. Do bài toán đọc hiểu văn bản cần một đoạn văn đầu vào trước khi đặt câu hỏi để có thể trích xuất câu trả lời nên tính ứng dụng không cao. Thay vào đó, một mô hình tiếp nhận câu hỏi sau đó truy xuất các văn bản liên quan và dự đoán câu trả lời sẽ có tính ứng dụng cao hơn. Hệ thống trả lời câu hỏi tự động này sẽ gồm 2 giai đoạn chính là truy hồi thông tin để tìm các tài liệu liên quan đến câu hỏi và trích xuất thông tin đưa ra câu trả lời.

Tài liệu tham khảo

[1] H.-T. D. a. B.-Q. Ho, A Vietnamese Question Answering System in Vietnam's, CISIM 2015, 2015.

[2] M.-W. C. K. L. K. T. Jacob Devlin, BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, arXiv:1810.04805.

[3] Z. e. a. Yang, XLNet: Generalized Autoregressive Pretraining for Language Understanding, arxiv:1906.08237.

[4] M. F. P. M. N. A. a. I. A. Ilias Chalkidis, LEGAL-BERT: The Muppets straight out of Law School, Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2020, pages 2898–2904, Online. Association for Computational Linguistics, 2020.

[5] C. P. V. A. P. V. Raquel Silveira, LegalBert-pt: A Pretrained Language Model for the Brazilian Portuguese Legal Domain, 2023.

[6] ITALIAN-LEGAL-BERT models for improving natural language processing tasks in the Italian legal domain, 2024.

[7] T. G. AI, Multilingual Neural Machine Translation with BERT, NIPS Workshop 2020.

[8] P. Q. V. Dương Triệu Vĩ, Enhancing Vietnamese Named Entity Recognition Using Multilingual BERT, Hội thảo khoa học NLP tiếng Việt, 2021.

[9] A. Conneau, K. Khandelwal, N. Goyal, V. Chaudhary, G. Wenzek, F. Guzmán and E. Grave, M, Unsupervised Cross-Lingual Representation Learning at Scale, Arxiv Preprint Arxiv:1911.02116.

[10] V. Researchers, XTREME: A Massively Multilingual Benchmark for Evaluating Cross-lingual Generalization, arXiv:2003.11080.

[11] M. O. N. G. J. D. M. J. D. C. O. L. M. L. L. Z. V. S. Y. Liu, Roberta: A Robustly Optimized Bert Pretraining Approach, Arxiv Preprint Arxiv:1907.11692.

[12] X. L. J. G. W. C. Pengcheng He, DeBERTa: Decoding-enhanced BERT with Disentangled Attention, arXiv:2006.03654.

[13] X.-H. N. N.-D. M. M.-Q. H. V.-H. N. H.-V. N. H.-T. N. T.-H.-Y. V. Tan-Minh Nguyen, NOWJ1@ALQAC 2023: Enhancing Legal Task Performance with Classic Statistical Models and Pre-trained Language Models, arxiv.2309.09070v1.

[14] D.-Q. N. H.-T. N. T.-T. P. Hai-Long Nguyen, NeCo@ALQAC 2023: Legal Domain Knowledge Acquisition for Low-Resource Languages through Data Enrichment, arxiv.2309.05500.

[15] T.-P. Nguyen, Vietnamese Legal Question Answering: An Experimental Study.

A fine-tuned language model for legal question answering

Abstract: *Legal question answering systems with the ability to search and extract information from legal documents have opened up potential applications in legal support, legal consulting and automatic text information search. However, due to differences in language structure and semantic characteristics of legal documents, current language models can extract information from legal documents but the performance is not high, so it is necessary to calibrate language models on specialized data sets of Vietnamese law. This paper focuses on researching methods to calibrate pretrained language models (PLM) with the aim of optimizing the ability to ask and answer questions for Vietnamese legal documents, through text reading and comprehension techniques. The method used is fine-tuning language models such as Multilingual BERT, XLM-R, DeBERTa, ... on a specialized dataset of Vietnamese legal documents to enhance the ability to understand complex semantics in the legal field. The results show the great potential of this method in processing Vietnamese legal documents.*

Keywords: Machine learning, deep learning, question answering system, text reading comprehension, Vietnamese legal documents.

A Novel Hybrid Model for Cyber-Attack Detection

Van Quan Nguyen[1], Long Thanh Ngo[1], Viet Hung Nguyen[1], Le Minh Nguyen[2]

[1]Le Quy Don Technical University

[2] Japan Advanced Institute of Science and Technology

Email: {quannv, ngotlong, hungnv}@lqdtu.edu.vn, nguyenml@jaist.ac.jp

Contact number: 0972.822.874

Abstract

The rapid advancement of digital transformation, driven by AI and big data, has significantly enhanced global connectivity but also introduced new cybersecurity challenges. Traditional intrusion detection systems (IDS), including signaturebased and anomaly-based methods, struggle to detect novel attack patterns and often suffer from high false positive rates. Two major limitations of existing methods are: (i) the inability to effectively reduce the hypervolume of the normal data region in the latent space, making it difficult to clearly distinguish between normal and abnormal data, and (ii) the failure to adequately capture the complex probability distributions of normal network data, leading to oversimplified representations.

This paper proposes a novel deep learning model, VAE-SVDD, which combines the Variational Auto-Encoder (VAE) with Support Vector Data Description (SVDD) to optimize the latent space and improve anomaly detection accuracy. By reducing the hypervolume of normal data, the VAE-SVDD model enables more distinct differentiation between normal and abnormal data. The integration of a Gaussian prior and SVDD further enhances the representation of normal data distributions, improving the model's ability to generalize to previously unseen anomalies. The proposed model can effectively learn significant, high-level latent features, demonstrating improved performance in feature extraction, anomaly detection, and managing complex, non-linear data patterns.

Experimental evaluations on benchmark datasets (NSL-KDD, UNSW-NB15, and CIC-IDS-2017) show that the model outperforms existing methods. This approach provides a robust, scalable, and precise solution for anomaly detection in network security.

Keywords: *Latent Representation, Deep Learning, Generative Model, Cyber-Attack Detection.*

I. Introduction

The rapid advancement of digital transformation worldwide delivers substantial benefits and profoundly influences various aspects of human society. This process has significantly enhanced global connectivity, facilitating seamless cross-border interactions between businesses and individuals [1]. Modern and advanced information technologies, particularly artificial intelligence (AI) and big data analytics, have enabled people to access new high-quality services and enhanced experiences. The concepts of smart cities, smart transportation, smart healthcare, and smart education are gaining increasing global attention and adoption. Consequently, the volume of data generated and exchanged in the digital space is growing exponentially, serving as the primary resource and driving force for global development in the digital age [2].

Along with this rapid advancement, cyberspace is encountering progressively more fierce challenges [3]. Specifically, with the emergence of new devices, services, and connection protocols, particularly the widespread use of Internet of Things (IoT) devices and cloud technology, the attack surface and potential vectors for cybercriminal activities have been significantly expanded [4], [5]. Attackers increasingly develop various types of malicious malware and exploit code to target vulnerabilities across multiple platforms, aiming to

compromise critical infrastructure and sensitive information [6]. In addition, attackers are becoming more sophisticated and organized, coordinating large-scale attack campaigns that involve multiple stages, such as Advanced Persistent Threat (APT), ransomware attacks, and zero-day exploits, which can cause heavy damage to organizations [7], [8].

Researchers widely regard intrusion detection systems (IDS) as highly effective solutions for modern cybersecurity. They offer a robust method for safeguarding the integrity, confidentiality, and availability of network infrastructures and applications [9]. Based on their detection mechanisms, IDSs can be categorized into two primary subclasses: Signaturebased detection systems (SIDS) and anomaly-based detection systems (AIDS) [10]. Although SIDS achieves a high level of accuracy in identifying known attacks, it has several intrinsic drawbacks. Firstly, it lacks the capability to detect modifications of known attacks, especially zero-day attacks. Secondly, the system depends on frequent updates to include new attack patterns. Furthermore, as the signature database grows, the processing time for requests increases, reducing its suitability for practical use [11]. AIDS creates a baseline profile of normal network behavior and identifies activities that surpass a predefined threshold as anomalous. This approach effectively addresses the shortcomings of SIDS and demonstrates the ability to effectively detect zero-day attacks [12]. In recent years, the research community has shown significant interest in applying deep learning (DL) techniques to develop IDS for detecting network anomalies [13], [14]. This trend is driven by the advancements in modern DL architectures, which excel at extracting meaningful, high-level abstract features and effectively decomposing heterogeneous network data [15]. However, the rapid advancement of network technologies, the emergence of innovative connection frameworks, and the proliferation of big-data-driven applications generating enormous volumes of data have led to an evolving data architecture and nature, presenting new challenges [3]. These advancements highlight the necessity for a new generation of AIDS systems that offer improved performance to tackle problems like elevated false positive rates and slow processing speeds. This article focuses on addressing two significant shortcomings present in current research works, specifically outlined as follows:

(i) A major limitation in current research is the absence ofeffective constraints to reduce the hypervolume of the normal data region in the latent space, which complicates the clear delineation between normal and abnormal data. This issue arises from several factors. Firstly, many existing methods do not impose sufficient restrictions in the latent space to effectively minimize the volume of the normal data region. Secondly, the design of many models often emphasizes overall accuracy without optimizing the latent space structure for more precise separation. Thirdly, the normal data points tend to be dispersed throughout the latent space, causing the normal region to occupy a larger-than-necessary volume. However, we believe that the primary cause of this challenge is the lack of an appropriate regularizer that can effectively bring normal data points closer together in the latent space. Without such a regularizer, the hypervolume of the normal region remains large, making it difficult to clearly distinguish between normal and abnormal data. To address this limitation, novel strategies for latent space optimization are needed, focusing on the incorporation of stronger constraints to enhance the clarity of data boundaries.

(ii) Another critical issue in current research is the challenge of learning the probability distributions of normal network data. Several factors contribute to this problem. First, many existing methods fail to accurately model normal data's complex, often non-linear distributions. Second, these models tend to focus on global features, neglecting local patterns that may be essential for distinguishing different normal behaviors within the network data. Third, the absence of appropriate regularization techniques prevents the model from capturing the full range of normal data variations, leading to an oversimplified representation. However, we argue that the primary cause of this challenge lies in the failure to adequately capture the subtle variations within the probability distributions of normal network data. Without a model capable of distinguishing these variations, it becomes difficult to learn effective representations of normal data. To address this limitation, more advanced techniques for learning the probability distributions of normal data are needed. These methods should focus on enhancing the model's ability to capture global and local patterns within the normal data while incorporating effective regularization to better capture the diversity within the normal data distribution. This paper proposes a novel DL model to address the challenges discussed earlier. The model is built upon the Variational Auto-Encoder (VAE) architecture, which enables the extraction of high-level latent features by mapping input data into a compact and informative latent space. To further enhance its capability to represent normal network data, the model incorporates a Gaussian prior in the latent space, allowing for accurate estimation of the underlying probability distribution of normal data. This ensures robust generalization and effective handling of normal network variations. Additionally, the proposed approach directly integrates the Support Vector Data Description (SVDD) technique into the latent space, enforcing the compactness of normal data distributions. This integrated model is called a Variational Auto-Encoder with Support Vector Data Description (VAE-SVDD). This integration reduces the hypervolume of the normal data region and creates clearer boundaries for distinguishing between normal and abnormal data, significantly improving anomaly detection performance. The proposed model offers several key advantages, including enhanced feature learning, robust distribution estimation, and improved precision in anomaly detection. Moreover, its scalable and flexible design makes it well-suited for a wide range of network data applications. By combining the strengths of VAE and SVDD, the model provides a robust and comprehensive framework for addressing the challenges of modeling and detecting anomalies in network data. We conducted experiments using datasets such as NSL-KDD, UNSW-NB15, and CIC-IDS-2017 to evaluate the performance of our proposed model. In summary, the major contributions of this paper are as follows:

• Introduction of VAE-SVDD: We propose a novel model, VAE-SVDD, which combines the Variational AutoEncoder (VAE) architecture with the Support Vector Data Description (SVDD) technique. The VAE component enables the extraction of high-level latent features by mapping input data into a compact and structured latent space, while the SVDD integration ensures that normal data points form a compact region, effectively reducing the hypervolume of the normal data distribution. This combination allows the model to achieve precise delineation between normal and abnormal data, enhancing anomaly detection capabilities. Additionally, by incorporating a Gaussian prior in the latent space, the model achieves a more accurate estimation of the probability distribution of normal data. The synergy

between VAE and SVDD provides robustness against noise and variability in the data, making the model suitable for real-world applications.

• Comprehensive Experimental Evaluation: We conduct thorough experiments to evaluate the performance of the proposed model on widely recognized benchmark datasets, including NSL-KDD, UNSW-NB15, and CICIDS-2017. The evaluation includes comparisons with baseline methods and state-of-the-art models, demonstrating the superiority of VAE-SVDD in terms of accuracy.

The structure of the paper is as follows: Section II summarizes recent advancements in anomaly detection. Section III provides the essential background needed to comprehend the proposal models. Next, we will comprehensively explain the newly proposed VAE-SVDD model in Section IV. Sections V and VI will discuss the data set, the experimental setup, results, and comparisons. In Section VII, we will wrap up by summarizing the paper and suggesting possible directions for future research.

II. Related Work

Shone et al. [16] introduced an innovative DL method for network intrusion detection. They specifically developed an asymmetric Auto-Encoder (AE) architecture to capture the latent features of network data in an unsupervised manner. Subsequently, they designed a classification model that combines stacked AEs with Random Forest (RF) for network data classification. Their experimental results on the KDD99 and NSL-KDD datasets demonstrated that the proposed model outperforms the Deep Belief Network (DBN). However, a limitation of their approach is that it has not been evaluated on more recent datasets featuring the latest attack patterns or IoT network attack data.

In the paper by Nicolau et al. [17], the authors introduced new latent representation learning models to enhance the performance of anomaly-based network attack detection. Specifically, they proposed novel regularizers for the AE and VAE model architectures: Shrink Auto-Encoder (SAE) and Dirac Delta Variational Auto-Encoder. These regularizers aim to guide normal data points toward a specific region in the latent space during training, thereby improving the distinction between normal and abnormal data. Experiments on the NSLKDD, UNSW-NB15, and CTU-13 datasets demonstrated that these models yield higher quality features than AE and VAE in representing normal network data. However, these approaches' limitations are the failure to minimize the hypervolume of the normal data region in the latent space.

In [18], the researchers proposed deep Generative Learning Models for Cloud Intrusion Detection Systems (IDS). They specifically employed the Conditional Denoising Adversarial Auto-Encoder (CDAAE) model to generate targeted types of malicious data. This model was then combined with the Knearest neighbor (KNN) algorithm to establish a malicious data boundary, thereby enhancing the accuracy of Cloud IDS. Experimental results across four cloud datasets demonstrated that their approach outperformed baseline models and several existing methods. However, a limitation of this approach is that the generation of attack data is solely based on label information, without incorporating additional fundamental details about the various types of attacks.

The study in [19] introduced a model that combines Sparse Auto-Encoder (AE) and kernels for cyber attack detection. An adaptive genetic algorithm was also employed to optimize

the objective function during the training process. The performance of the proposed model was evaluated using Bonetbased attack data targeting IoT networks. Experimental results indicated that the proposed model enhances attack detection accuracy compared to traditional and deep learning-based feature extraction methods. However, a limitation of this approach is that it has only been tested on Bonet-based attack data and has not been validated with newly updated attack datasets.

The authors of [20] introduced an adversarial learning model for network intrusion detection, named SAVAER-DNN, which combines the Supervised Adversarial Variational AutoEncoder with Regularization (SAVAER) and a Deep Neural Network (DNN). Experimental results on two benchmark datasets (NSL-KDD and UNSW-NB15) demonstrated that the proposed model outperforms eight well-established classifiers in detecting low-frequency and zero-day attacks, showing superior overall accuracy, detection rate, and F1 score. However, a limitation of this work is that the attack data used for training is outdated and has not been updated.

III. Background

This section presents the mathematical foundations of the Variational Auto-Encoder (VAE) model and the Support Vector Data Description (SVDD) algorithm to clearly understand the proposed model.

1) Variational Auto-Encoder: The Variational AutoEncoder (VAE) [21] is a probabilistic graphical model that employs approximate variational inference and can be trained using gradient-based techniques [22]. It offers a foundational framework for training deep latent variable models and inference models using stochastic gradient descent (SGD). A VAE comprises two primary components: The Encoder (recognition model) and the Decoder (generative model). We focus on deep latent variable models where latent variables play an important role but remain unobservable. We denote the observed variables as **x** and the latent variables as **z**, with $p_\theta(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ representing the joint distribution over **x** and **z**. Generally, we assume that **z** are continuous latent variables. The marginal distribution, or model evidence, over observed **x** is expressed as follows:

$$p_\theta(\boldsymbol{x}) = \int p_\theta(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z}) dz$$

The primary challenge in maximum likelihood learning within latent variable models lies in the intractability of model evidence. It means that $p_\theta(\boldsymbol{x})$ does not have an analytic solution. The intractability of $p_\theta(\boldsymbol{x})$ is related to the intractability of the posterior distribution $p_\theta(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x})$. Following Bayes' theorem, we have:

$$p_\theta(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x}) = \frac{p_\theta(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z})}{p_\theta(\boldsymbol{x})}$$

Since $p_\theta(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z})$ is computationally feasible, having having a tractable marginal distribution $p_\theta(\boldsymbol{x})$ implies a tractable $p_\theta(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x})$. To transform the challenging intractable posterior inference into a tractable one, a parametric inference model $q_\psi(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x})$ is introduced. Here ψ represents the parameters of this inference model (recognition model), which are optimized to satisfy:

$$q_{\psi}(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x}) \approx p_{\theta}(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x})$$

The optimization task of VAE is the evidence lower bound (ELBO).

2) Support Vector Data Description: The authors of paper [23] proposed the SVDD method to identify the smallest radius R of the hypersphere that contains all data points in the Reconstructed Kernel Hilbert Space (RKHS) using the kernel function $\emptyset\ (.,\theta)$. Essentially, SVDD seeks to find the smallest hypersphere with center **c** in RKHS and a radius R > 0, that contains the majority of the data samples. The optimization challenge can be expressed as follows:

$$min_{R,c,\varepsilon}\ R^2\ +\ \frac{1}{\nu n}\sum_{i=1}^{l}\varepsilon_i$$

s.t. $\|\phi(\boldsymbol{x}_i,\theta) - \boldsymbol{c}\|^2\ \leq\ R^2 +\ \varepsilon_i,\ \ \varepsilon_i\ \geq 0, \forall\ i$

Here, ε_i is a non-negative variable for i = 1, 2, 3, ...n}, θ stands for the mapping hyperparameter; c represents the center of the hypersphere; R denotes its radius; l is the sample size; A specified fraction $\nu\ \in (0, 1]$ of data points in training set are permitted to lie outside the hypersphere by having non-zero slack variables ε_i assigned to them.

IV. Proposed Methodology

1) Variational Auto-Encoder with Support Vector Data Description (VAE-SVDD): Through the training of the proposed models, we aim to achieve two primary goals: first, to extract compact, informative, and discriminative features that effectively represent normal data within the latent space, and second, to optimize the spatial extent of the normal data region within this space. This approach is expected to clearly delineate the boundary between normal data and anomalies, such as cyber-attacks, within the latent space. By incorporating prior knowledge regarding the distribution of the latent layer, the model will learn a posterior probability that more accurately reflects the likelihood of normal data, thereby improving anomaly detection performance. The goal is to develop a method that can effectively capture a latent space representation that distinctly characterizes normal data patterns.

To this end, we introduce a novel deep learning model, Variational Auto-Encoder with Support Vector Data Description (VAE-SVDD), designed specifically for anomaly detection in normal data regions. The architecture of VAE-SVDD extends the traditional VAE framework by incorporating an SVDD layer. This additional layer is positioned after the encoding phase and before the bottleneck, acting as a regularization mechanism that learns a hypersphere that tightly bounds the normal data in the latent space, effectively minimizing its volume. This hypersphere encapsulates the core structure of normal data, making it easier to identify anomalies that lie outside this region. The objective function for training the VAE-SVDD model is expressed as follows:

$$\boldsymbol{L}\ (\boldsymbol{X}, \psi, \theta) =\ -\lambda_1 \boldsymbol{E}_{q_{\psi}(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x})} \log p_{\theta}(\boldsymbol{X}|\boldsymbol{Z}) +\ \lambda_2 \boldsymbol{D}_{\boldsymbol{KL}}\big[q_{\psi}(\boldsymbol{Z}|\boldsymbol{X})\ |p_{\theta}(\boldsymbol{Z})|\big] + \lambda_3\ \boldsymbol{\Omega}[\boldsymbol{Z}]$$

The first term of the objective function represents the reconstruction error (RE). The second term is the Kullback-Leibler (KL) divergence between the recognition model distribution $q_{\psi}(\boldsymbol{z}|\boldsymbol{x})$ and the prior distribution over the latent variable $p_{\theta}(\boldsymbol{z})$. $\boldsymbol{\Omega}[\boldsymbol{Z}]$ is SVDD loss computed as follows:

$$\boldsymbol{\Omega}[\boldsymbol{Z}] = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\|\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{c}\|^2 + \frac{\lambda_4}{2}\|\boldsymbol{W}^{svdd}\|_F^2$$

We denote $\boldsymbol{W}^{svdd}$ as the weight of the SVDD layer in the Encoder of the VAE model. The training dataset $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}1, \mathbf{x}2, ...\mathbf{x}N\}$ comprises N normal samples. $\mathbf{Z}$ represents the latent features of $\mathbf{X}$, which are extracted from the latent space of our proposed models; The hyperparamters $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ are used to balance the magnitude of the loss components in the CVAE objective function.

2) General Flow of Our Proposal: Our proposed approach consists of two sequential training phases.

In the initial phase, our VAE-SVDD model is trained jointly, integrating the strengths of both VAE and SVDD. The VAE component learns to encode normal network instances into a compressed latent space, capturing essential patterns and features. Simultaneously, the SVDD component optimizes a hypersphere to tightly encapsulate the latent representations. This joint training ensures that the latent space captures the core structure of normal network behavior and enhances sensitivity to anomalies, resulting in a robust and compact representation.

In the second phase, the features obtained from the first phase are utilized as inputs for training various One-Class Classification (OCC) methods. We employ several widely used OCC techniques, such as One-Class Support Vector Machine (OCSVM), Isolation Forest (IF), Elliptic Envelope (EE), Local Outlier Factor (LOF), Kernel Density Estimation (KDE), Centroid (CEN) and Reconstruction Error (RE). The combination of these classifiers ensures a flexible and robust detection framework capable of effectively identifying a wide range of network anomalies based on the complex representations developed in the initial phase.

V. Experiments

This section describes the datasets used to evaluate our models and provides a comprehensive overview of the experimental setup, including configurations, hyperparameter settings, and the programming environment.

1) Datasets: To evaluate the effectiveness of the proposed models, we carried out extensive experiments using several benchmark datasets: NSL-KDD, UNSW-NB15, and CIC-IDS-2017.

• NSL − KDD: The NSL-KDD dataset is an enhanced version of the KDD99 dataset, addressing its inherent limitations as thoroughly analyzed in [23]. This dataset consists of normal traffic and 22 different attack patterns, categorized into four sub-classes: Probe, Denial of Service (DoS), Remote to Local (R2L), and User to Root (U2R). Each data record comprises 41 features. Categorical features, such as protocol type, service, and flag, are preprocessed using one-hot encoding before training the deep learning model.

• UNSW − NB15: The UNSW-NB15 dataset was released by the Cyber Range Lab in New South Wales in 2015 [24]. It comprises normal network instances and simulated cyber-attack behaviors created using the IXIA PerfectStorm system. The dataset includes normal network data and nine different attack patterns, each containing 49 features.

• CIC − IDS − 2017: The CIC-IDS-2017 dataset was released by the Canadian Institute of Cybersecurity (CIC) in 2017 [25]. This dataset contains benign network observations and

numerous recently updated attack samples that mimic real network environments. The various attack types include DoS, DDoS, Brute Force, XSS, SQL Injection, Infiltration, Port Scan, and Botnets. The dataset includes eight different scenarios, with each network data point characterized by 78 features.

To summarize, we evaluated the effectiveness of the proposed models using several datasets:

• NSL-KDD, UNSW-NB15.

• CIC-IDS-2017 (Six scenarios): Tuesday, Wednesday,

Thursday-Morning, Friday-Morning, FridayAfternoonPortScan, Friday-Afternoon DDoS.

In the experimental phase, the NSL-KDD and UNSW-NB15 datasets were pre-divided into training and testing subsets, using only normal network data for training and both normal and abnormal data for testing. For CIC-IDS-2017, 60% of the normal network data was used for training, while the remaining 40% of normal data and all anomalies were reserved for testing. Detailed information on all datasets used in the experiments is provided in Table I.

2) Experimental Settings: The architecture of VAE-SVDD is constructed with seven hidden layers to ensure sufficient model capacity. The dimensionality of the latent representation space, denoted as d_z , is determined using the empirical formula: $d_z = [1 + \sqrt{D}$] as proposed in [26] and [17], where D represents the number of input features. The Tanh activation function is employed throughout the model. Training is conducted with a batch size of 100 using the Adam optimization algorithm, with a learning rate set to 0.01. The prior distribution of the latent variables, $\mathbf{z}$ is modeled as a centered isotropic Gaussian:

$p_\theta(\boldsymbol{z}) = N\ (\boldsymbol{z}, \boldsymbol{0}, \boldsymbol{I})$; and the true posterior distribution is assumed to approximate a Gaussian distribution with diagonal covariance. The variational approximate posterior is parameterized as a multivariate Gaussian. In the VAE-SVDD model, the SVDD technique is integrated into the encoder's third layer. This layer computes the hypersphere loss, which forces

the learned latent representations to be tightly enclosed within a small region in latent space. This improves the model's effectiveness in anomaly detection tasks. To mitigate overfitting, two techniques were employed: L2 regularization and early stopping, as recommended in [26] and [17]. L2 regularization imposes a penalty on large weight values to reduce model complexity and enhance generalization. The regularization coefficient was set to 0.05 in our experiments. Additionally, early stopping was applied by halting training when the validation loss did not improve by at least 0.001 over five consecutive epochs (patience). These strategies ensured a balanced training process, preventing the model from overfitting to the training data.

Table 1. Benchmark datasets for evaluating the proposed models

No	Datasets	Dimension	Normal Training	Normal Testing	Anomoly Testing
1	NSL-KDD	122	67343	9711	12833
2	UNSW-NB15	196	55999	33999	45332
3	CIC-IDS-2017 Tuesday	78	260830	171244	13835

4	Wednesday	78	264016	176015	252672
5	Thursday	78	100910	67276	2180
6	Friday-BOT	78	113500	75567	1966
7	Friday-PortScan	78	48859	78678	158930
8	Friday-DDoS	78	58630	39088	128027

VI. Results and discussion

Table 2. AUCS OF DAE+OCCS, DCAE+OCCS, PCADCAE+OCCS, SAE+OCCS, DVAE+OCCS, VAE-SVDD+OCCS MODELS ON NSL-KDD, UNSW-NB15 AND SIX SCENARIOS OF CIC-IDS-2017

Latent Representation	One-Class Classifiers	Datasets							
		NSL-KDD	UNSW-NB15	Tuesday	Wednesday	Thurday Morning	Friday BOT	Friday PortScan	Friday DDoS
DAE	RE	0.623	0.622	0.711	0.710	0.534	0.523	0.612	0.637
	OCSVM	0.937	0.823	0.435	0.751	0.465	0.517	0.246	0.610
	IF	0.951	0.834	0.747	0.873	0.588	0.676	0.571	0.793
	EE	0.936	0.789	0.692	0.889	0.797	0.671	0.729	0.815
	LOF	0.513	0.536	0.449	0.469	0.450	0.471	0.458	0.452
	KDE	0.946	0.857	0.740	0.879	0.643	0.632	0.651	0.773
	CEN	0.943	0.794	0.452	0.869	0.621	0.704	0.276	0.598
DCAE	RE	0.647	0.630	0.580	0.694	0.320	0.741	0.670	0.808
	OCSVM	0.967	0.888	0.508	0.897	0.677	0.677	0.761	0.871
	IF	0.966	0.892	0.674	0.905	0.696	0.725	0.755	0.893
	EE	0.957	0.908	0.361	0.890	0.802	0.752	0.824	0.851
	LOF	0.521	0.537	0.468	0.466	0.459	0.476	0.465	0.455
	KDE	0.970	0.893	0.657	0.897	0.708	0.706	0.766	0.884
	CEN	0.967	0.878	0.639	0.877	0.669	0.707	0.755	0.880
PCADCAE	RE	0.756	0.589	0.619	0.579	0.436	0.523	0.401	0.657
	OCSVM	0.965	0.846	0.750	0.904	0.829	0.667	0.650	0.848
	IF	0.963	0.843	0.732	0.904	0.813	0.639	0.657	0.849
	EE	0.962	0.852	0.793	0.807	0.783	0.711	0.728	0.885
	LOF	0.514	0.531	0.493	0.483	0.473	0.497	0.455	0.467
	KDE	0.962	0.845	0.743	0.907	0.819	0.700	0.674	0.860
	CEN	0.964	0.846	0.746	0.905	0.830	0.702	0.655	0.846
SAE	RE	0.650	0.584	0.459	0.619	0.583	0.558	0.600	0.552
	OCSVM	0.942	0.833	0.652	0.745	0.631	0.605	0.793	0.598
	IF	0.935	0.830	0.711	0.881	0.671	0.559	0.812	0.619
	EE	0.941	0.829	0.705	0.720	0.675	0.653	0.804	0.752
	LOF	0.519	0.540	0.451	0.470	0.451	0.482	0.449	0.458
	KDE	0.943	0.827	0.715	0.886	0.700	0.654	0.803	0.613
	CEN	0.942	0.832	0.744	0.715	0.621	0.654	0.769	0.582
DVAE	RE	0.396	0.456	0.616	0.621	0.578	0.572	0.265	0.280
	OCSVM	0.812	0.655	0.560	0.789	0.726	0.739	0.740	0.588
	IF	0.817	0.672	0.493	0.803	0.483	0.473	0.457	0.531
	EE	0.816	0.736	0.494	0.544	0.459	0.453	0.448	0.737
	LOF	0.530	0.541	0.453	0.464	0.448	0.476	0.455	0.448
	KDE	0.954	0.881	0.701	0.912	0.681	0.698	0.757	0.843
	CEN	0.955	0.743	0.602	0.893	0.650	0.545	0.497	0.632
VAE-SVDD	RE	**0.773**	**0.750**	0.700	0.636	**0.783**	0.685	**0.683**	0.749
	OCSVM	**0.967**	**0.891**	**0.752**	**0.910**	0.746	**0.740**	**0.796**	**0.883**
	IF	**0.967**	**0.892**	**0.750**	**0.906**	0.807	**0.727**	**0.815**	**0.893**
	EE	**0.963**	**0.910**	**0.795**	**0.893**	**0.805**	**0.752**	**0.827**	**0.889**
	LOF	0.528	0.540	0.450	0.475	**0.459**	0.459	**0.480**	0.460
	KDE	0.969	0.887	**0.744**	**0.911**	0.800	**0.706**	**0.805**	**0.889**
	CEN	**0.968**	0.877	**0.770**	**0.909**	**0.830**	**0.709**	0.768	**0.885**

In this section, we will analyze the experimental results to clarify the superior performance of the proposed model compared to previous models.

Experimental evaluation using the NSL-KDD dataset demonstrates that the proposed model effectively supports the majority of anomaly detection frameworks, leading to enhanced performance compared to earlier models. Notably, five out of seven single-class anomaly detection methods—RE, OCSVM, IF, EE, and CEN—exhibited superior accuracy.

Similarly, experimental results on the UNSW-NB15 dataset indicate that VAE-SVDD outperforms baseline models and SAE and DVAE models in generating superior latent features.

Specifically, combining features from the proposed model with RE, OCSVM, IF, and EE yields results of 0.750, 0.891, 0.892, and 0.910, respectively. Notably, the combination of VAESVDD with EE achieves the highest performance among all tested combinations, with a score of 0.910, representing the global maximum.

In the Friday PortScan scenario of the CIC-IDS-2017 dataset, the proposed model outperformed existing models when combined with six out of seven anomaly detectors. Specifically, the latent features generated by VAE-SVDD achieved accuracy scores of 0.683, 0.796, 0.815, 0.827, 0.480, and 0.805 when paired with RE, OCSVM, IF, EE, LOF, and KDE, respectively. The results obtained for the other scenarios in the CIC-IDS-2017 dataset are completely similar.

VII. Conclusion and future work

In this paper, we propose a novel deep learning-based model, VAE-SVDD, designed to address significant challenges in anomaly detection for network security. As digital transformation accelerates, the increasing complexity of cyber threats has created new demands for robust cybersecurity systems. Traditional intrusion detection systems (IDS), including signature-based and anomaly-based methods, face critical limitations in detecting novel attack patterns and managing high false positive rates. Specifically, they struggle with effectively reducing the hypervolume of normal data in the latent space and fail to adequately model the complex, nonlinear probability distributions of normal network traffic. These shortcomings hinder the ability of current methods to reliably differentiate between normal and abnormal data in dynamic network environments.

The VAE-SVDD model addresses these challenges by combining the strengths of Variational Auto-Encoder (VAE) and Support Vector Data Description (SVDD). By optimizing the latent space, the VAE-SVDD model reduces the hypervolume of the normal data region, leading to clearer boundaries between normal and abnormal data. Additionally, incorporating a Gaussian prior and integrating SVDD enhances the model's ability to represent normal data distributions more accurately, improving its capacity to generalize to unseen anomalies. This results in a more precise and effective anomaly detection system.

Experimental evaluations conducted on several benchmark datasets, including NSL-KDD, UNSW-NB15, and CIC-IDS-

2017, demonstrate that the proposed model outperforms existing state-of-the-art methods in terms of detection accuracy and scalability. The ability of the VAE-SVDD model to learn significant, high-level latent features and handle complex, nonlinear data patterns further strengthens its anomaly detection capabilities, making it a promising solution for addressing the evolving cybersecurity challenges faced by modern networks. Overall, the VAE-SVDD model provides a robust, scalable, and precise approach to anomaly detection in network security. It offers improved accuracy, reduced false positives, and better generalization to unseen attack patterns. The proposed approach addresses the critical limitations of existing IDS, presenting a new direction for the development of more effective cybersecurity solutions in an increasingly interconnected world.

Future research will focus on integrating techniques to prevent overfitting and reduce computational complexity, particularly to accelerate inference times. Additionally, new models

will be proposed and experimentally evaluated on the latest benchmark datasets to further improve detection performance and scalability.

References

[1] Xiaoteng Zhu, Shilun Ge, and Nianxin Wang. Digital transformation: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering, 162:107774, 2021.

[2] M Rithani, R Prasanna Kumar, and Srinath Doss. A review on big data based on deep neural network approaches. Artificial Intelligence Review, 56(12):14765–14801, 2023.

[3] Wasyihun Sema Admass, Yirga Yayeh Munaye, and Abebe Abeshu Diro. Cyber security: State of the art, challenges and future directions. Cyber Security and Applications, 2:100031, 2024.

[4] Ahmed Barnawi, Shivani Gaba, Anna Alphy, Abdoh Jabbari, Ishan Budhiraja, Vimal Kumar, and Neeraj Kumar. A systematic analysis of deep learning methods and potential attacks in internet-of-things surfaces. Neural Computing and Applications, 35(25):18293–18308, 2023.

[5] Victor Chang, Lewis Golightly, Paolo Modesti, Qianwen Ariel Xu, Le Minh Thao Doan, Karl Hall, Sreeja Boddu, and Anna Kobusinska. A survey on intrusion detection systems for fog and cloud computing. Future Internet, 14(3):89, 2022.

[6] Yuchong Li and Qinghui Liu. A comprehensive review study of cyberattacks and cyber security; emerging trends and recent developments. Energy Reports, 7:8176–8186, 2021.

[7] Kyungroul Lee, Jaehyuk Lee, and Kangbin Yim. Classification and analysis of malicious code detection techniques based on the apt attack. Applied Sciences, 13(5):2894, 2023.

[8] Rasheed Ahmad, Izzat Alsmadi, Wasim Alhamdani, and Lo'ai Tawalbeh. Zero-day attack detection: a systematic literature review. Artificial Intelligence Review, 56(10):10733–10811, 2023.

[9] Oluwadamilare Harazeem Abdulganiyu, Taha Ait Tchakoucht, and Yakub Kayode Saheed. A systematic literature review for network intrusion detection system (ids). International journal of information security, 22(5):1125–1162, 2023.

[10] T Sowmya and EA Mary Anita. A comprehensive review of ai based intrusion detection system. Measurement: Sensors, 28:100827, 2023.

[11] Jesus D ´ ´ıaz-Verdejo, Javier Munoz-Calle, Antonio Estepa Alonso, Rafael ˜ Estepa Alonso, and German Madinabeitia. On the detection capabilities of signature-based intrusion detection systems in the context of web attacks. Applied Sciences, 12(2):852, 2022.

[12] Nektaria Kaloudi and Jingyue Li. The ai-based cyber threat landscape: A survey. ACM Computing Surveys (CSUR), 53(1):1–34, 2020.

[13] Sunanda Gamage and Jagath Samarabandu. Deep learning methods in network intrusion detection: A survey and an objective comparison. Journal of Network and Computer Applications, 169:102767, 2020.

[14] Arwa Aldweesh, Abdelouahid Derhab, and Ahmed Z Emam. Deep learning approaches for anomaly-based intrusion detection systems: A survey, taxonomy, and open issues. Knowledge-Based Systems, 189:105124, 2020.

[15] Yu Xie, Bin Yu, Shengze Lv, Chen Zhang, Guodong Wang, and Maoguo Gong. A survey on heterogeneous network representation learning. Pattern recognition, 116:107936, 2021.

[16] Nathan Shone, Tran Nguyen Ngoc, Vu Dinh Phai, and Qi Shi. A deep learning approach to network intrusion detection. IEEE transactions on emerging topics in computational intelligence, 2(1):41–50, 2018.

[17] Miguel Nicolau, James McDermott, et al. Learning neural representations for network anomaly detection. IEEE transactions on cybernetics, 49(8):3074–3087, 2018.

[18] Ly Vu, Quang Uy Nguyen, Diep N Nguyen, Dinh Thai Hoang, and Eryk Dutkiewicz. Deep generative learning models for cloud intrusion detection systems. IEEE Transactions on Cybernetics, 53(1):565–577, 2022.

[19] Xiaolu Han, Yun Liu, Zhenjiang Zhang, Xin Lu, and Yang Li. Sparse ¨ auto-encoder combined with kernel for network attack detection. Computer Communications, 173:14–20, 2021.

[20] Yanqing Yang, Kangfeng Zheng, Bin Wu, Yixian Yang, and Xiujuan Wang. Network intrusion detection based on supervised adversarial variational auto-encoder with regularization. IEEE access, 8:42169–42184, 2020.

[21] Diederik P Kingma and Max Welling. Auto-encoding variational bayes. arXiv preprint arXiv:1312.6114, 2013.

[22] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville. Deep learning. MIT press, 2016.

[23] Mahbod Tavallaee, Ebrahim Bagheri, Wei Lu, and Ali A Ghorbani. A detailed analysis of the kdd cup 99 data set. In 2009 IEEE symposium on computational intelligence for security and defense applications, pages 1–6. Ieee, 2009.

[24] Nour Moustafa and Jill Slay. Unsw-nb15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (unsw-nb15 network data set). In 2015 military communications and information systems conference (MilCIS), pages 1–6. IEEE, 2015.

[25] Iman Sharafaldin, Arash Habibi Lashkari, and Ali A Ghorbani. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization. ICISSp, 1:108–116, 2018.

[26] Van Quan Nguyen, Viet Hung Nguyen, Nhien-An Le-Khac, and Van Loi Cao. Clustering-based deep autoencoders for network anomaly detection. In Future Data and Security Engineering: 7th International Conference, FDSE 2020, Quy Nhon, Vietnam, November 25–27, 2020, Proceedings 7, pages 290–303. Springer, 2020.

Một mô hình học sâu lai ghép mới phát hiện tấn công mạng

Tóm tắt: *Sự phát triển nhanh chóng của quá trình chuyển đổi số, với động lực là công nghệ AI và dữ liệu lớn, đã tăng cường kết nối toàn cầu nhưng cũng đặt ra thách thức mới trong lĩnh vực an ninh mạng. Các hệ thống phát hiện xâm nhập (IDS) truyền thống gặp khó khăn trong việc phát hiện các kiểu tấn công mới và thường có tỷ lệ cảnh báo sai cao. Hai hạn chế chính của các phương pháp hiện có là: (i) không có khả năng tối thiểu hóa vùng không gian dữ liệu bình thường trong không gian tiềm ẩn, gây khó khăn trong việc phân biệt giữa dữ liệu bình thường và bất thường, và (ii) không học được các phân bố phức tạp của dữ liệu mạng bình thường.*

Bài báo này đề xuất mô hình học sâu VAE-SVDD, kết hợp mô hình sinh VAE với kỹ thuật SVDD nhằm tối ưu hóa không gian tiềm ẩn và cải thiện độ chính xác phát hiện bất thường. Bằng cách tối thiểu hóa vùng không gian dữ liệu bình thường, mô hình giúp phân biệt rõ ràng hơn giữa dữ liệu bình thường và bất thường. Việc tích hợp phân bố Gaussian và SVDD giúp cải thiện biểu diễn dữ liệu, tăng khả năng tổng quát hóa với các bất thường chưa từng thấy.

Thử nghiệm trên các bộ dữ liệu chuẩn (NSL-KDD, UNSW-NB15, CIC-IDS-2017) cho thấy mô hình vượt trội hơn các phương pháp hiện có, cung cấp giải pháp mạnh mẽ, linh hoạt và chính xác cho phát hiện bất thường trong an ninh mạng.

Từ khoá: Học sâu, Học biểu diễn dữ liệu, Mô hình tạo sinh, Phát hiện tấn công mạng.

Enhancing Video Anomaly Detection: Object-based Pseudo Anomalies and Memory Augmented Autoencoder

Van Thieu Doan[1*], Hong Quan Nguyen[1], Thi Huong Chu[1], Anh Le[1], Quang Uy Nguyen[1], Bao Ngoc Vi[1], Hai Hong Phan[1]

[1] *Institute of Information and Communication Technology, Le Quy Don Technical University*

Email: thieumtagt95@gmail.com; Tel: 0982983412

Abstract

In this paper, we propose a novel supervised training method for memory augmented autoencoders by generating synthetic abnormal videos based on object acceleration techniques. Most video anomaly de- tection methods use machine learning models to learn patterns of nor- mal videos. Any video with patterns that deviate significantly from the learned patterns is considered abnormal. However, developing an effective machine learning model for video anomaly detection is challenging due to the scarcity of abnormal samples. Specifically, abnormal samples are often rarer and more difficult to collect compared to normal ones. To address this issue, we propose a new approach that applies object velocity modification techniques to original videos. These synthetic anomalies are grouped with normal data to form an augmented dataset. The memory augmented autoencoder is then trained on these augmented datasets. The experimental results show that the proposed solution improves the performance of the original model.

Keywords: *Video anomaly detection, autoencoder, pseudo anomaly generator, skip object.*

1. Introduction

In daily activities, abnormal behaviors such as fights, accidents, or legal violations can occur at anytime and anywhere. However, monitoring these events manually is highly challenging. Therefore, abnormal detection systems need to be developed to assist authorities in identifying such events. Video anomaly detection is one of the challenging tasks due to the scarcity of data and the ambiguity of abnormal data, making it often classified as a one class classification problem. To address this issue, two main approaches commonly applied with deep learning based autoencoder networks are frame reconstruction and next frame prediction. These methods rely solely on normal frames for training. The general assumption is that during testing, when the network processes frames containing unknown objects or abnormal behaviors, it will produce significant reconstruction or prediction errors since these frames are not part of the trained dataset. However, this approach is not entirely reliable, as in some cases, the network can still accurately reconstruct or predict abnormal frames by leveraging normal features it learned previously. To overcome this limitation, some studies have proposed using autoencoder networks combined with memory modules [1–3] or generating synthetic abnormal frames [4–6] to weaken the network's ability to accurately reconstruct or predict frames with abnormal events. Leveraging the strengths of both approaches, we propose a method to train a memory-augmented autoencoder network that uses both normal data and synthetic abnormal data. Experiments on two datasets Ped2 [7] and Avenue [8] demonstrate that combining memory modules and synthetic abnormal data significantly enhances the capability of deep learning based autoencoder networks in detecting abnormal events.

2. Related Works

2.1. Memory-based autoencoder models

Due to the challenges in collecting anomalous samples, video anomaly detection models are often trained unsupervised. This means that the models are trained solely on available normal samples. In this approach, autoencoders are among the most commonly used models to detect abnormal events in video. [2,9–13]. When abnormal frames are processed by such

autoencoder models, they generally result in higher reconstruction errors compared to normal frames. However, in certain cases, the generalization strength of deep learning models inadvertently allows abnormal frames to be reconstructed as well as normal frames. This leads to low reconstruction errors, which causes the anomalous events to be overlooked.

To address this limitation, some autoencoder models that incorporate memory modules have been proposed [1, 3, 14–17]. The memory modules are added between the encoder and decoder, serving as a set of memory items that store normal features during the training phase. The memory is then utilized to effectively reconstruct normal frames while poorly reconstructing abnormal frames in the testing phase.

For example, MemAE [1] and MNAD [3] utilize memory items to encode prototypical normal patterns, which are updated during training. The encoder extracts frame representations that query the most relevant memory items, which serve as input to the decoder in the reconstruction task. Due to the application of memory modules, the reconstruction error for anomalous inputs is significantly greater than that for normal samples. As a result, anomalous events are more easily detected. In addition, several enhanced models with multiple memory units [16, 18] or hierarchical memory [2] have been proposed to improve anomaly detection capabilities.

MemAE [1] enhances video anomaly detection by using a memory module to store normal patterns, which increases reconstruction errors for anomalies, thereby improving detection. However, its large memory size and fixed content limit realtime adaptability and efficiency. MNAD [3] refines this approach by utilizing fewer memory items than MemAE, along with feature compact ness and separateness losses to maintain diversity and discrimination in stored patterns. Furthermore, MNAD introduces a real time memory update mechanism, enabling dynamic adaptation during inference, which boosts both performance and efficiency in practical applications. Together, [1] and [3] laid the foundation for video anomaly detection through memory based storage of normal patterns. Building on this, MPN [15] advances normal pattern encoding with meta learning in real time. MAAM-Net [19] improves this concept by employing a unified memory module to connect normal and abnormal events, optimizing memory selection and detection using margin based latent loss and patch based algorithms. Dual memory frameworks outperform single memory approaches by separating normal and anomalous patterns, reducing overlap, and improving detection clarity. This separation enhances robustness and adaptability in complex video scenarios. Wang et al. [16] proposed the Dual Branch Network, which uses a prototype memory module to reduce reconstruction errors and increase anomaly sensitivity by combining reconstruction with future frame prediction. Lzhang et al. [18] introduced a dual memory design that distinguishes normal and anomalous patterns, utilizing pseudo-anomaly generation and enhanced loss functions to improve detection accuracy and sensitivity.

Memory modules enhance video anomaly detection by effectively distinguishing normal from anomalous patterns, improving sensitivity, and reducing recon- struction errors for more accurate detection.

2.2. Pseudo-anomaly generators

Autoencoders (AEs) are widely recognized for their capability to learn meaningful data representations and are frequently employed in the development of Video Anomaly Detectors (VADs). Typically, AEs are trained exclusively on normal data, relying on their inability to effectively reconstruct anomalous inputs during testing, which results in high anomaly scores.

Recent studies have increasingly explored the idea of pseudo-anomaly generators methods designed to synthesize artificial anomalies that can be incorporated into training alongside normal data to enhance anomaly detection performance.

One of the most extensively studied approaches involves manually defining anomalous behaviors. Astrid et al. [4, 20, 21] introduced methods that generate synthetic anomalies by either skipping or repeating frames within normal video sequences, thereby simulating unusually fast or slow object movements. Another technique involves reversing the temporal order of frames in a normal sequence to create pseudo-anomalies [20].

In the context of anomalous object generation, patching techniques have been explored in [21, 22], where patches from external datasets are inserted into video frames to introduce foreign objects. Additionally, Astrid et al. [21] proposed other pseudo-anomaly generation methods, such as fusion and noise injection. The fusion technique creates pseudo-anomalies by blending two randomly selected normal sequences, while the noise based approach simply introduces noise into normal samples to simulate anomalies.

Recent studies [23,24] have explored noise based pseudo-anomaly generation. [23] introduces noise into specific regions of an image, while [24] uses masks to create anomalous effects in video data.

Beyond these techniques, other methods have also been investigated. Zaheer et al. [6] proposed leveraging past model states to generate degraded reconstructions as pseudo-anomalies. Liu et al. [25] introduced perturbations within the latent space, utilizing a divergence based mapping to transform normal features into a range of anomalous representations guided by an anomaly prompt. Park [5] proposed a transformation-based method where a randomly selected cuboid region in a video sequence is either rotated in an arbitrary direction or temporally shuffled to generate irregular patterns.

Collectively, these studies demonstrate that integrating pseudo-anomaly generators into training pipelines significantly enhances the effectiveness of VAD models when applied to real world datasets.

3. Proposed method

In this work, we propose a new technique for generating abnormal object in video, then uses to create pseudo-anomaly samples and proposes a new network architecture for video anomaly detection.

3.1. Abnormal object generation technique

In this section, we introduce a method for synthesizing an anomalous object with a specified velocity by utilizing the trajectory and speed variations of a tracked object in a video. This method is termed the Abnormal Object Generation Tech nique (AOG).

Assume the tracked object moves at a velocity v1 and takes a duration t1 to travel from point A to point B. As shown in Figure 1, this movement is recorded in n1 frames of the original video, allowing the distance SAB between A and B to be expressed as:

$$s_{AB} = v_1 \cdot t_1 \quad (1)$$

The time corresponding to a given number of frames in the video can be computed using:

$$t = \frac{r}{fr} \quad (2)$$

where r represents the number of frames and fr is the frame rate. Substituting Equation 2 into Equation 1 yields:

$$s_{AB} = v_1 \cdot \frac{n_1}{fr} \quad (3)$$

AOG then generates a new object from the tracked object by selectively skipping or repeating frames, so that the new object moves with a target velocity

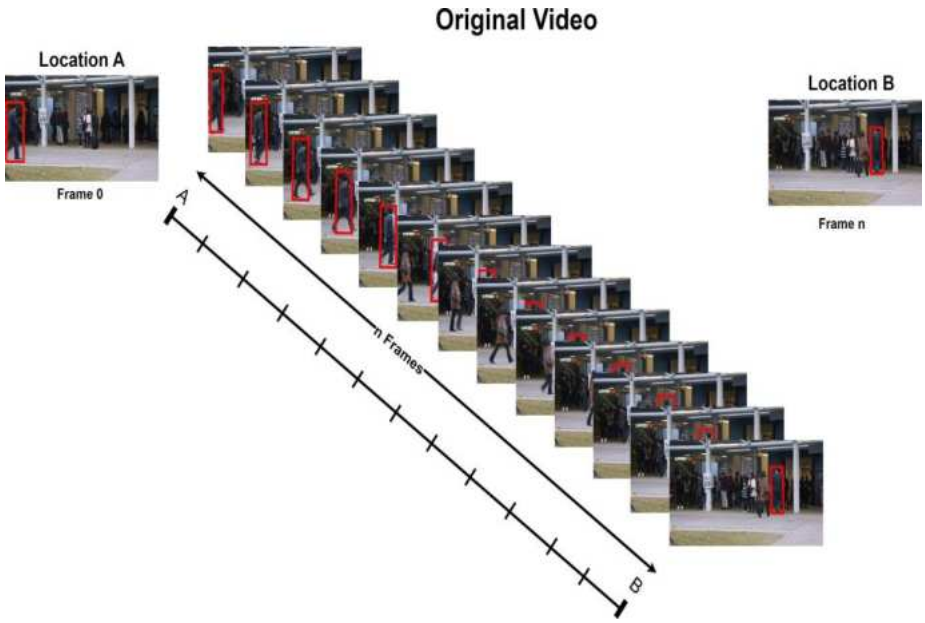


Fig. 1. Abnormal Object Generation Technique

v_2 Similar to the original object, the new object covers the same distance s_{AB} from A to B but in n_2 frames, as given by:

$$s_{AB} = v_2 \cdot \frac{n_2}{fr} \quad (4)$$

By equating Equations 3 and 4, we derive:

$$v_2 \cdot \frac{n_2}{fr} = v_1 \cdot \frac{n_1}{fr} \quad (5)$$

Which simplifies to:

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{v_1}{v_2} \quad (6)$$

Using Equation 6, AOG determines the frame index n_2 corresponding to the tracked object, which is then used to replace the frame at n1 in the original video, ultimately generating a new video that features the anomalous object. For instance, if a person is walking at an average speed of v_1 = 1.34 m/s, and we wish to generate an object running at an average speed of v_2 = 2.69 m/s, then approximately $n_2 \approx 2 \times n_1$. Figure 1 demonstrates this example of the AOG

3.2. Anomaly Object Generator

For applying AOG, we utilize it to generate pseudo-anomaly samples for video anomaly detection, referred to as the Anomaly Object Generator (AOG). These samples are subsequently integrated into the training process of the MNAD model [3] with a probability p. Further details of this architecture are provided in subsection 3.3.

Three variants of AOG are introduced. The first variant, called the One Anomaly Object Generator (OAG), selects a random object from the original video and then applies AOG to produce a new object. The velocity of the new object is governe by a fixed ratio, $r = \frac{v_1}{v_2}$ where v_1 is the speed of the tracked object and v_2 is the desired speed for the generated object. Algorithm 1 outlines the OAG procedure. In this algorithm, the function Round ($r \times n_1$) rounds theproduct $r \times n_1$, and the function CopyReplace (F_{tr}, n_1, n_2) duplicates the trackedobject from frame n_2 in F_{tr} and replaces it in frame n_1, returning the updated frame.

Algorithm 1: One Anomaly Object Generator (OAG)

Input: All frames in the original video: V, the velocity ratio: $r = \frac{v_1}{v_2}$

Output: All frames in the abnormal video.

$F_{tr} \leftarrow$ all frames contain a random tracked object in video V;
$F_{new} \leftarrow \{$ the first frame in $F_{tr}\}$;
$n_1 \leftarrow 0$;
repeat
  $n_1 \leftarrow n_1 + 1$;
  $n_2 \leftarrow Round(r \times n_1)$;
  $f \leftarrow CopyReplace(F_{tr}, n_1, n_2)$;
  $Fnew \leftarrow Fnew \cup f$;
until $n_1 \geq len(F_{tr})$ *or* $n_2 \geq len(F_{tr})$;
return F_{new};

The third variant, termed the Accelerated Anomaly Object Generator (AAG), produces varied motion patterns by integrating a target speed with an associated acceleration, both randomly chosen from several velocity acceleration pairs. The generated object initially accelerates from its starting speed until it reaches the predetermined target speed. It then maintains this speed for a randomly determined interval before decelerating back to its original speed using the same magnitude of acceleration in reverse. This random selection of parameters and the varying duration of the constant speed phase result in a natural motion profile that more accurately mimics real world object dynamics.

Algorithm 2: Accelerated Anomaly Object Generator (AAG)

Input: All frames in the original video: V ; The average velocity of objects in the original video: v_1; The initial speed for the new object: v_{20}; List of velocity and acceleration pairs : $\{(v_{21}, a_1), (v_{22}, a_2), \ldots, (v_{2m}, a_m)\}$; Duration to maintain an uniform motion: u

Output: All frames in the abnormal video.

$(v_{2max}, a) \leftarrow$ randomly select a pair from the list $\{(v_{21}, a_1), (v_{22}, a_2), \ldots, (v_{2m}, a_m)\}$;
$F_{tr} \leftarrow$ all frames contain a random tracked object in video V ;

$F_{new} \leftarrow \{$ the first frame in $F_{tr}\}$;
$n_1 \leftarrow 0$;
$v_c \leftarrow v_{20}$;
$n_u \leftarrow 0$;
repeat
  $n_1 \leftarrow n_1 + 1$;
  $v_c \leftarrow v_c + a$;
  if $v_c > v_{2max}$ then
    $v_C \leftarrow v_{2max}$;
    $n_u \leftarrow n_u + 1$;
  if $v_c < 0$ then
    $v_c \leftarrow 0$;
    break ;
  if $n_u \geq u$ then
    $a \leftarrow a$;
  $n_2 \leftarrow Round\ (v_1/v_2 \times n_1)$;
  $f \leftarrow CopyReplace(F_{tr}, n_1, n_2)$;
  $Fnew \leftarrow Fnew \cup f$;
until $n_1 \geq len(F_{tr})$ *or* $n_2 \geq len(F_{tr})$;
return F_{new};

3.3. Memory-augmented autoencoder with Anomaly Object Generator

An Anomaly Object Generator (AOG) is first employed to synthesize pseudo- anomaly samples. These samples are then incorporated into the MNAD training process [3] with a probability p, forming a novel video anomaly detection framework. This framework, termed the Anomaly Object Generator for Memory Augmented Autoencoder (AOG-MAE), is depicted in Figure 2. While its over- all structure mirrors that of PA-MAE [26] comprising both a Data Generator (DG) and a Memory-Augmented Autoencoder (MAE) the primary distinction lies in the DG. Instead of using a frame-skipping strategy as in PA-MAE, the DG in AOG-MAE utilizes an abnormal object generation technique to produce the pseudo-anomaly samples.

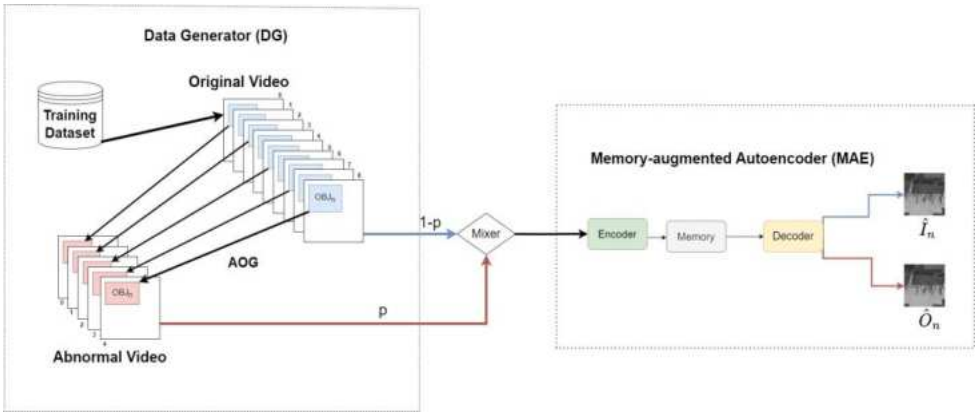


Fig. 2. Anomaly Object Generator for Memory-Augmented Autoencoder (AOG-MAE)

The DG component produces training data comprising both normal and pseudo-anomalous samples. The normal data are directly derived from consecutive segments of the original videos, each containing n frames ($I_1, I_2, \ldots, I_{n-1}, I_n$). Here, the first $n-1$ frames ($I_1, \ldots, I_{n-1}$) serve as inputs to the MAE, while the remaining frame I_n acts as the label (i.e., the target). The pseudo-anomalous samples are constructed by applying one of three versions of AOG, and are denoted as OAG-MAE, MAG-MAE and AAG-MAE respectively.

4. Results and discussion

The experimental results of the proposed model will be presented and analyzed in this section. The performance of AOG, using three different pseudo anomaly generation techniques (OAG-MAE, MAG-MAE, AAG-MAE), is compared with the other models through various experiments.

4.1. Experiment settings

Datasets: The two benchmark datasets, namely Ped2 [7], Avenue [8] have been selected to evaluate our proposed model, and its performance is subsequently compared with other state-of-the art models.

A notable characteristic of the selected datasets is that both Ped2 and Avenue consist of videos captured from a single location. Furthermore, normal videos contain only footage of pedestrians, while abnormal videos exhibit a variety of anomalies. For example, abnormal events may arise from the presence of unusual objects such as bicycles, carts, and skateboards, or from abnormal actions such as running, chasing, fighting, and throwing objects.

The complexity and diversity of abnormal events increase from Ped2 to Avenue. Specifically, Ped2 has the lowest resolution and the fewest abnormal events, while Avenue features a higher resolution and a greater number of abnormal events, totaling up to 47, along with challenges arising from camera shake and object occlusion.

Parameter settings: The proposed model, AOG, is implemented using the PyTorch library and subsequently trained and tested on an Nvidia RTX 4070 Ti 16GB graphics card. Most parameters of the AOG model are set similarly to those in the MNAD [3] model, with the exception of the abnormality probability parameter p, is utilized for training the network.

Performance metrics: Similar to most frame-level anomaly detection methods, we selected the ROC curve (AUC) metric as the criterion to evaluate our model on the datasets. A higher AUC value indicates the superiority of the method.

4.2. Comparing with baseline

We compare three proposed techniques (OAG-MAE, MAG-MAE, and AAG- MAE) with a memory-augmented Autoencoder, where the MNAD [3] network serves as the base model for these approaches, using the AUC metric. Experimental results on the Ped2 and Avenue datasets demonstrate that the methods incorporating pseudo-anomaly generation achieve significantly higher AUC scores than both the original MNAD [3] and MemAE [1] models.

Specifically, on the Ped2 dataset, the AUC scores for the pseudo-anomaly generation methods are 98.23 for OAG-MAE, 98.60 for MAG-MAE, and 97.48 for AAG-MAE, whereas on the Avenue dataset, the corresponding AUC values are 88.18, 87.54, and 86.59, respectively. In contrast, the base MNAD model obtains AUC scores of 96.97 on Ped2 and 86.98 on Avenue, while MemAE [1] achieves 91.70 on Ped2 and 81.00 on Avenue. These results clearly indicate that the integration of pseudo-anomaly generation techniques not only yields higher AUC values than the original MNAD [3] network but also significantly outperforms MemAE [1], confirming the superior effectiveness of these methods in enhancing video anomaly detection performance.

Table 1 summarizes our experimental comparison between the memory module in OAG, which integrates three pseudo-anomaly generation techniques, and the baseline memory-based model MNAD [3]. These experiments were carried out on two datasets, and the corresponding AUC scores are reported in the table. To ensure a fair evaluation, we re-ran the MNAD [3] model five times using the same parameter settings as detailed in the original study and selected the highest AUC value obtained. Notably, none of these runs achieved the performance levels claimed in the original paper, underscoring the effectiveness of our proposed approach.

Table 1. AUC scores of AOG-MAE, MAG-MAE, AAG-MAE and two memory augmented networks

Methods	**Ped2**	**Avenue**
MemAE [1]	91.70	81.00
MNAD[3] (retrained)	96.97	86.98
OAG-MAE	98.23	**88.18**
MAE-MAE	**98.60**	87.54
AGG-MAE	97.48	86.59

4.3. Qualitative results

This section examines the behavior of the AOG model by visualizing its mean square error (MSE) maps and detection scores during the prediction of a sequence of frames. The MSE map is computed as the MSE between the input frame and its corresponding predicted frame.

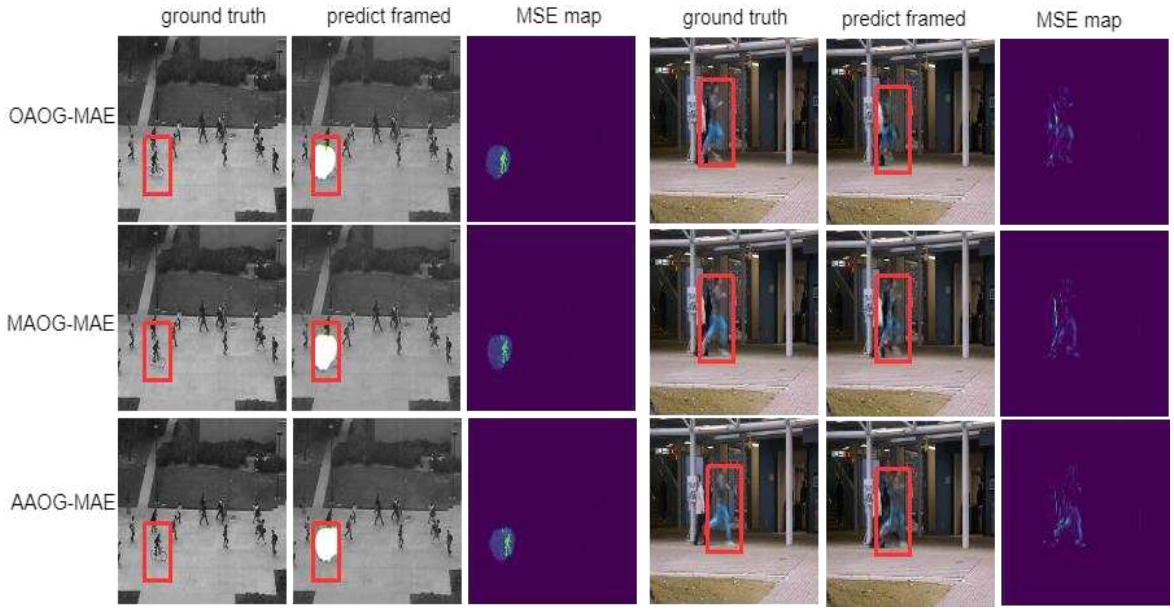


Fig. 3. The figure presents the MSE maps produced by the AOG method using three distinct pseudo anomaly generation strategies. Each row corresponds to a video sample from the Ped2 and Avenue datasets, respectively, while the columns (from left to right) show the ground truth, the model's predicted frame, and the resulting Mean Squared Error (MSE) map for each technique.

Figure 4 illustrates examples of MSE maps from three datasets. In this figure, the ground truth frames are displayed on the left, the predicted frames in the center, and the MSE maps on the right. The figure reveals that when an abnormal object appears in a frame, its prediction error is significantly higher compared to the background. This indicates that AOG effectively identifies abnormal objects within the frames.

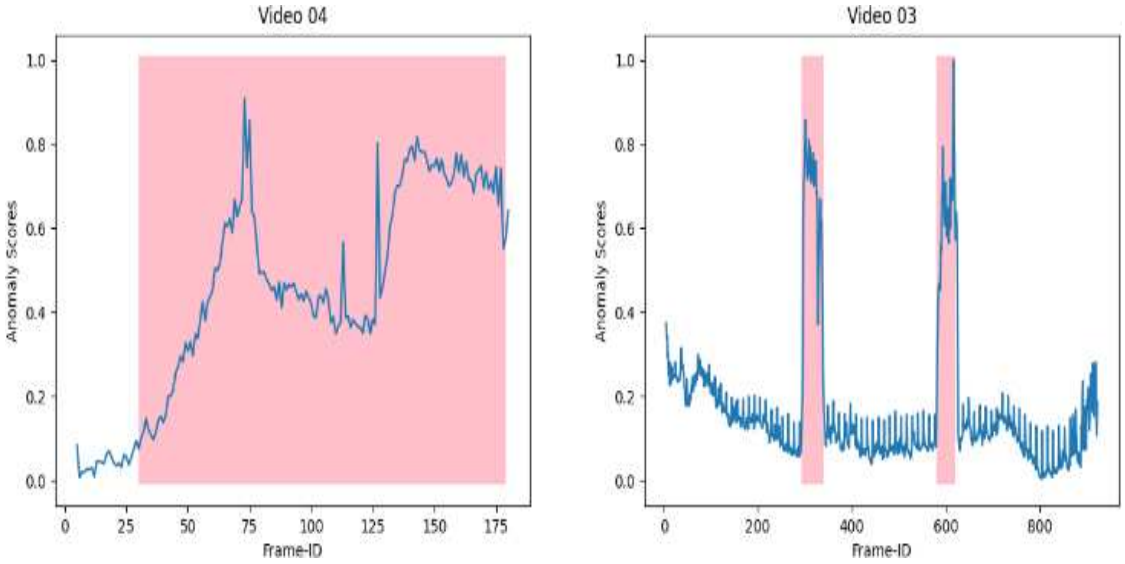


Fig. 4. The anomaly score of video 04 in the Ped2 and Avenue dataset

5. Results and discussion

In this work, we introduced AOGT, a novel approach that generates moving objects with predetermined velocities extracted from tracked objects in a video. This process creates new video content containing pseudo anomalies. Specifically, AOGT utilizes three distinct techniques OAG, MAG, and AAG to produce these anomalies. The OAG method focuses on generating a single abnormal object with a specified velocity, whereas MAG is designed to insert multiple abnormal objects into the original video. In contrast, AAG simulates a natural motion pattern by having the object accelerate uniformly, move at a constant speed, and then decelerate uniformly. These anomaly generators are then integrated with the MNAD model [3], resulting in three enhanced versions: OAG-MAE, MAG- MAE, and AAG-MAE, which are employed for video anomaly detection.

Our experimental evaluation on two benchmark datasets confirms that the AOGT framework significantly outperforms the base MNAD model and other recent approaches that utilize anomaly generation techniques. These results underscore the pivotal role of effective pseudo-anomaly generation in improving the performance of video anomaly detection systems.

For future work, we envision several promising research directions. First, transitioning from a frame level to an object-level approach may help mitigate the challenges posed by background compensation, potentially leading to even higher detection accuracies methods such as skeleton based analysis could be explored in this context. Second, further investigation into combining our pseudo-anomaly generation techniques with a broader array of detection models is warranted, as this could provide deeper insights into their respective strengths and limitations. Lastly, we plan to extend our framework's application to a wider range of datasets, including those derived from real world scenarios, to fully assess its robustness and generalizability.

References

[1] D. Gong, L. Liu, V. Le, B. Saha, M. R. Mansour, S. Venkatesh, and A. v. d. Hengel, "Memorizing normality to detect anomaly: Memory-augmented deep autoencoder for unsupervised anomaly detection," in Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, 2019, pp. 1705–1714.

[2] Z. Liu, Y. Nie, C. Long, Q. Zhang, and G. Li, "A hybrid video anomaly detection framework via memory-augmented flow reconstruction and flow-guided frame pre- diction," in Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, 2021, pp. 13 588–13 597.

[3] H. Park, J. Noh, and B. Ham, "Learning memory-guided normality for anomaly detection," in Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2020, pp. 14 372–14 381.

[4] M. Astrid, M. Z. Zaheer, and S.I. Lee, "Synthetic temporal anomaly guided end to end video anomaly detection," in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021, pp. 207–214.

[5] C. Park, M. Cho, M. Lee, and S. Lee, "Fastano: Fast anomaly detection via spatio temporal patch transformation," in Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2022, pp. 2249–2259.

[6] M. Z. Zaheer, J.h. Lee, M. Astrid, and S.-I. Lee, "Old is gold: Redefining the adversarially learned one-class classifier training paradigm," in Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2020, pp. 14 183–14 193.

[7] W. Li, V. Mahadevan, and N. Vasconcelos, "Anomaly detection and localization in crowded scenes," IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 36, no. 1, pp. 18–32, 2013.

[8] C. Lu, J. Shi, and J. Jia, "Abnormal event detection at 150 fps in matlab," in Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2013, pp. 2720–2727.

[9] T.N. Nguyen and J. Meunier, "Anomaly detection in video sequence with appearance-motion correspondence," in Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, 2019, pp. 1273–1283.

[10] Y. Chang, Z. Tu, W. Xie, and J. Yuan, "Clustering driven deep autoencoder for video anomaly detection," in Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Con- ference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part XV 16. Springer, 2020, pp. 329–345.

[11] K. Doshi and Y. Yilmaz, "Online anomaly detection in surveillance videos with asymptotic bound on false alarm rate," Pattern Recognition, vol. 114, p. 107865, 2021.

[12] T. Li, X. Chen, F. Zhu, Z. Zhang, and H. Yan, "Two-stream deep spatial-temporal auto-encoder for surveillance video abnormal event detection," Neurocomputing, vol. 439, pp. 256–270, 2021.

[13] K. Doshi and Y. Yilmaz, "Rethinking video anomaly detection-a continual learning approach," in Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision, 2022, pp. 3961–3970.

[14] C. Hu, F. Wu, W. Wu, W. Qiu, and S. Lai, "Normal learning in videos with attention prototype network," arXiv preprint arXiv:2108.11055, 2021.

[15]H. Lv, C. Chen, Z. Cui, C. Xu, Y. Li, and J. Yang, “Learning normal dynamics in videos with meta prototype network,” in Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2021, pp. 15 425–15 434.

[16]D. Wang, Q. Hu, and K. Wu, “Dual-branch network with memory for video anomaly detection,” Multimedia Systems, vol. 29, no. 1, pp. 247–259, 2023.

[17]Y. Wu, K. Zeng, Z. Li, Z. Peng, X. Chen, and R. Hu, “Learning a multi-cluster memory prototype for unsupervised video anomaly detection,” Information Sci- ences, vol. 686, p. 121385, 2025.

[18]L. Zhang, S. Li, X. Luo, X. Liu, and R. Zhang, “Video anomaly detection with both normal and anomaly memory modules,” The Visual Computer, pp. 1–13, 2024.

[19]L. Wang, J. Tian, S. Zhou, H. Shi, and G. Hua, “Memory-augmented appearance- motion network for video anomaly detection,” Pattern Recognition, vol. 138, p. 109335, 2023.

[20]M. Astrid, M. Z. Zaheer, and S.I. Lee, “Limiting reconstruction capability of au- toencoders using moving backward pseudo anomalies,” in 2022 19th international conference on ubiquitous robots (UR). IEEE, 2022, pp. 248–251.

[21]M. Astrid, M. Z. Zaheer, and S.I. Lee, “Pseudobound: Limiting the anomaly reconstruction capability of one-class classifiers using pseudo anomalies,” Neurocomputing, vol. 534, pp. 147–160, 2023.

[22]Y. Zhong, X. Chen, J. Jiang, and F. Ren, “A cascade reconstruction model with generalization ability evaluation for anomaly detection in videos,” Pattern Recog- nition, vol. 122, p. 108336, 2022.

[23]M. Astrid, M. Z. Zaheer, D. Aouada, and S.-I. Lee, “Exploiting autoencoder’s weakness to generate pseudo anomalies,” Neural Computing and Applications, pp. 1–17, 2024.

[24]D. Lappas, V. Argyriou, and D. Makris, “Dynamic distinction learning: adaptive pseudo anomalies for video anomaly detection,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2024, pp. 3961–3970.

[25]Z. Liu, X.-M. Wu, D. Zheng, K.-Y. Lin, and W.-S. Zheng, “Generating anomalies for video anomaly detection with prompt-based feature mapping,” in Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2023, pp. 24 500–24 510.

[26]A. Le, Q. U. Nguyen, N. Tran Nguyen, H.H. Phan, and T. H. Chu, “An integration of pseudo anomalies and memory augmented autoencoder for video anomaly detection,” in Proceedings of the 11th International Symposium on Information and Communication Technology, 2022, pp. 262–269.

Nâng cao phát hiện bất thường trong video: Các bất thường giả dựa trên đối tượng và Bộ mã hóa tự động tăng cường bộ nhớ

Tóm tắt: *Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một phương pháp huấn luyện có giám sát mới cho bộ tự mã hóa tăng cường bộ nhớ bằng cách tạo ra các video bất thường tổng hợp dựa trên kỹ thuật gia tốc đối tượng. Hầu hết các phương pháp phát hiện bất thường trong video sử dụng mô hình học máy để học các mẫu của video bình thường. Bất kỳ video nào có mẫu sai khác đáng kể so với mẫu đã học sẽ được coi là bất thường. Tuy nhiên, phát*

triển một mô hình học máy hiệu quả cho bài toán này là một thách thức do sự khan hiếm của các mẫu bất thường. Cụ thể, các mẫu bất thường thường hiếm hơn và khó thu thập hơn so với các mẫu bình thường. Để giải quyết vấn đề này, chúng tôi đề xuất một phương pháp mới sử dụng kỹ thuật điều chỉnh vận tốc đối tượng trên các video gốc. Các bất thường tổng hợp này được kết hợp với dữ liệu bình thường để tạo thành tập dữ liệu mở rộng. Bộ tự mã hóa tăng cường bộ nhớ sau đó được huấn luyện trên các tập dữ liệu này. Kết quả thực nghiệm cho thấy giải pháp đề xuất cải thiện hiệu suất của mô hình gốc.

Từ khóa: Phát hiện bất thường trong video, bộ tự mã hóa, trình tạo bất thường giả, bỏ qua đối tượng.

❑

Improving discriminative representation autoencoder for few-shot cyberattack detection

Manh-Tuan Nguyen[1], Van Loi Cao[1]

[1]*Institute of Information and Communication Technology, Le Quy Don Technical University*

Email: tuannm_ncs42@lqdtu.edu.vn; Tel: 0377761168

Abstract

Few-shot learning has shown promise in the field of network anomaly detection, particularly due to the scarcity of labeled anomalous data. During the training phase, a discriminative autoencoder is employed to make the model suitable for classification tasks. In the testing phase, the model is adapted using a small number of labeled samples from an unknown task. The main objective of DisRAE (Discriminative Representation Autoencoder) is to encourage anomaly data points to be pushed far away from the origin while clustering normal data points around the center in the hidden space. However, the diversity of anomalies and the ability of some attacks to mimic normal traffic pose challenges for training an effective feature extractor. To address these issues, we propose a modified version of DisRAE that guides the model to better distinguish normal and anomalous data points. The model is evaluated on benchmark datasets, including NSL-KDD, CICIDS-2017, and UNSW-NB15. The results demonstrate promising performance when applied to intrusion detection tasks.

Keywords: *Cyber attack detection; few-shot learning; discriminative autoencoder.*

1. Introduction

Cyberattacks have become one of the main threats to data privacy and the integrity of information systems [1]. Most intrusion detection methods rely on either known signature-based detection or anomaly detection [2]. However, both approaches face challenges when new or unseen attacks are constantly developed. The update process for signature-based detectors is time-consuming, while traditional supervised machine learning requires a large and balanced dataset for training classifiers. Due to the scarcity of labeled anomaly data, there has been growing interest in unsupervised learning, semi-supervised learning, and few-shot learning approaches [3].

Unsupervised learning utilizes unlabeled data to identify differences between categories, while semi-supervised learning often leverages only normal data to capture the common characteristics of normal traffic. In real-world scenarios, it is possible to obtain a few labeled samples of unknown cyberattacks through human expertise or knowledge sharing. This highlights the need for a few-shot learning approach, which allows the utilization of both known anomaly data and a small number of labeled samples from unseen anomalies.

Few-shot learning is inspired by the idea of training a model to make predictions based on a small amount of labeled data, similar to how humans learn [4]. This strategy leverages prior knowledge during the training phase, enabling the model to quickly adapt to new tasks with limited labeled data during the testing phase. Unlike traditional supervised learning methods, few-shot learning effectively handles imbalanced datasets and improves the model's ability to generalize. There are three popular approaches in few-shot learning: data-based, algorithm-based, and model-based [5].

1) Data-based approaches: These involve techniques to increase the amount of available training data, such as using similar datasets or generating variants of the limited data to mitigate overfitting.

2) Algorithm-based approaches: These aim to find an optimal parameter set, θ, by training on multiple tasks during the training phase, allowing θ to adapt quickly to new tasks during the testing phase.

3) Model-based approaches: These focus on training a model to create an embedding space during the training phase, where the constrained hypothesis space enables more accurate predictions during the testing phase.

In this work, we adopt a model-based approach to identify a representation space optimized for classification tasks. This study was insprired by our previous word [6]. Specifically, we use a discriminative representation autoencoder (called DisRAE) as a feature extractor $f(x)$ in the training phase. The trained extractor is then combined with an oversampling method to create an embedding space, which is subsequently fed into a binary classifier for cyberattack detection. DisRAE aims to push anomaly instances far away from the origin while keeping the normal instances close to the origin in the embedding space. However, for anomaly instances with features similar to normal instances, the model may struggle to effectively discriminate between them. To address this limitation, we propose a mechanism that first calculates an outlier score and then integrates it into the loss function. This approach guides the model to better separate anomalies with features similar to normal instances.

The subsequent sections of this paper are organized as follows: Section 2 reviews related work on few-shot learning for intrusion detection systems. Section 3 provides the foundational knowledge on few-shot learning and the discriminative representation autoencoder. Section 4 describes the proposed method and framework. Section 5 investigates the outlier score mechanism and presents the corresponding results. Finally, Section 6 concludes the paper and outlines potential future research directions.

2. Related Work

The application of few-shot learning in cybersecurity has gained significant attention, with numerous studies investigating methods to address the challenges posed by limited labeled data and the need for efficient anomaly detection. Yu et al. [7] proposed a metric- based approach that incorporates a traditional softmax function and center loss to address the few-shot problem in network anomaly detection. However, their experiments did not account for scenarios where the attack classes during testing were absent in the training phase. Chaomeng Lu et al. [8] employed the Model-Agnostic Meta-Learning (MAML) algorithm to handle cases with limited training samples, transforming numerical network data into images and optimizing parameters within the MAML framework.

Cao et al. [6] developed a few-shot framework that combines training a discriminative autoencoder with a classifier trained using representations of normal samples and a small number of labeled anomalies. Furqan Rustam et al. [9] introduced a real-time methodology for collecting and detecting network attacks, achieving high accuracy with the meta-RF-GNB model. Ye et al. [10] addressed dataset expansion using the Latent Dirichlet Allocation (LDA) algorithm and proposed the Latent Dirichlet Generative Learning scheme for semantic-aware traffic detection.

Xiong Li et al. [11] designed a novel intrusion detection system that integrates generative adversarial networks (GANs) with MAML to improve few-shot attack detection, outperforming other methods in identifying rare attacks. Matching Networks

[12] and Prototypical Networks [13] utilize distinct embedding functions and prototype representations for anomaly detection. Similarly, Ding et al. [14] introduced Graph Deviation Networks (GDN), leveraging few-shot learning for network anomaly detection. Xu et al. [15] proposed a meta-learning-based few-shot detection method, while Moon et al. [16] combined MAML with variational autoencoders to enhance time-series anomaly detection.

In summary, these studies demonstrate the potential of few-shot learning in cybersecurity, offering innovative approaches to improve anomaly detection accuracy despite the scarcity of labeled data. This study aims to further explore effective feature extraction by enhancing the capabilities of the Discriminative Representation AutoEncoder introduced in [6], focusing on its effectiveness as a latent representation within few-shot learning frameworks.

3. Background

3.1. Few-shot cyberattack detection

Few shot learning are raised attention in researcher, as its potential to tackle imbalance data in cyber attack detection. The main idea of few shot learning is that we can take advantage of prior learning task to quickly adapt with a new task. Some well known approach in few shot learning like: data-augmentation focus to enrich the data, model-based approach finding better embedding space for easyly learn a new task, and algorithm-based approach that find the best weight quickly adapt with few labeled of unseen data. Most of them share the common approach when there are two phase for few shot learning: the training phase learn from the prior knowledge for having good assumption and ability to generalization. In the testing phase, a few shot labeled of unseen data input to the trained model, making the model the ability to classify / predict the unseen data in the query set. Our study approach the model-based, that we aim to find the feature representation from the training set in the first phase (training phase), and then use this feature extractor for the testing set to learn a binary classifier in the testing phase.

Task in cyber attack detection can be seen as classification task T . We have T_m task derived from the training set, that try to classify normal data versus anomaly data. The anomaly/ attack instance can come from multiple categories: C_1, C_2, . . . , C_k. In the testing phase, we construct T_n task the support set, which have normal data and few labeled data of anomaly C_{new}.

3.2. Discriminative Representation Autoencoder

AutoEncoder is well known for feature extraction and dimensionality reduction. Basic structure of Autoencoder is contains 3 part: encoder, bottle neck and decoder part. Popular research aim to train Autoencoder with semi-supervised learning, that requires only normal instance. The objective function learn good recontrucstion for normal instance, therefore making Reconstruction Error large for anomalies instance:

$$L(x, \hat{x}) = \left|\left|x - \hat{x}\right|\right|^2 \quad (1)$$

AutoEncoders excel in unsupervised representation learning. Yet, with the rise of sophisticated attacks, distinguishing cyberattack traffic from normal traffic becomes challenging, which presents a problem for classifiers solely reliant on normal data.

In contrast, Discriminative AutoEncoders (DisAEs) emerge as an innovation that leverages supervised learning to carve out distinctive representation spaces for both normal and anomaly classes [17]. These pioneers in anomaly detection endeavor to push anomaly instances far away from the manifold while concurrently mitigating the reconstruction error of normal data. Central to the ability of DisAEs lies its discriminative loss function, as delineated by Raza et al. [17]:

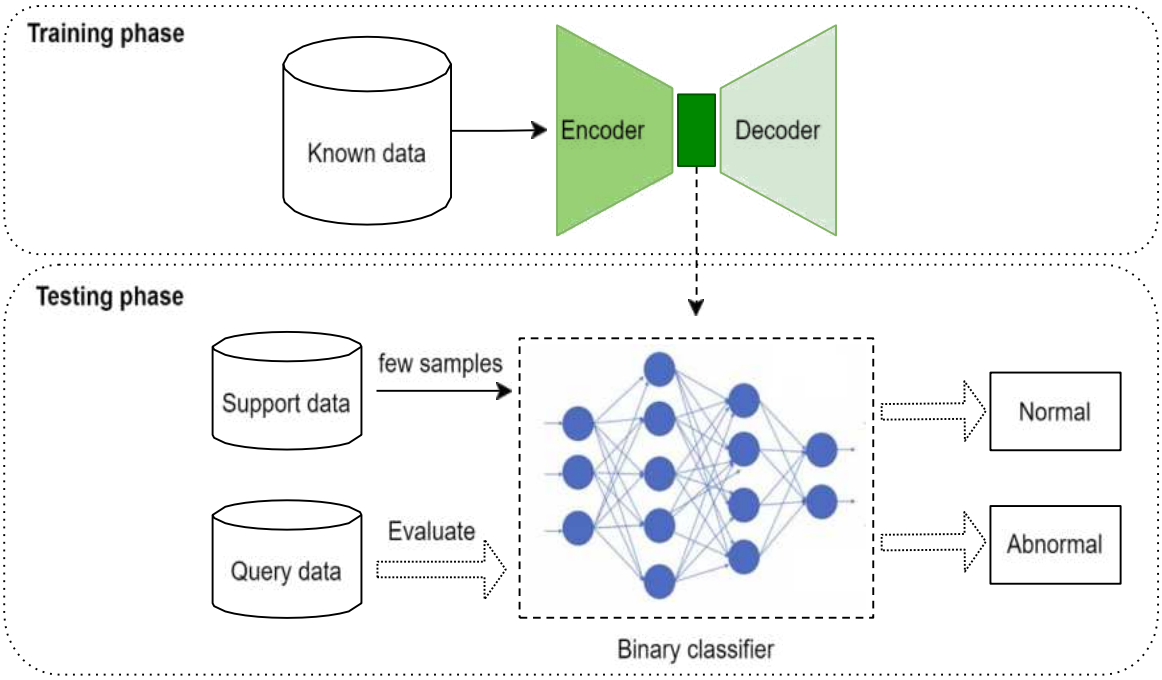
$$L(X^+ \cup X^-) = max(0, l(x) \times (d(x) - 1)) \quad (2)$$

where, X^+ and X^- symbolize the normal and anomaly classes respectively, with $l(x)$ assigned as 1 for normal data and 1 for anomaly instances, $d(x)$ is the reconstruction error (RE) as defined in equation 1. For the scenario, equation 2 aims to minimize the distance d(x) to belong within the range [0, 1] for normal instances, while accentuating distances greater than 1 for anomaly instances.

In [6], Cao et al. introduced the Discriminative Representation Autoencoder (DisRAE), which adds a new regularized loss to an original Autoencoder. The loss function is expressed as follows:

$$L(X^+ \cup X^-) = \sum_{x \in X^+ \cup X^-} d(x) + |z(x)|^{l(x)} \quad (3)$$

where $d(x)$ represents the reconstruction error and $z(x)$ is the latent vector of the input data. This objective function encourages distinct distributions in the latent representation of the Autoencoder for normal and abnormal data. The label values follow the same setting as in DisAE, with 1 for normal data and 1 for anomaly instances. In this study, we propose a method to control the regularization term of DisRAE more effectively, as described in Section 4.



4. Proposed Method

The overview of DisRAE is illustrated in Figure 1 with two phase: the training phase and the testing phase. In the training phase, the model follows supervised learning with known labeled data, which contains normal and known anomalous categories. In the testing phase, we use the bottleneck part of DisRAE to capture the best features of the support data. The support data contains normal data and a few samples of a new anomalous category. The query data is used for evaluation, which contains normal data and the rest of the new anomalous category in the dataset. After obtaining the embeddings of the support data, we build a binary classifier and then test it with the query data.

In my previous study, we treated all anomaly samples as having the same distance penalty when learning the model. However, in practice, some cyberattacks attempt to mimic the normal behavior of legitimate traffic, making them more difficult to detect. In this study, we improve the DisRAE model by controlling the distance from the anomaly to the origin, allowing for more effective detection of such attacks. To achieve this, before feeding the data into the model, we first perform an initial analysis of the anomalous samples. Assuming each anomalous sample has an outlier score, we explore various methods to calculate this score. Specifically, we investigate two methods for determining the outlier score r_i: sampling-based techniques and one-class autoencoders:

1. *Sampling-based outlier*: To achieve a stable and reliable initial outlier ranking, we employ a bagging ensemble of sampling methods. The definition is as follows: given a data object x_i, the sampling- based approach defines its outlierness as:

$$r_i = \frac{1}{m}\sum_{j}^{m} nn_dist(x_i|S_j) \tag{4}$$

With $S_j \in X$ is random data subsample, m is the ensemble size, $nn_dist(\cdot \mid \cdot)$ return nearest neighbor distance of x_i in S_j . To adapt to our scenario, we define r_i as the outlier score:

$$r_i = \min_{S' \in S(X)} d(x_i, S') \tag{5}$$

Where S represents the normal class data, and S' is a random subset of S.

2. One Class Autoencoder: This method based on properties of Autoencoder network, that using Reconstruction Error (RE) to calculated as outlier score. We train Autoencoder with only normal and then input the anomalous data go through the Autoencoder model to achieve outlier score: $r_i = RE_score = \left|\left|x - \hat{x}\right|\right|^2$

After calculating all r_i values for the anomalous data, they are normalized to the range (0, 1) using Min-Max Normalization. The final loss is then computed as:

$$L(X^+ \cup X^-) = d(x) + (1 - r_i) \times |z(x)|^{l(x)} \tag{6}$$

The purpose of this objective function is to control the regularization term for different anomalous samples:

· For normal samples ($l(x) = 1$ and $r_i = 0$): The loss becomes: $L = d(x) + |z(x)|$, which is consistent with the original DisRAE formulation.

· For anomalous samples we have ($l(x) = -1$ and $r_i \in (0, 1)$): The loss objective becomes: $L = d(x) + (1 - r_i)/z(x)$. This means that if an anomalous sample closely resembles a normal point (r_i is small), the representation magnitude |z| must be large to distinguish it.

After training with known anomalous samples, DisRAE can acquire prior knowledge that enables it to adapt effectively to a few samples of an unseen attack category during the testing phase.

5. Experiments

Our methodology was evaluated using benchmark models on network intrusion detection datasets: NSL-KDD, CIC-IDS2017, and UNSW-NB15. The NSL-KDD dataset is segmented into three parts: KDDTrain+ with 125,973 records, KDDTest+ with 22,544 records, and KDDTest-21 with 11,850 records [18]. The NSL-KDD dataset classifies all attacks into four main categories, as shown in Table 1:

To configure the architecture of the autoencoders, we adhere to a guideline mentioned in [20]. According to this rule of thumb, the number of hidden neurons in the middle hidden layer m is calculated as $m = 1 + \sqrt{n}$, where n represents the number of original features.

For each dataset, we select attack classes with fewer samples compared to others for few-shot target (meta-testing): the U2R group in NSL-KDD; DoS Slowloris, Botnet, and SSH-Patator in CIC-IDS2017; and Worm in UNSW-NB15 datasets. These classes are chosen because they have relatively fewer samples compared to other classes but still provide enough samples for the querying phase.

During the meta-training phase, we exclude the few-shot class from the meta-training data to train DisAE and DisRAE. For example, in NSL-KDD, we train DisAE and DisRAE using the normal class and all other attack classes (Probe, DoS, and R2L) without U2R. During the meta-testing phase, we only use the U2R group and normal data from the testing set. The similar setting was used for CICIDS-2017 and UNSW-NB15.

In the meta-testing phase, we create a support set containing 20 samples of a new/rare anomaly class and 200 samples of the normal class. We train FSL classifiers using a few samples from a new/rare anomaly group and a sufficiently large amount of normal data on the latent representations of DisAE and DisRAE. To ensure diversity in training, we construct batches by randomly selecting 10 samples from the few-shot collection and 10 samples from the normal data. The number of epochs is set to cover all anomaly samples at least once, ensuring comprehensive training. For accuracy, we randomly create 10 different support sets, train the FSL classifier for each set, and then calculate the average AUC result.

To evaluate the performance of our experiments, we calculate the Area Under the ROC Curve (AUC), which represents the total area beneath the ROC curve. The AUC is a comprehensive performance metric that accounts for all possible classification thresholds. We assess the proposed model using two methods for calculating the outlier score: the Sampling-based method and the One-Class Autoencoder (AE) method, in combination with DisRAE. These

methods are compared with the original DisRAE using the AUC metric, as shown in Table 1. The table employs color scales, with lighter colors indicating higher AUC values.

For anomaly detection with few samples in the testing phase, we focus on specific attack types within each dataset. In the NSL-KDD dataset, we evaluate the U2R attack type. In the CIC-IDS2017 dataset, we consider three attack classes: SSH-Patator, Botnet, and DoS. In the UNSW-NB15 dataset, we target Worm attacks. The results demonstrate that DisRAE with the Sampling-based method outperforms the original DisRAE across all cases, particularly in the NSL-KDD and UNSW-NB15 datasets. The One-Class AE method also enhances DisRAE's performance in most cases, including U2R, DoS, and Worm attack types, though it shows limited improvement for the Botnet attack type.

Table 1. AUC performance of DisRAE model using outlier score

Datasets	Attack	DisRAE with Sampling-Based	DisRAE with One-Class AE	Original DisRAE
NSLKDD	U2R	0.9397	0.9384	0.8875
CICIDS	DoS	0.8333	0.8729	0.8245
CICIDS	SSH	0.9318	0.9376	0.9271
CICIDS	Botnet	0.9332	0.8768	0.9202
UNSW-NB15	Worm	0.9295	0.963	0.8976

6. Conclusions

In this paper, we introduced an enhanced version of the Discriminative Representation AutoEncoder (DisRAE) designed for cyberattack detection. This new model performs an initial assessment of the query data point to calculate an outlier score, which helps DisRAE learn the representation space more efficiently. Our investigations on benchmark datasets demonstrate that our proposed method improves the performance of DisRAE, leading to higher detection rates for nearly all given cyberattacks. Our approach highlights the potential of leveraging meta-learning and Discriminative Representation AutoEncoders for effective anomaly detection tasks.

In future work, we plan to further enhance the performance of anomaly detection in few-shot learning strategies by leveraging advances in meta-learning techniques with DisRAE. This may involve incorporating modern frameworks in metric-based approaches that are adaptable to the cyberattack domain.

References

[1] V. V. Phoha, *Internet security dictionary*. Springer, 2002.

[2] A. Khraisat, I. Gondal, P. Vamplew, and J. Kamruzzaman, "Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges," *Cybersecurity*, vol. 2, no. 1, pp. 1–22, 2019.

[3] S. Hosseini, "Intrusion detection in iot network using few-shot class incremental learning," Ph.D. dissertation, Carleton University, 2023.

[4] A. Yang, C. Lu, J. Li, X. Huang, T. Ji, X. Li, and Y. Sheng, "Application of meta-learning in cyberspace security: A survey," *Digital Communications and Networks*, vol. 9, no. 1, pp. 67–78, 2023.

[5] Y. Wang, Q. Yao, J. T. Kwok, and L. M. Ni, "Generalizing from a few examples: A

survey on few-shot learning," *ACM computing surveys (csur)*, vol. 53, no. 3, pp. 1–34, 2020.

[6] V. L. Cao, M. T. Nguyen, and T. D. Le Dinh, "Few-shot learning with discriminative representation for cyberattack detection," in *2023 15th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE)*, 2023. doi: 10.1109/KSE59128.2023.10299444 pp. 1–6.

[7] Y. Yu and N. Bian, "An intrusion detection method using few-shot learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49 730– 49 740, 2020.

[8] C. Lu, X. Wang, A. Yang, Y. Liu, and Z. Dong, "A few-shot-based model-agnostic meta-learning for intrusion detection in security of internet of things," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 24, pp. 21 309–21 321, 2023.

[9] F. Rustam, A. Raza, M. Qasim, S. K. Posa, and A. D. Jurcut, "A novel approach for real-time server-based attack detection using meta-learning," *IEEE Access*, 2024.

[10] T. Ye, G. Li, I. Ahmad, C. Zhang, X. Lin, and J. Li, "Flag: Few-shot latent dirichlet generative learning for semantic-aware traffic detection," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 19, no. 1, pp. 73–88, 2021.

[11] J. He, L. Yao, X. Li, M. K. Khan, W. Niu, X. Zhang, and F. Li, "Model-agnostic generation-enhanced technology for few-shot intrusion detection," *Applied Intelligence*, vol. 54, no. 4, pp. 3181–3204, 2024.

[12] O. Vinyals, C. Blundell, T. Lillicrap, D. Wierstra *et al.*, "Matching networks for one shot learning," *Advances in neural information processing systems*, vol. 29, 2016.

[13] J. Snell, K. Swersky, and R. S. Zemel, "Prototypical networks for few-shot learning," 2017.

[14] K. Ding, Q. Zhou, H. Tong, and H. Liu, "Few-shot network anomaly detection via cross-network meta-learning," in *Proceedings of the Web Conference 2021*, 2021, pp. 2448–2456.

[15] C. Xu, J. Shen, and X. Du, "A method of few-shot network intrusion detection based on meta-learning framework," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 15, pp. 3540–3552, 2020.

[16] J. Moon, Y. Noh, S. Jung, J. Lee, and E. Hwang, "Anomaly detection using a model-agnostic meta-learning- based variational auto-encoder for facility management," *Journal of Building Engineering*, vol. 68, p. 106099, 2023.

[17] S. Razakarivony and F. Jurie, "Discriminative autoencoders for small targets detection," in *2014 22nd International conference on pattern recognition*. IEEE, 2014, pp. 3528–3533.

[18] L.Dhanabal and D. S. P. Shantharajah, "A study on nsl-kdd dataset for intrusion detection system based on classification algorithms," 2015. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16298036

[19] N. Moustafa and J. Slay, "Unsw-nb15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (unsw- nb15 network data set)," in *2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)*, 2015. doi: 10.1109/MilCIS.2015.7348942 pp. 1–6.

[20] V. L. Cao, M. Nicolau, and J. McDermott, "A hybrid autoencoder and density estimation model for anomaly detection," in *Parallel Problem Solving from Nature–PPSN XIV, Edinburgh, UK, September 17-21, 2016, Proceedings 14*. Springer, 2016, pp. 717–726.

Nâng cao hiệu năng học phát hiện tấn công mạng sử dụng ít dữ liệu cho mạng autoencoder học biểu diễn phân biệt

Tóm tắt: *Học máy với chiến lược ít dữ liệu đã cho thấy triển vọng trong lĩnh vực phát hiện bất thường mạng, đặc biệt khi dữ liệu có nhãn của các điểm dữ liệu bất thường rất khan hiếm. Giai đoạn huấn luyện học một bộ mã hóa tự động phân biệt để làm cho mô hình phù hợp hơn với nhiệm vụ phân loại. Trong giai đoạn kiểm tra, mô hình được điều chỉnh với một số ít dữ liệu có nhãn của nhiệm vụ chưa biết. Mục tiêu chính của DisRAE là khuyến khích các điểm dữ liệu bất thường bị đẩy xa khỏi gốc tọa độ, đồng thời làm cho các điểm dữ liệu bình thường tập trung xung quanh trung tâm trong không gian ẩn. Tuy nhiên, do tính đa dạng của các điểm bất thường và một số cuộc tấn công cố gắng mô phỏng lưu lượng bình thường, việc huấn luyện bộ trích xuất đặc trưng trở nên khó khăn. Nghiên cứu này giới thiệu một phiên bản cải tiến của DisRAE, giúp mô hình biểu diễn tốt hơn các điểm dữ liệu bình thường và bất thường một cách riêng biệt bằng một số kỹ thuật điều khiển qua việc tính toán mức độ bất thường ban đầu. Nghiên cứu tiến hành thử nghiệm mô hình trên các tập dữ liệu tiêu chuẩn: NSL-KDD, CICIDS-2017 và UNSW-NB15. Các kết quả cho thấy hiệu năng tốt và là tiềm năng khi có thể áp dụng vào các mô hình phát hiện tấn công mạng.*

Từ khóa: Học ít dữ liệu; Phát hiện bất thường; autoencoder phân biệt.

Nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ cắt và tính chất môi trường đến các yếu tố cản cắt trong quá trình làm việc của trống cắt lắp trên máy đào một gầu

Đặng Đình Vũ[1], Trịnh Văn Hải[2]

[1]Hệ Quản lý học viên sau đại học; Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Viện Cơ khí động lực; Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email: dinh-vu.dang@lqdtu.edu.vn, Điện thoại liên hệ: 0964322236

Tóm tắt

Bài báo trình bày mối quan hệ giữa tốc độ chuyển động của đầu cắt và các thành phần lực cản, mô men cản tác dụng lên trống cắt gắn trên máy đào một gầu. Nghiên cứu trình bày phương pháp xây dựng mô hình toán học để đánh giá tác động của sự thay đổi tốc độ đầu cắt đến độ lớn; phân bố của các thành phần lực cản và mô men cản trong quá trình vận hành. Ngoài ra, bài báo cũng phân tích ảnh hưởng của các đặc tính môi trường làm việc, đặc biệt là cường độ nén không giới hạn (UCS) của vật liệu lên các thành phần lực cản này. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự biến đổi tốc độ đầu cắt dẫn đến những thay đổi đáng kể trong phân bố và độ lớn của các thành phần lực cản và mô men cản, và những thay đổi tương tự cũng được khảo sát khi điều kiện môi trường làm việc thay đổi. Kết quả của bài báo cung cấp cơ sở quan trọng để nghiên cứu xác định vùng làm việc có lực cản tối thiểu, từ đó nâng cao hiệu suất và độ bền của trống cắt trong các điều kiện làm việc khác nhau.

Từ khóa: *Lực cắt; tốc độ cắt; trống cắt; cường độ nén không giới hạn*

1. Đặt vấn đề

Xuất phát từ tính đa năng của máy đào thủy lực một gầu, trong thực tế đã có nhiều dạng thiết bị công tác khác nhau được tích hợp để thay thế gầu xúc nguyên bản nhằm giải quyết các bài toán thi công được đặt ra. Một trong số các dạng thiết bị công tác thay thế có thể kể đến là trống cắt được tích hợp trên máy đào. Việc cải tiến các khâu công tác trên máy đào nguyên bản sau đó tích hợp thêm trống cắt có thể giúp gia tăng phạm vi làm việc của máy, từ đó đáp ứng được các yêu cầu thi công chuyên biệt trong đó có nhiệm vụ mở luồng hàng hải. Trống cắt lắp sau khi được tích hợp lên máy đào nguyên bản có thể sử dụng để cắt qua các loại vật liệu khác nhau, từ đất mềm đến đá với độ cứng khác nhau. Hiệu suất làm việc của trống cắt phần lớn phụ thuộc vào khả năng duy trì trạng thái cắt tối ưu cũng như giảm thiểu sự mài mòn của thiết bị. Để duy trì và nâng cao hiệu suất làm việc này cần phải giải quyết tốt mối quan hệ giữa tốc độ chuyển động của trống cắt và các lực cản cũng như mô men cản mà nó gặp phải trong quá trình làm việc [1,2].

Theo [3,4], tốc độ chuyển động của trống cắt giữ một vai trò quan trọng trong việc xác định tương tác giữa trống cắt và môi trường mà thiết bị làm việc. Dưới quỹ đạo điều khiển mong muốn, khi trống cắt dịch chuyển sẽ xuất hiện các thành phần lực cản và mô men do tác động của môi trường tương tác tạo nên. Các thành phần lực này bao gồm cả lực pháp tuyến, tác dụng vuông góc với bề mặt cắt; lực tiếp tuyến, tác dụng song song với bề mặt cắt. Mô men cản được hình thành bởi các lực này tác động lên trống cắt, ảnh hưởng đến sự ổn định, độ bền và hiệu suất tổng thể của thiết bị [6]. Chính vì vậy, hiểu rõ cách các lực và mô men này thay đổi khi tốc độ trống cắt làm việc ở các chế độ khác nhau là rất quan trọng để tối ưu hóa hoạt động của chúng [3].

Ảnh hưởng của tốc độ trống cắt lên các lực cản và mô men là một vấn đề phức tạp. Một mặt, tăng tốc độ có thể nâng cao hiệu quả cắt bằng cách cho phép trống cắt loại bỏ nhiều vật liệu hơn trong một khoảng thời gian nhất định. Tuy nhiên, điều này cũng làm tăng các lực cản, dẫn đến tiêu thụ năng lượng cao hơn và có thể gây mài mòn lớn hơn cho các răng cắt [2,3,4]. Mặt khác, giảm tốc độ có thể làm giảm các lực cản, nhưng cũng có thể dẫn đến việc không đủ lực cắt, giảm hiệu quả của trống cắt khi xử lý các vật liệu cứng hơn [5]. Do đó, việc tìm ra tốc độ tối ưu, cân bằng giữa các yếu tố này, là rất cần thiết để tối đa hóa hiệu suất của trống cắt đồng thời đảm bảo độ bền lâu dài của nó [4].

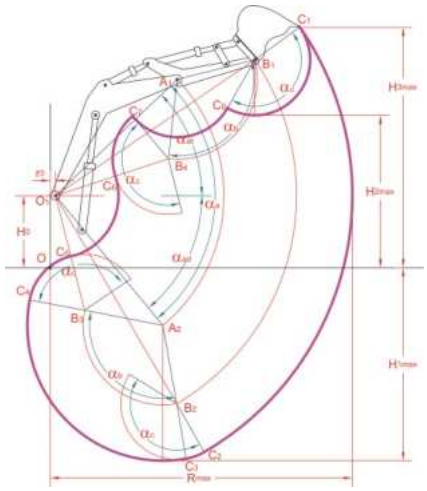
Ngoài ra, các đặc tính của môi trường làm việc, đặc biệt là các đặc tính của vật liệu như cường độ nén không bị giới hạn (UCS), có ảnh hưởng đáng kể đến độ lớn và phân bố của các lực cản và mô men tác dụng lên trống cắt [1,3]. Các vật liệu có UCS cao hơn gây ra lực cản lớn hơn, đòi hỏi nhiều năng lượng hơn và dẫn đến sự mài mòn gia tăng cho trống cắt [4]. Ngược lại, các vật liệu có UCS thấp hơn có thể cho phép hoạt động trơn tru hơn nhưng có thể dẫn đến các thách thức khác, chẳng hạn như việc khó khăn trong việc hút hết các sản phẩm của quá trình cắt nhằm tăng hiệu quả của quá trình mở luồng. Do đó, mối tương tác giữa tốc độ trống cắt và đặc tính của vật liệu phải được xem xét cẩn thận để đạt được hiệu suất cắt tối ưu [2,5].

Nội dung của bài báo nhằm xây dựng mô hình toán học để khảo sát mối quan hệ giữa tốc độ chuyển động trống cắt và các lực cản thành phần cũng như mô men cản xuất hiện tác dụng lên trống cắt khi làm việc. Nội dung nghiên cứu sẽ kể đến không chỉ tốc độ dẫn động, làm việc của trống cắt mà còn cả các đặc tính của vật liệu và các yếu tố môi trường góp phần vào các lực và mô men mà trống cắt gặp phải trong quá trình hoạt động. Các kết quả của nghiên cứu này dự kiến sẽ có những ảnh hưởng đáng kể đến việc thiết kế và vận hành các trống cắt. Bằng cách xác định các điều kiện vận hành tối ưu giúp giảm thiểu các lực cản và mô men, nghiên cứu này sẽ cung cấp những thông tin có giá trị nhằm cải thiện hiệu suất, độ bền và hoạt động tổng thể của các trống cắt trong nhiều ứng dụng khác nhau [1,4]. Hơn nữa, nghiên cứu này sẽ cung cấp các hướng dẫn thực tế cho việc phát triển các chiến lược điều khiển có thể được áp dụng trong thời gian thực để điều chỉnh tốc độ của trống cắt dựa trên các đặc tính cụ thể của vật liệu đang được xử lý, từ đó nâng cao khả năng thích ứng và hiệu quả của trống cắt [3,5].

2. Tích hợp trống cắt lên máy đào một gầu để thi công mở luồng

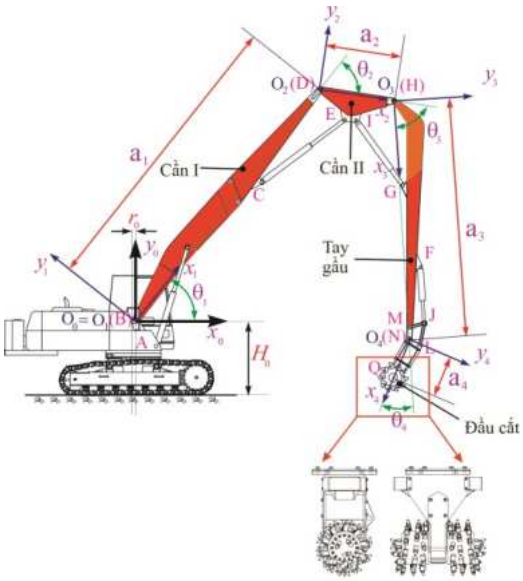
Máy đào thủy lực một gầu với thiết bị công tác là gầu xúc nguyên bản có vùng làm việc đã được xác lập, đi cùng là giá trị các kích thước đặc trưng cho phạm vi làm việc như: Bán kính với tới xa nhất R_{max}; chiều sâu với tới lớn nhất H_{1max}; chiều cao xả lớn nhất H_{2max}; chiều cao với tới lớn nhất H_{3max} [6] (Hình 1).

Với đặc thù của nhiệm vụ thi công mở luồng, vùng làm việc của thiết bị công tác gắn trên máy đào nguyên bản cùng các giá trị kích thước đặc trưng cho phạm vi làm việc được đề cập ở trên cần phải điều chỉnh nhằm nâng cao hiệu quả của quá trình thi công, đáp ứng chiều sâu cắt theo từng nhiệm vụ. Cụ thể, nhiệm vụ thi công mở luồng yêu cầu vùng làm việc của thiết bị công tác cần được mở rộng cả về diện tích (về phía dưới vị trí mặt bằng máy đứng) cũng như trị số của chiều sâu với tới của thiết bị công tác.

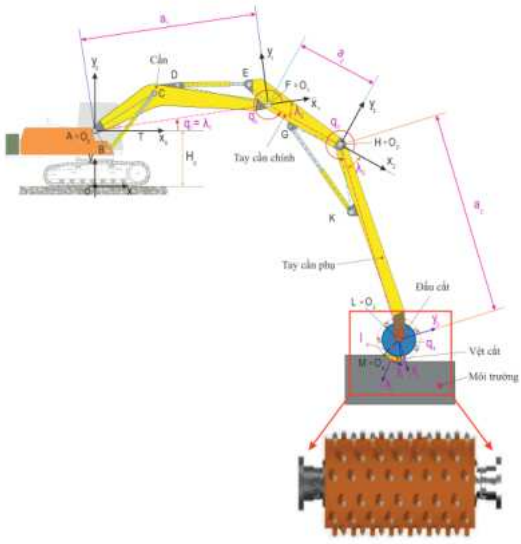


Hình 1. Sơ đồ xác định phạm vi làm việc của gầu xúc

Hiện nay tại Việt Nam, việc nghiên cứu cải tiến; tích hợp các thiết bị công tác lên các máy cơ sở hiện hữu nhằm đáp ứng nhu cầu thi công mở rộng các luồng hàng hải, tiếp cận các vùng biển, đảo xa đang là bài toán được đặt ra hết sức cấp bách. Quá trình thực hiện đề tài Nghiên cứu và phát triển công nghệ Quốc gia, mã số ĐTĐL.CN-38/20-C, TS Trần Hữu Lý và các cộng sự đã nghiên cứu tích hợp trống cắt chữ V lên máy đào thủy lực một gầu Hitachi EX400LC-5 để đáp ứng yêu cầu mở luồng (Hình 2).



Hình 2. Máy đào thủy lực Hitachi EX400LC-5 tích hợp trống cắt chữ V để thi công mở luồng



Hình 3. Máy đào thủy lực Komatsu PC800-6 tích hợp trống cắt để thi công mở luồng

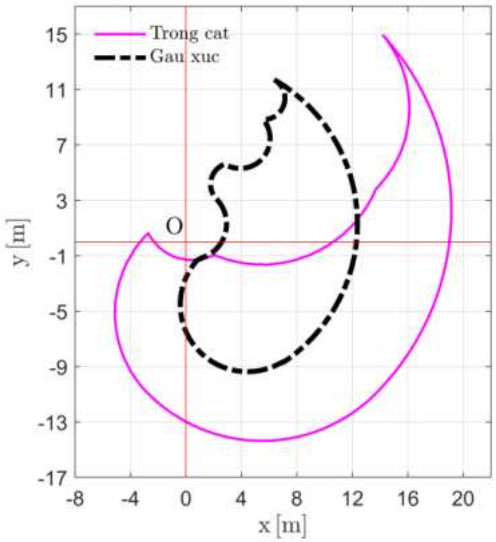
Tuy vậy, quá trình thử nghiệm, triển khai sản phẩm thực tế đã xuất hiện các hạn chế cả trong quá trình điều khiển các khâu động nhằm dẫn động đầu cắt cũng như hiệu quả làm việc của trống cắt chữ V. Để khắc phục những bất cập trên, một dạng trống cắt khác được chế tạo và tích hợp lên máy đào thủy lực Komatsu PC800-6 nguyên bản có cải tiến phần tay cần dẫn động trống cắt (Hình 3) - đây cũng là đối tượng nghiên cứu của bài báo.

Trên cơ sở phương pháp xây dựng vùng làm việc đã được trình bày trong tài liệu [6], với các thông số chính về kết cấu của máy đào thủy lực Komatsu PC800-6 gắn gầu xúc nguyên bản

và trống cắt thay thế (với tay cần phụ được cải tiến) được thể hiện sau đây, vùng làm việc của 2 dạng thiết bị công tác là gầu xúc và trống cắt được thể hiện như Hình 4:

(i) Máy đào Komatsu PC800-6 gắn gầu xúc nguyên bản: $a_1 = 7.115$ m; $a_2 = 2.890$ m; $a_3 = 2.200$ m; $\theta_1 = [-45^0\ 45^0]$; $\theta_2 = [-90^0\ 0^0]$; $\theta_3 = [0^0\ -150^0]$;

(ii) Máy đào Komatsu PC800-6 gắn trống cắt với tay cần phụ được cải tiến: $a_1 = 7.115$ m; $a_2 = 2.890$ m; $a_3 = 8.242$ m; $\theta_1 = [-45^0\ 45^0]$; $\theta_2 = [-90^0\ 0^0]$; $\theta_3 = [-90^0\ -5^0]$;



Hình 4. Vùng làm việc của gầu xúc và trống cắt thay thế

Kết quả thể hiện vùng làm việc của 2 dạng thiết bị công tác được chỉ ra trong Hình 4 cho thấy diện tích vùng làm việc của trống cắt tích hợp trên máy đào Komatsu PC800-6 lớn hơn nhiều so với vùng làm việc của gầu xúc nguyên bản. Vùng làm việc này có xu hướng mở rộng về phía dưới (so với mặt phẳng tại vị trí máy đứng), cùng với đó là chiều sâu với tới lớn nhất cũng được gia tăng thông tin cụ thể hơn được chỉ ra trong bảng 1. Điều này dẫn tới việc tích hợp đầu cắt lên máy cơ sở với tay cần phụ được cải tiến sẽ phù hợp cho nhiệm vụ mở luồng.

Bảng 1. So sánh vùng làm việc của gầu xúc và trống cắt thay thế

STT	Giá trị so sánh	Gầu xúc nguyên bản	Trống cắt	Tỉ lệ thay đổi
1	Chiều sâu với tới lớn nhất H_{1max} (m)	9.37	14.31	1.53
2	Diện tích vùng làm việc (m^2)	164.53	340.26	2.07
3	Diện tích vùng làm việc phía dưới trục hoành (hình 4) (m^2)	88.61	255.70	2.89

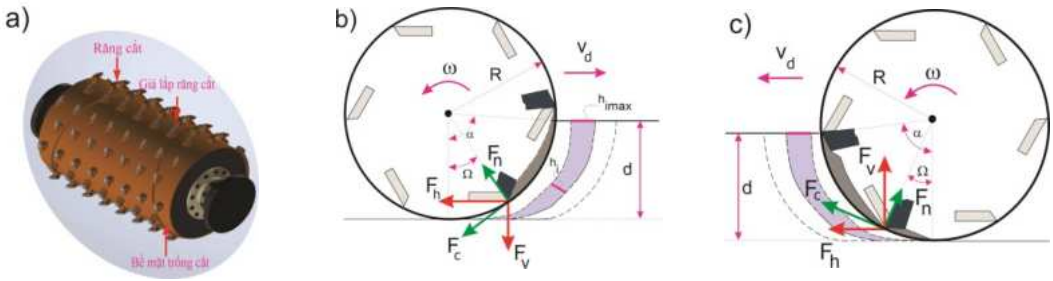
3. Mô hình tương tác giữa trống cắt và môi trường làm việc

Quá trình làm việc, trống cắt tích hợp trên máy cơ sở tương tác với môi trường thông qua các răng cắt (dao cắt) gắn trên bề mặt (Hình 5a). Năng lượng tiêu hao trong quá trình tương tác với môi trường của trống cắt chiếm phần lớn năng lượng cần cung cấp cho máy làm việc, do đó việc thiết kế và lựa chọn trống cắt có ảnh hưởng rất lớn đến hiệu suất làm việc cũng như tiêu hao năng lượng của máy. Mô hình tương tác của trống cắt với môi trường làm việc được thể hiện như

Hình 5b-c. Độ dày cắt cho răng cắt thứ i với góc cắt đã cho, $\Omega_i(t) = \omega t + \alpha_i$ được xác định như sau [7,8] (Hình 5b-c):

$$h_i(t) = \begin{cases} (60v_d / n_r m)\sin\Omega_i & \text{If } \mod(\Omega_i, 2\pi) \le \alpha \\ 0 & else \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, $\omega=\pi n_r/30$ là vận tốc góc của trống cắt, n_r là tốc độ quay của trống cắt; v_d là tốc độ chuyển động của trống cắt m/s, α là góc tiếp xúc giữa trống cắt và số các răng cắt tiếp xúc, d là chiều sâu cắt, R là bán kính trống cắt, m là tổng số lượng răng cắt theo chiều dài bề mặt trống cắt.



Hình 5. Mô hình trống cắt (a) và sơ đồ cắt của trống cắt (b là phương pháp cắt từ dưới lên, c là phương pháp cắt từ trên xuống)

Với mỗi răng cắt tham gia vào quá trình tương tác, trên cơ sở mô hình lý thuyết được đề xuất bởi Goktan [9,10], thành phần lực cản tiếp tuyến F_c và pháp tuyến F_n lần lượt được xác định như sau:

$$F_{ci} = \frac{4\pi\sigma_t h_i^2(t)\sin^2(\theta+\psi)}{\cos(\theta+\psi)};\ F_{ni} = \frac{2F_{ci}}{\tan(\pi/2-\theta+\psi)} \quad (2)$$

Trong đó, σ_t là cường độ nén không giới hạn của vật liệu (môi trường tương tác); θ là góc bán kính của đầu răng cắt, ψ là góc ma sát giữa răng cắt và vật liệu.

Khi đó trong trường hợp có n_c răng cắt tham gia vào quá trình tương tác giữa trống cắt và mội trường làm việc; lực cắt tổng hợp theo 2 phương ngang (F_h), phương dọc (F_v) và mô men tổng cộng M_c tác dụng lên đầu cắt được xác định như trong công thức 3 và 4 (với chỉ số D đại diện cho phương pháp cắt từ dưới lên, chỉ số U đại diện cho phương pháp cắt từ trên xuống).

$$F_h^{D/U} = \sum_{i=1}^{n_c} \pm F_{ci} cos\Omega_i - F_{ni} sin\Omega_i;\ F_v^{D/U} = \sum_{i=1}^{n_c} \pm F_{ci}\sin\Omega_i - F_{ni}\cos\Omega_i \quad (3)$$

$$M_c = R\sum_{i=1}^{n_c} F_{ci} \quad (4)$$

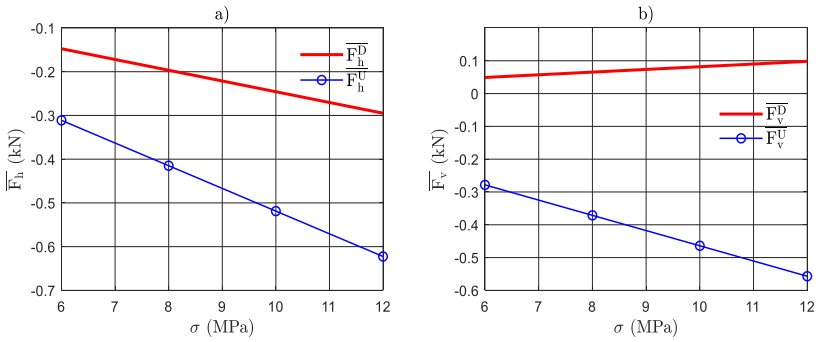
Trên cơ sở đó năng lượng tiêu thụ cho quá trình cắt của trống cắt được tính theo công thức (5) [10,11]:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} F_{ci}}{2d} \quad (5)$$

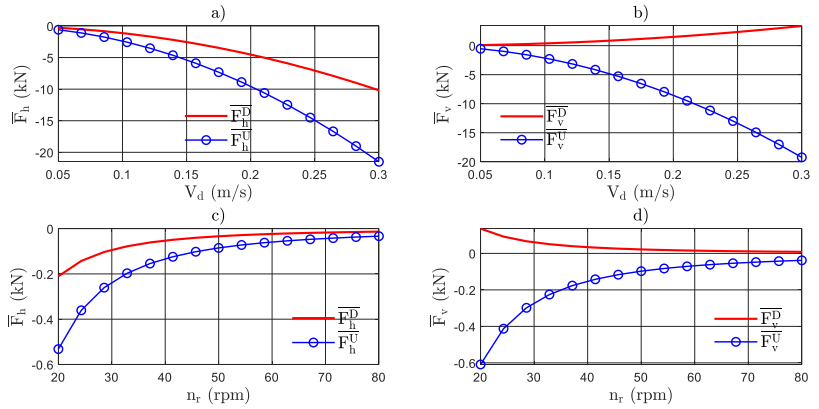
4. Kết quả và nhận xét

Để khảo sát quá trình tương tác giữa thiết bị công tác và môi trường làm việc được đề cập trong mục 3; thiết bị công tác (trống cắt) với các kích thước đã được khảo sát và các tham số

làm việc được thể hiện như sau [11]: R = 0.5 m; d = 0.1-0.3 m; v_d = 0.05-0.3 m/s; n_r = 20-80 rpm; θ = 35-55°; ψ =10°; σ_t = 6-12 MPa; m = (2) 8. Mối quan hệ giữa các thành phần lực cản cắt và đặc trưng của môi trường cũng như các tham số làm việc của hệ thống được thể hiện như các Hình 6 và 7 dưới đây:

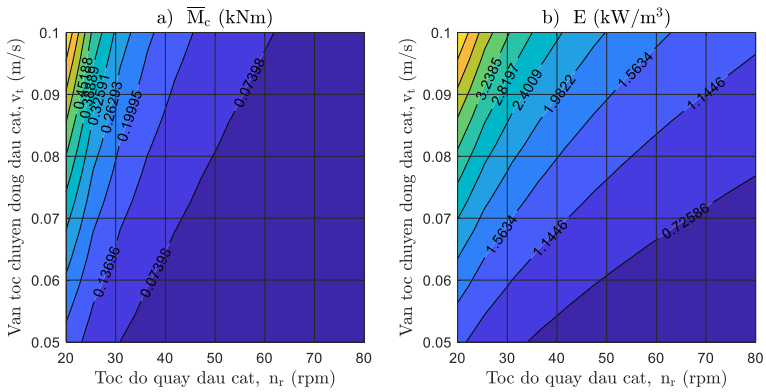


Hình 6. Ảnh hưởng của môi trường tương tác đến các thành phần lực cản cắt



Hình 7. Ảnh hưởng của các tham số làm việc đến các thành phần lực cản cắt

Các thành phần lực cản tác động lên thiết bị công tác tỉ lệ thuận với độ cứng của môi trường tương tác được thể hiện qua kết quả khảo sát ở Hình 6. Cùng với đó là ảnh hưởng của tốc độ chuyển động tịnh tiến và tốc độ quay của trống cắt lên lực cắt trung bình cũng được biểu diễn trên Hình 7; trong đó khi tăng tốc độ chuyển động tịnh tiến của trống cắt dẫn đến tăng lực cắt, trong khi tốc độ quay của trống cắt càng cao thì lực cắt càng nhỏ; các kết quả thu được phù hợp với tài liệu tham khảo được trích dẫn [12].



Hình 8. Ảnh hưởng của tốc độ cắt đến giá trực mô men cản cắt trung bình (a) và mức tiêu hao năng lượng cắt (b)

Cuối cùng, ảnh hưởng của chế độ cắt (tốc độ dẫn động tịnh tiến và chuyển động quay của trống cắt) đến mô men cản cắt trung bình và mức tiêu hao năng lượng cắt cũng được khảo sát (hình 8). Trong điều kiện môi trường khảo sát có giá trị cường độ nén không giới hạn σ_t = 6 Mpa; giá trị của mức tiêu hao năng lượng E nằm trong khoảng từ 0.307 kW/m^3 đến 4.061 kW/m^3 với điều kiện dải vận tốc quay của trống cắt từ 20 vòng/phút đến 80 vòng/phút. Kết quả khảo sát được mô tả trên hình 8 cho thấy có sự ảnh hưởng lớn của các yếu tố vận hành đến mô men cản cắt trung bình và mức tiêu hao năng lượng khi thiết bị làm việc.

5. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu động học thiết bị công tác của máy đào thủy lực (Komatsu PC800-6) tích hợp trống cắt để thi công mở luồng, bài báo đã khảo sát và đưa ra được vùng làm việc của trống cắt sau tích hợp lên xe cơ sở. Kết quả cho thấy vùng làm việc của trống cắt được mở rộng phù hợp với yêu cầu đặt ra của nhiệm vụ thi công mở luồng, đây cũng là cơ sở để khảo sát vùng làm việc của các dạng thiết bị công tác khác được tích hợp tương tự.

Ngoài ra, trong bài báo này cũng đã trình bày mô hình cắt của trống cắt được tích hợp trên máy đào. Từ các tính toán thu được, có thể nhận thất rằng các thành phần lực cắt và mô-men xoắn phụ thuộc chủ yếu vào yếu tố hình học và các thông số vận hành (tốc độ dẫn động tịnh tiến và quay, quy trình cắt) của trống cắt. Tương tự như vậy, công suất cắt và mức tiêu thụ năng lượng có mối quan hệ chặt chẽ với nhau và các yếu tố này cũng bị ảnh hưởng bởi các thông số kết cấu và chế độ làm việc của trống cắt. Các kết quả khảo sát là cơ sở để lựa chọn chế độ làm việc hợp lý cho phù hợp với yêu cầu đặt ra.

Tài liệu tham khảo

[1] Wang, H., & Liu, C. (2018). Effect of cutting speed on cutting performance and tool wear of drum cutters. *Journal of Mechanical Engineering, 64*(2), 65-73.

[2] Gao, J., & Zhang, L. (2021). Influence of rock properties on cutting forces and wear of drum cutters. *Journal of Construction Engineering and Management, 147*(7), 04021060.

[3] Li, X., & Wang, J. (2022). Dynamic response of drum cutter under different cutting conditions: A numerical study. *Mechanical Systems and Signal Processing, 167*, 108589.

[4] Zhang, Y., & Liu, X. (2019). A study on the wear and efficiency of drum cutters in different soil conditions. *Journal of Civil Engineering and Management, 25*(6), 560-573.

[5] Zhang, X., & Chen, Z. (2020). Optimization of cutting parameters for drum cutters based on experimental and numerical analysis. *International Journal of Mining Science and Technology, 30*(4), 623-630.

[6] Trịnh, V. H., & Trần, H. L. (2021). Working area of dredging drum cutter attached on excavator with two-piece boom. *Journal of Marine Science and Technology*, 327-331.

[7] Liu, J., Ma, C., Zeng, Q. and Gao, K. (2018). Discrete element simulation of conical pick's coal cutting process under different cutting parameters. *Shock and Vibration*.

[8] Zhang, Q., Han, Z., Zhang, M. and Zhang, J. (2017). New model for predicting instantaneous cutting rate of axial-type roadheaders. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, pp.168-177.

[9] Goktan R M, Gunes N. (2005). A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 105: 257-264.

[10] Kui-Dong, G., Chang-Long, D. and Hong-Xiang, J. (2013). Drum Cutting Specific Energy Consumption Model Built by Cutting Curves Analysis. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 11(7), pp.4122-4128.

[11] Xie, C., Chen, M., Wang, L., Agee, C., Yao, S., Zheng, J., Liu, J., Xie, J., Ou, W., Xiao, J. and Chen, W. (2022). A study on the performance modeling method for a deep-sea cobalt-rich crust mining vehicle. *Minerals*, 12(12), p.1521.

Study on the influence of cutting speed and environmental properties on cutting resistance factors in the operation of drum cutters mounted on single-bucket excavators

Abstract: *The paper presents the relationship between the motion speed of a drum cutter and the resistance forces, moments acting on the drum cutter attached to an excavator. The research focuses on developing a mathematical model to assess the impact of changes in drum cutter speed on the magnitude and distribution of the resistance forces and moments during operation. Additionally, the study examines the influence of environmental characteristics, particularly the unconfined compressive strength (UCS) of the material, on these resistance components. The results indicate that variations in drum cutter speed lead to significant changes in the distribution and magnitude of the resistance forces and moments, with similar variations observed under different environmental conditions. These findings provide a critical basis for identifying operating regions with minimal resistance forces, thereby enhancing the efficiency and durability of drum cutter under various cutting conditions.*

Keywords: Cutting forces; cutting speed; drum cutter; unconfined compressive strength

❑

Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số điều khiển đến đặc tính làm việc của hệ thống thủy lực dẫn động cơ cấu bơi trên xe thiết giáp chở quân

Nguyễn Tiến Vĩ[1*], Nguyễn Duy Đạt[1], Lê Quang Đạt[1]
[1]Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự
[*]Email: tienvinguyen2610@gmail.com

Tóm tắt

Xe thiết giáp chở quân bánh lốp là phương tiện tác chiến hiện đại, có khả năng vận hành trên cạn và trong môi trường nước. Trong đó, hệ thống truyền động thủy lực mạch kín được lựa chọn để dẫn động cơ cấu bơi khi phương tiện vượt chướng ngại nước. Quá trình nghiên cứu, thiết kế hệ thống truyền động thủy lực mạch kín dẫn động cơ cấu bơi giúp ta làm chủ về công nghệ thiết kế, chế tạo đáp ứng tốt yêu cầu nhiệm vụ trong tình hình mới. Bài báo tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số điều khiển đến đặc tính làm việc của hệ thống truyền động thủy lực dẫn động cơ cấu bơi của xe thiết giáp chở quân. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở lý thuyết và thực nghiệm quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa các hệ thống truyền động thủy lực trên xe, nhằm đáp ứng tốt hơn các yêu cầu kỹ chiến thuật về tính cơ động và sức sống cao trong môi trường tác chiến khắc nghiệt.

Từ khóa: *xe thiết giáp chở quân, truyền động thủy lực, cơ cấu bơi.*

1. Mở đầu

Hệ thống thủy lực dẫn động cơ cấu bơi trên xe thiết giáp chở quân đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì khả năng vận hành linh hoạt và ổn định của phương tiện khi chuyển động bơi trong môi trường nước. Hệ thống thủy lực mạch kín được xây dựng, tính toán và thiết kế nhằm đáp ứng được các yêu cầu chiến-kỹ thuật của trang bị. Hệ thống truyền động thủy lực này dựa vào năng lượng thủy lực, được tạo ra từ bơm kép thủy lực pít-tông hướng trục có điều khiển, để chuyển hóa thành chuyển động quay và tuyến tính, dẫn động cơ cấu bơi giúp xe có thể hoạt động hiệu quả khi vượt chướng ngại sông, nước.

Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo, các thông số điều khiển chính ảnh hưởng đến hiệu quả của hệ thống thủy lực dẫn động bơi của phương tiện đề cập đến như sau:

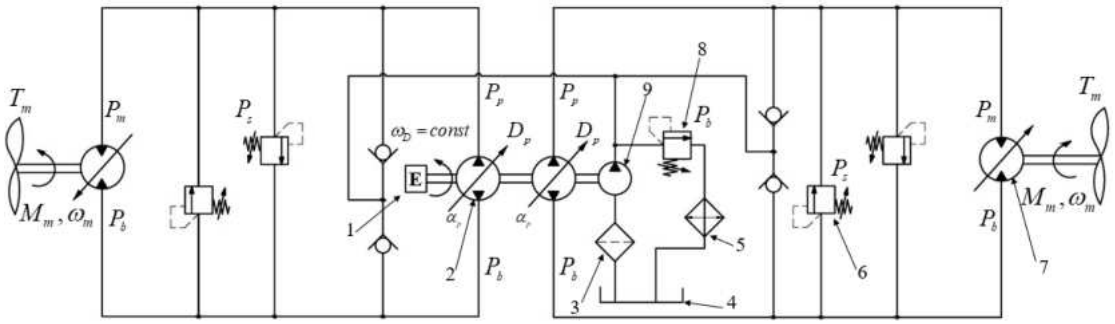
- Áp suất làm việc: Áp suất bơm chính, nguồn cung cấp mô-men cho cơ cấu bơi, làm ảnh hưởng trực tiếp đến lực đẩy và hiệu quả vận hành.

- Lưu lượng dầu: Điều chỉnh tốc độ quay của mô-tơ thủy lực, qua đó ảnh hưởng đến tốc độ bơi và sự ổn định.

Nghiên cứu này đi sâu vào phân tích tác động của các thông số trên thông qua phương pháp lý thuyết và mô phỏng trên phần mềm, từ đó cung cấp cơ sở để đối sánh với kết quả thực nghiệm sau này, đồng thời đưa ra các khuyến nghị cụ thể nhằm tối ưu hóa thiết kế, nâng cao hiệu suất và đảm bảo an toàn khi vận hành trong thực tế.

2. Cơ sở lý thuyết và mô hình tính động lực học hệ thống thủy lực dẫn động cơ cấu bơi trên xe thiết giáp chở quân

Theo [1], nhóm tác giả đã lựa chọn hệ thống dẫn động thủy lực mạch kín dựa trên khảo sát, phân tích ưu điểm, nhược điểm bằng lý thuyết và thực nghiệm trên phương tiện đang được thiết kế, chế tạo.



Hình 1. Hệ thống thủy lực mạch kín dẫn động cơ cấu bơi trên xe thiết giáp chở quân bánh lốp
1. Động cơ; 2. Cụm bơm kép; 3. Bầu lọc; 4. Thùng dầu; 5. Két làm mát; 6. Van điều chỉnh áp suất; 7. Mô-tơ dẫn động cơ cấu bơi; 8. Van an toàn; 9. Bơm nhồi

Trong mô hình trên, bơm kép thủy lực có điều chỉnh số 2 được cung cấp mô-men từ động cơ đốt trong với tốc độ quay ω_D -không đổi, cung cấp dầu có áp suất cho 02 mô-tơ thủy lực dẫn động độc lập 02 cơ cấu bơi; tải ngoài (T_m) đặt vào trục mô-tơ là mô-men cản do cơ cấu bơi tạo ra; van điều chỉnh áp suất số 6 có tác dụng thay đổi áp suất và lưu lượng phù hợp với tải ngoài khi thay đổi. Việc điều chỉnh góc nghiêng α_p của bơm dẫn đến sự thay đổi tốc độ của mô-tơ thủy lực.

* Một số giả thiết để thiết lập mô hình tính toán như sau:

- Bỏ qua quán tính của dầu công tác;
- Các giá trị độ nhớt và mô đun đàn hồi không thay đổi trong quá trình làm việc, không xét đến ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ;
- Các lực thủy động tác dụng lên các con trượt điều khiển được coi là nhỏ, có thể bỏ qua.

* Từ mô hình đưa ra, ta có một số công thức tính toán sau:

Lưu lượng cần thiết trong hệ thống là:

$$Q_s = 2Q_m + Q_{lp} + Q_{cp} \tag{1}$$

Với: $Q_s = \alpha_p \omega_p D_{p\max}$, $\alpha_p = \dfrac{D_p}{D_{p\max}}$, $Q_m = \dfrac{P_p - P_m}{R_{vim}}$, $Q_{lp} = \dfrac{P_p + P_b}{R_{lp}}$ (2)

Q_m - Lưu lượng đầu vào của mô-tơ (l/phút); Q_{lp} - Lưu lượng bơm chính (l/phút); Q_{cp} - Lưu lượng do tổn thất thể tích trong khoang bơm (l/phút); α_p - góc của đĩa nghiêng (rad); $D_p, D_{p\max}$ - Độ điều chỉnh lưu lượng bơm; R_{vim}, R_{lp} - Hệ số cản thủy lực của mô-tơ và hệ số cản nhớt.

Lưu lượng cung cấp cho một mô-tơ: $Q_m = Q_{m0} + Q_{lm} + Q_{cm}$ (3)

Trong đó: $Q_{m0} = \omega_m D_m$ và $Q_{lm} = \dfrac{P_m + P_b}{R_{lm}}$; Q_{m0} - Lưu lượng đầu ra của mô-tơ(l/phút); Q_{lm} - Lưu lượng rò rỉ của mô-tơ(l/phút); Q_{cm} - Lưu lượng tổn thất trong khoang mô-tơ (l/phút).

Áp suất đầu ra của bơm và áp suất đầu vào tương ứng với mô-tơ thủy lực được đưa ra bởi công thức sau:

$$\begin{aligned} P_p &= K_p \int Q_{cp} dt \\ P_m &= K_m \int Q_{cm} dt \end{aligned} \tag{4}$$

Trong đó: K_p, K_m lần lượt là các hệ số hiệu quả của dầu trong bơm và mô-tơ

Tổng mô-men tạo ra trên trục mô-tơ thủy lực là:

$$T = 2(P_p - P_m).D_m.G_i.\eta \quad (5)$$

Trong đó: D_m – Lưu lượng riêng của mô-tơ; G_i- tỷ số truyền từ mô-tơ đến trục quay cơ cấu bơi; η -Hiệu suất cơ khí , η =0,98.

3. Mô hình mô phỏng và kết quả nghiên cứu

3.1. Mô hình mô phỏng hệ thống trên phần mềm LMS Amesim

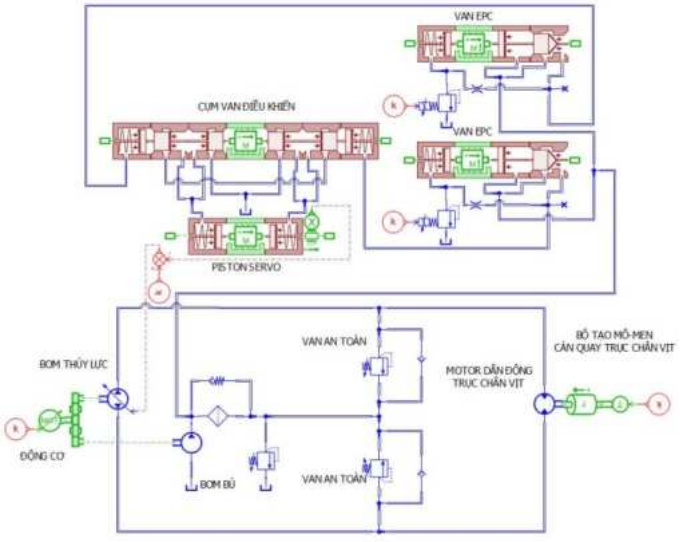
Amesim (Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems) là phần mềm mô phỏng hệ thống tích hợp mạnh mẽ, được phát triển bởi Siemens. Nó hỗ trợ các kỹ sư thiết kế, mô phỏng và tối ưu hóa hiệu suất của các hệ thống cơ khí, thủy lực, nhiệt động lực học, và điện. Amesim cung cấp môi trường trực quan với thư viện phong phú gồm các mô hình sẵn có, giúp rút ngắn thời gian phát triển sản phẩm.

Bên cạnh đó, phần mềm này cho phép các kỹ sư phân tích và dự đoán hiệu suất của hệ thống ngay từ giai đoạn đầu của quy trình thiết kế, giúp tiết kiệm thời gian và chi phí phát triển sản phẩm. Amesim được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp như ô tô, hàng không vũ trụ, năng lượng, và sản xuất công nghiệp, nhờ khả năng hỗ trợ phân tích sâu và cải thiện độ tin cậy của sản phẩm. Hơn nữa, tính tích hợp linh hoạt với các công cụ CAD/CAE khác giúp Amesim trở thành một giải pháp toàn diện, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của ngành công nghiệp 4.0.

Trên cơ sở nghiên cứu, xây dựng mô hình mô phỏng bằng phần mềm LMS Amesim, và theo [2], nhóm tác giả đã xây dựng được mô hình mô phỏng hệ thống thủy lực dẫn động bơi trên xe thiết giáp chở quân với một số thông số như bảng sau:

Bảng 1. Thông số đầu vào

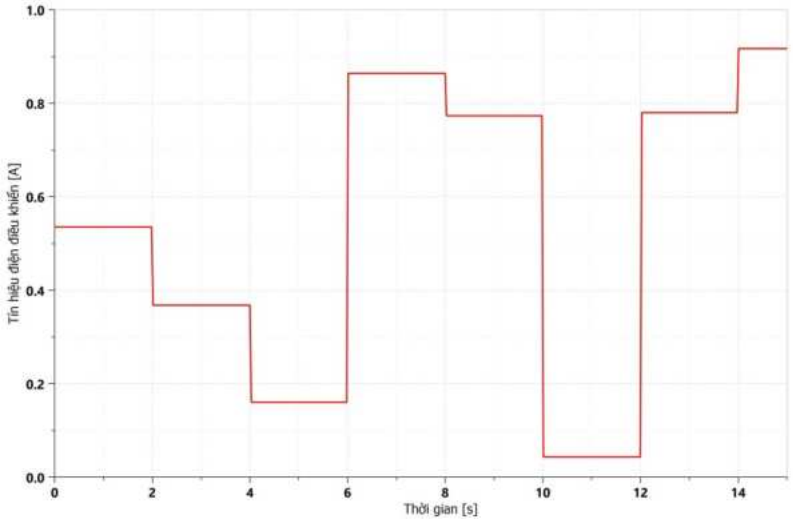
STT	Tham số	Giá trị	Đơn vị
1	Tốc độ quay trục động cơ dẫn động bơm	2200	vòng/phút
2	Thể tích riêng của bơm	90	cc/vòng
3	Thể tích riêng của mô tơ	125	cc/vòng
4	Chiều dài của đường ống dầu	4	m
5	Hệ số cản nhớt động học	0,02	Nm/(vòng/phút)



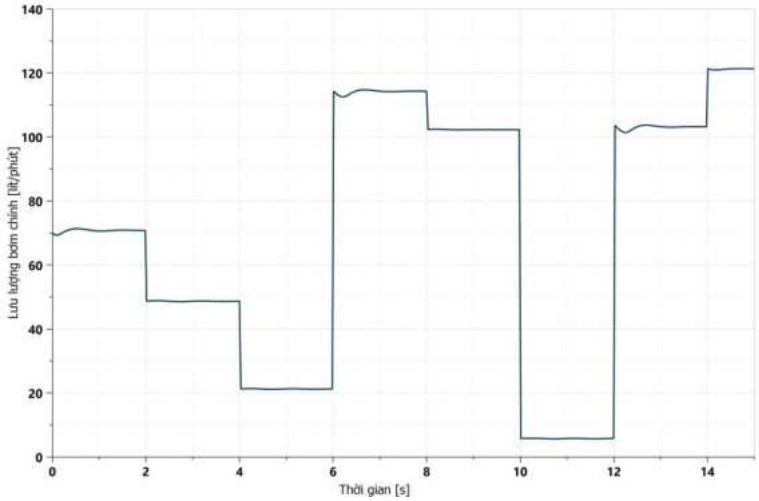
Hình 2. Mô hình mô phỏng hệ thống thủy lực mạch kín dẫn động cơ cấu bơi trên xe thiết giáp chở quân

3.2. Kết quả nghiên cứu

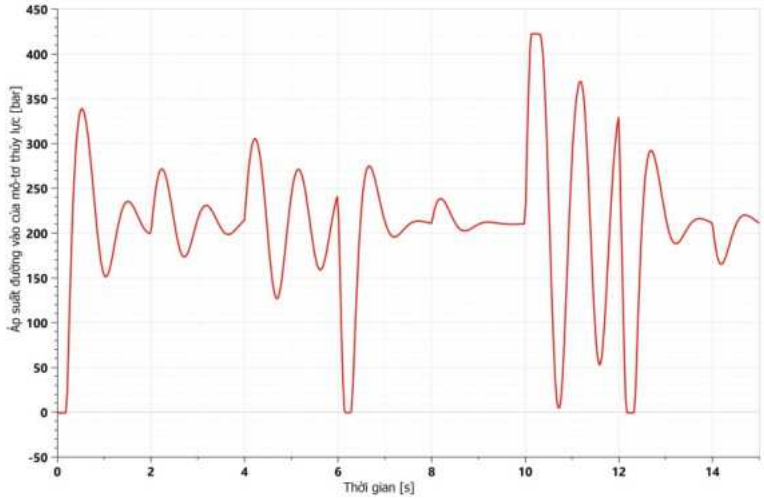
Ảnh hưởng của sự thay đổi các thông số điều khiển được thể hiện trong các biểu đồ về áp suất, lưu lượng của bơm chính và tốc độ quay trục ra của mô-tơ.



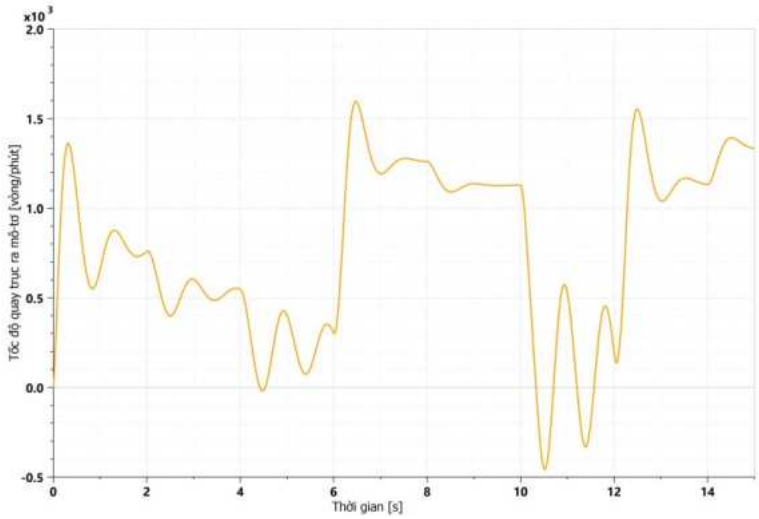
Hình 3. Tín hiệu điều khiển tương ứng với điều kiện của tải trong quá trình vận hành.



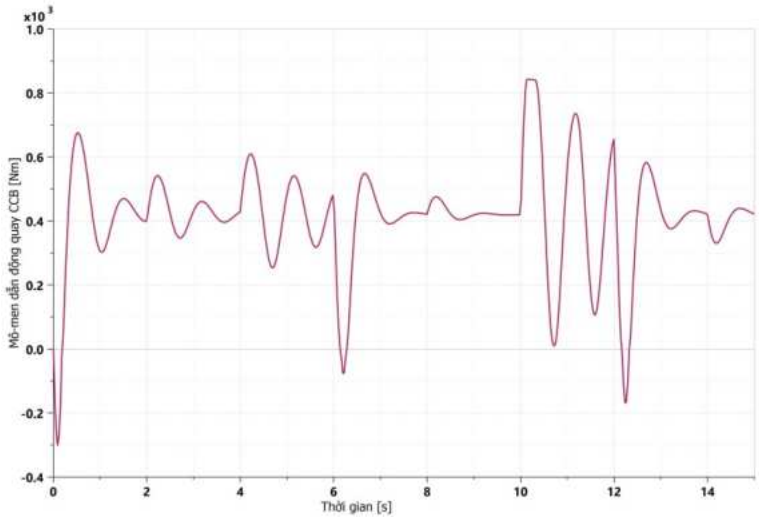
Hình 4. Lưu lượng bơm chính tương ứng với tín hiệu điều khiển chế độ làm việc



Hình 5. Áp suất đường vào mô-tơ tương ứng



Hình 6. Tốc độ trục quay mô-tơ



Hình 7. Mô-men dẫn động CCB

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc điều chỉnh hợp lý các thông số như áp suất, lưu lượng và tốc độ quay của trục bơm sẽ cải thiện đáng kể hiệu suất và độ bền của hệ thống thủy lực dẫn động cơ cấu bơi. Kết quả này mở ra hướng nghiên cứu sâu hơn về việc tối ưu hóa thiết kế, tính toán hệ thống, đặc biệt là sử dụng công nghệ mới nhằm nâng cao hiệu quả vận hành của trang thiết bị và giảm tác động đến môi trường.

Tài liệu tham khảo

[1] Nguyễn Tiến Vĩ, Nguyễn Duy Đạt, Đặng Đình Vũ, Nguyễn Viết Tân, Nguyễn Minh Châu (2024), *Nghiên cứu động lực học hệ thống thủy lực dẫn động cơ cấu bơi chân vịt trên xe thiết giáp chở quân bánh lốp 8x8*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam.

[2] Nguyễn Viết Tân, Lê Quang Đạt, Nguyễn Duy Đạt, Nguyễn Tiến Vĩ (2023), *Nghiên cứu tính toán hệ thống thủy lực dẫn động cơ cấu bơi cho xe thiết giáp chở quân*, Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ Học viện Kỹ thuật Quân sự lần thứ XVIII.

[3] N. Popov, *Động lực học và điều khiển hệ thống dẫn động thủy lực*, 1987.

[4] Nguyễn Viết Tân, *Xe máy vượt sông*, NXB Quân đội nhân dân, 2011.

[5] Alok Vardhan, Kaustubh Dasgupta, Santosh Mishra (2018), *Dynamic analysis of a closed-circuit hydraulic drive system used in the rotary head of blasthole drilling machine using MATLAB–Simulink environment*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering.

Study on the effects of control parameters on the operational characteristics of the hydraulic system driving the amphibious mechanism in armored personnel carriers

Abstract: *Wheeled Armored Personnel Carriers (APCs) are modern combat vehicles capable of operating effectively on both land and water. A closed-loop hydraulic transmission system is specifically employed to drive the swimming mechanism, enabling the vehicle to overcome water obstacles efficiently. The research and development of the closed-loop hydraulic transmission system for the swimming mechanism play a vital role in mastering the design and manufacturing technologies, ensuring they meet the mission requirements of the modern battlefield. This paper investigates the impact of specific control parameters on the operational characteristics of the hydraulic transmission system that drives the swimming mechanism of wheeled armored personnel carriers. The findings provide an essential theoretical and experimental foundation for designing and optimizing hydraulic transmission systems in vehicles, addressing the technical and tactical requirements for enhanced mobility and survivability in extreme combat environments.*

Keywords: Armored personnel carriers (APCs); hydraulic drive system; swimming mechanism.

❑

Nghiên cứu động lực học của máy đầm cóc

Nguyễn Quý Tằng[1] , Lê Trọng Tuấn [2]

[1]Hệ quản lý học viên sau Đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: Nguyenquytang1995@gmail.com

[2]Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[*]Email: tuanlt@lqdtu.edu.vn

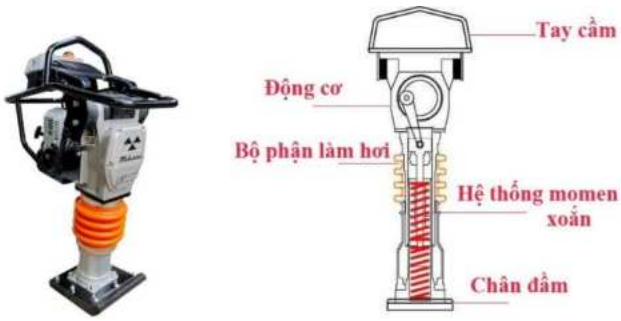
Tóm tắt

Bài báo từng nghiên cứu trạng thái động lực học của máy đầm cóc, trong đó tác giả xây dựng mô hình cơ học và mô hình toán học nhằm phân tích sự tương tác giữa máy đầm và nền đất. Nghiên cứu áp dụng mô hình nền đất theo phương pháp của giáo sư Gheorghe Oproescu, kết hợp với việc xây dựng thuật toán giải quyết trong MATLAB - Simulink. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng các tham số động lực học dao động xung quanh vị trí cân bằng và đối xứng. Kết quả này cung cấp cơ sở khoa học để lựa chọn và tối ưu hoá tham số vận hành của máy đầm cóc.

Từ khóa: *Máy đầm cóc; nền đất; tấm rung; hệ số nén đất.*

1. Đặt vấn đề

Máy đầm cóc là thiết bị chính trong các công trình xây dựng, giao thông, với khả năng đầm nén các loại đất dính và bán dính. Nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng tính động lực học của máy đầm có ảnh hưởng lớn đến hiệu quả nén.



Hình 1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của máy đầm cóc

Theo Morariu - Gligor (2022), sự đối xứng và biên độ dao động của chân đầm quyết định chiều sâu đầm nén. Điều này được bổ sung bởi nghiên cứu của Игнатьев (2012), nhấn mạnh vào đặc tính đàn hồi và hấp thụ dao động trong mô hình đất nén.

Trên cơ sở các nghiên cứu trước, mục tiêu chính của bài báo là xây dựng mô hình động lực học cho máy đầm cóc, xác định các yếu tố ảnh hưởng và phân tích các biến thiên tham số động lực học trong quá trình làm việc.

2. Xây dựng mô hình

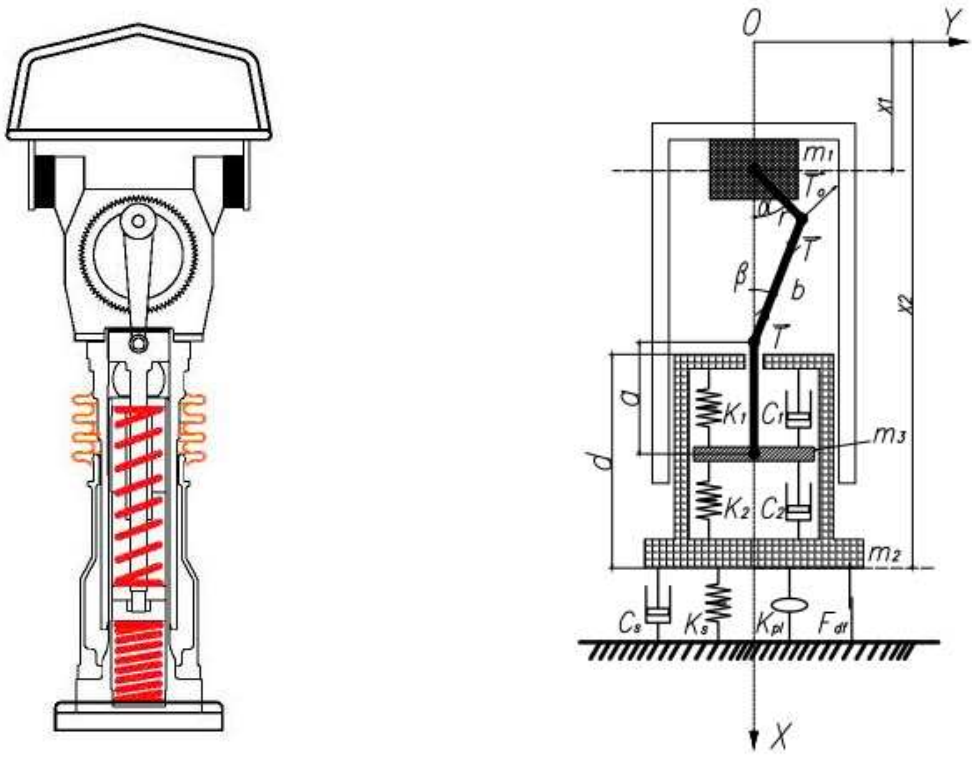
Đầm lèn nền đất chiếm tỉ trọng lớn trong thi công các công trình dân dụng cũng như các vị trí hẹp. Như đã đề cập, mô hình hóa nền đất đắp theo giáo sư Gheorghe Oproescu được sử dụng. Đặc trưng của đất có thể xem gồm các thành phần lực đàn hồi, lực cản nhớt, lực biến dạng dẻo và lực cản ma sát khô trong đất.

Một số giả thiết của mô hình nghiên cứu:

- Chỉ xét bài toán phẳng;
- Giả thiết tổng khối lượng của khung máy, động cơ và hộp giảm tốc là m_1;

- Giả thiết tổng khối lượng của piston, thanh truyền và các lò xo là m_3;
- Giả thiết tổng khối lượng của tấm đầm và xi lanh là m_2;
- Các khối lượng tập trung chỉ xét dao động theo phương thẳng đứng;
- Tất cả các bộ phận, trừ các lò xo, đều cứng;
- Động cơ truyền động và các bộ phận liên kết được mô hình hóa như một đĩa quay;
- Mômen quán tính I và mômen truyền động M là không đổi;
- Các hằng số đàn hồi và hệ số giảm chấn là tuyến tính.

Kết hợp với mô hình máy đầm cóc gồm khung máy, động cơ, hộp giảm tốc, piston, thanh truyền, các lò xo, các xi lanh và tấm đầm như đã nêu ở trên, mô hình nghiên cứu động lực học máy đầm cóc trên nền đất được xây dựng hình 2.



a) Mô hình mô tả máy đầm cóc *b) Mô hình động lực học máy đầm cóc*

Hình 2. Mô hình máy đầm cóc

Máy đầm nén được trình bày trong Hình 2b bao gồm ba bộ phận chính:

+ Tổng khối lượng của khung máy, động cơ và hộp giảm tốc là m_1;

+ Tổng khối lượng của tấm đầm và xi lanh là m_2;

+ Tổng khối lượng của piston, thanh truyền và các lò xo là m_3;

Chuyển động của các khối lượng m_1, m_2, m_3 được đo bằng các tọa độ x_1, x_2, $x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a$ và chỉ có các chuyển động đầm nén theo phương thẳng đứng được giả định. Điều này có nghĩa là góc bàn đầm 12^o độ, giúp máy đầm di chuyển về phía trước trong quá trình vận hành thực tế, được bỏ qua.

Hệ cơ học được mô tả trong hình 2 là hệ có ba bậc tự do, trong đó các phần tử thực hiện chuyển động theo phương thẳng đứng, các tham số hình học xác định chuyển động của hệ thống là x_1 - dịch chuyển của khung, và x_2 - dịch chuyển của tấm đầm, và góc quay $\propto$. Tay quay quay với vận tốc góc không đổi theo chiều dương hệ trục tọa độ, tác dụng lên nó với mô men xoắn không đổi M . Mô men xoắn M được thay thế bằng mô men xoắn sinh ra bởi lực T_0 tác dụng lên đầu tay quay (Hình 2).

Xét các khía cạnh được trình bày ở trên, các mối quan hệ sau có thể được xác định:

$$\alpha = \omega t;$$

$$\frac{b}{\sin\alpha} = \frac{r}{\sin\beta};\ \sin\beta = \frac{r}{b}.\sin\alpha;\ \beta = \arcsin\left(\frac{r}{b}.\sin\alpha\right);$$

$$\dot{\beta} = \frac{\frac{r}{b}.\omega.\cos\alpha}{\sqrt{1-\frac{r^2}{b^2}.\sin^2\alpha}} = \frac{r\omega\cos\alpha}{b\cos\beta};$$

$$\ddot{\beta} = \frac{\left(-r\omega^2.\sin\alpha\right)\left(b\cos\beta\right)-\left(r\omega\cos\alpha\right)\left(-b.\dot{\beta}\sin\beta\right)}{b^2.\cos^2\beta}$$

$$\ddot{\beta} = \frac{r.\omega b.\dot{\beta}.\cos\alpha.\sin\beta - r.\omega^2.b.\sin\alpha.\cos\beta}{b^2.\cos^2\beta};$$

$$\ddot{\beta} = \frac{b.\dot{\beta}^2.\sin\beta - r.\omega^2.\sin\alpha}{b.\cos\beta};$$

$$x_3 = x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a$$

Áp dụng định luật Newton dẫn đến các phương trình vi phân sau đây xác định chuyển động của các khối lượng m_1, m_2 và m_3:

+) Chuyển động của vật m_1:

$$m_1.\ddot{x}_1 = m_1.g - T_o.\sin\alpha + T.\cos\beta \Leftrightarrow T.\cos\beta = m_1.\ddot{x}_1 - m_1.g + T_o.\sin\alpha; \qquad (1)$$

+) Chuyển động của vật m_3:

$$m_3.\frac{d^2}{dt}(x_3) = m_3.g - T.\cos\beta + k_1.\Delta l_{01} + c_1.\Delta\dot{l}_{01} + k_2.\Delta l_{02} + c_2.\Delta\dot{l}_{02}$$

Trong đó:

$$\Delta l_{01} = l_{01} - l_1 = l_{01} - (d - l_2) = l_{01} - (d - x_2 + x_3) = l_{01} - (d - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a)$$

$$\Delta\dot{l}_{01} = \dot{x}_2 - \dot{x}_1 + r.\omega.\sin\alpha + b.\dot{\beta}.\sin\beta$$

$$\Delta l_{02} = l_{02} - l_2 = l_{02} - x_2 + x_3 = l_{02} - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a$$

$$\Delta\dot{l}_{02} = -\dot{x}_2 + \dot{x}_1 - r.\omega.\sin\alpha - b.\dot{\beta}.\sin\beta$$

$\Delta l_{01}, \Delta l_{02}$: biến dạng của là xo 1, 2

l_{01}, l_{02} : chiều dài tự nhiên của lò xo 1, 2

l_1, l_2 : chiều dài của lò xo 1, 2 tại thời điểm khảo sát

Suy ra:

$$m_3.\frac{d^2}{dt}(x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a) = m_3.g - T.\cos\beta + k_1.\Delta l_{01} + c_1.\Delta\dot{l}_{01} + k_2.\Delta l_{02} + c_2.\Delta\dot{l}_{02}$$

$$\Leftrightarrow m_3.\frac{d^2}{dt}(x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a) = m_3.g - T.\cos\beta + k_1\left[l_{01} - (d - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a)\right] \quad (2)$$
$$+c_1\left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 + r.\omega.\sin\alpha + b.\dot{\beta}.\sin\beta\right) + k_2\left(l_{02} - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a\right)$$
$$+c_2\left(-\dot{x}_2 + \dot{x}_1 - r.\omega.\sin\alpha - b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)$$

+) Chuyển động của vật m_2 :

$$m_2.\ddot{x}_2 = m_2.g - k_2.\Delta l_{02} - c_2.\Delta\dot{l}_{02} - k_1.\Delta l_{01} - c_1.\Delta\dot{l}_{01} - \begin{cases} 0 \ neu \ x_2 \le r + b + l_2 + a \\ F_{soil} \ neu \ x_2 > r + b + l_2 + a \end{cases}$$

Trong đó: $F_{soil} = \left(k_s + k_{pl}\right)\left(x_2 - r - b - l_{02} - a\right) + c_s.\dot{x}_2 + F_{df}^o$

$$\Rightarrow m_2.\ddot{x}_2 = m_2.g - k_2\left(l_{02} - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a\right)$$
$$-c_2\left(-\dot{x}_2 + \dot{x}_1 - r.\omega.\sin\alpha - b.\dot{\beta}.\sin\beta\right) - k_1\left[l_{01} - (d - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a)\right] \quad (3)$$
$$-c_1.\left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 + r.\omega.\sin\alpha + b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)$$
$$-\begin{cases} 0 \ neu \ x_2 \le r + b + l_2 + a \\ \left(k_s + k_{pl}\right)\left(x_2 - r - b - l_{02} - a\right) + c_s.\dot{x}_2 + F_{df}^o \ neu \ x_2 > r + b + l_2 + a \end{cases}$$

Trong phương trình (3), người ta cho rằng khối lượng m_2 không tiếp xúc thường xuyên với đất.

Biểu thức vi phân sau đây có thể được rút ra:

$$\frac{d^2}{dt^2}(x_1 + r.\cos\alpha + b.\cos\beta + a) = \frac{d}{dt}(\dot{x}_1 - \omega r\sin\alpha - b\dot{\beta}\sin\beta) = \ddot{x}_1 - \omega^2 r\cos\alpha - b\ddot{\beta}\sin\beta - b\dot{\beta}^2\cos\beta \quad (4)$$

Do đó, phương trình (2) trở thành:

$$m_3\ddot{x}_1 - m_3\omega^2 r\cos\alpha - m_3 b\ddot{\beta}\sin\beta - m_3 b\dot{\beta}^2\cos\beta = m_3.g - T.\cos\beta$$
$$+k_1\left[l_{01} - (d - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a)\right] + c_1\left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 + r.\omega.\sin\alpha + b.\dot{\beta}.\sin\beta\right) \quad (5)$$
$$+k_2\left(l_{02} - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a\right) + c_2\left(-\dot{x}_2 + \dot{x}_1 - r.\omega.\sin\alpha - b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)$$

Đại lượng chưa biết được ký hiệu bởi T từ (1) được thay thế trong phương trình (5), dẫn đến:

$$m_3\ddot{x}_1 - m_3\omega^2 r\cos\alpha - m_3 b\ddot{\beta}\sin\beta - m_3 b\dot{\beta}^2\cos\beta = m_3.g - m_1\ddot{x}_1 + m_1 g - T_o\sin\alpha$$
$$+k_1\left[l_{01} - (d - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a)\right] + c_1\left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 + r.\omega.\sin\alpha + b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)$$
$$+k_2\left(l_{02} - x_2 + x_1 + r\cos\alpha + b\cos\beta + a\right) + c_2\left(-\dot{x}_2 + \dot{x}_1 - r.\omega.\sin\alpha - b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)$$

Tương đương:

$$\begin{aligned}&\left(m_1+m_3\right)\ddot{x}_1=\left(m_1+m_3\right)g-T_o\sin\alpha+k_1\left[l_{01}-(d-x_2+x_1+r\cos\alpha+b\cos\beta+a)\right]\\&+c_1\left(\dot{x}_2-\dot{x}_1+r.\omega.\sin\alpha+b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)+k_2\left(l_{02}-x_2+x_1+r\cos\alpha+b\cos\beta+a\right)\\&+c_2\left(-\dot{x}_2+\dot{x}_1-r.\omega.\sin\alpha-b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)+m_3\left(\omega^2r\cos\alpha+b\ddot{\beta}\sin\beta+b\dot{\beta}^2\cos\beta\right)\end{aligned}\qquad(6)$$

Từ (6) và (3) hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của tấm đầm và khung tương ứng, bao gồm hai phương trình vi phân:

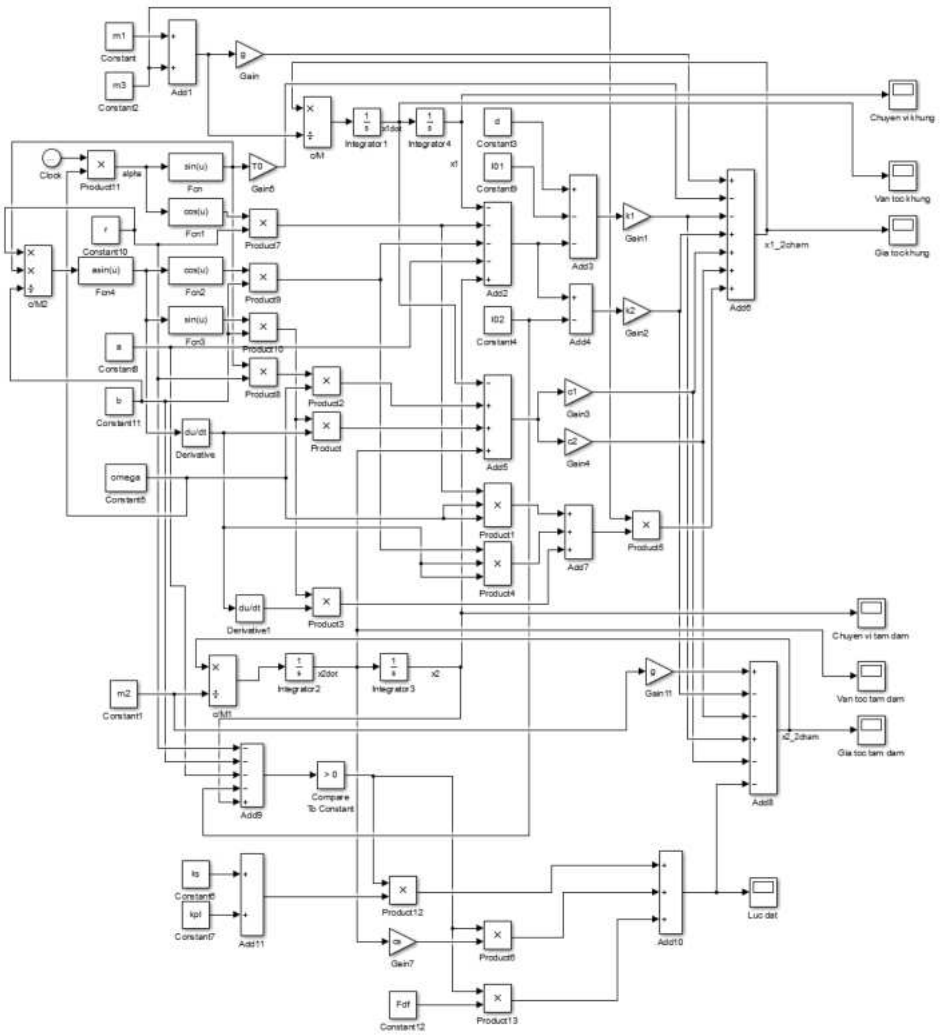
Phương trình 1:

$$\begin{aligned}&\left(m_1+m_3\right)\ddot{x}_1=\left(m_1+m_3\right)g-T_o\sin\alpha+k_1\left[l_{01}-(d-x_2+x_1+r\cos\alpha+b\cos\beta+a)\right]\\&+c_1\left(\dot{x}_2-\dot{x}_1+r.\omega.\sin\alpha+b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)+k_2\left(l_{02}-x_2+x_1+r\cos\alpha+b\cos\beta+a\right)\\&+c_2\left(-\dot{x}_2+\dot{x}_1-r.\omega.\sin\alpha-b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)+m_3\left(\omega^2r\cos\alpha+b\ddot{\beta}\sin\beta+b\dot{\beta}^2\cos\beta\right)\end{aligned}$$

Phương trình 2:

$$\begin{aligned}&\Rightarrow m_2.\ddot{x}_2=m_2.g-k_2\left(l_{02}-x_2+x_1+r\cos\alpha+b\cos\beta+a\right)\\&-c_2\left(-\dot{x}_2+\dot{x}_1-r.\omega.\sin\alpha-b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)-k_1\left[l_{01}-(d-x_2+x_1+r\cos\alpha+b\cos\beta+a)\right]\\&-c_1.\left(\dot{x}_2-\dot{x}_1+r.\omega.\sin\alpha+b.\dot{\beta}.\sin\beta\right)\\&-\begin{cases}0\ \ neu\ \ x_2\le r+b+l_2+a\\\left(k_s+k_{pl}\right)\left(x_2-r-b-l_{02}-a\right)+c_s.\dot{x}_2+F_{df}^o\ \ neu\ \ x_2>r+b+l_2+a\end{cases}\end{aligned}$$

Sơ đồ khối giải phương trình trong ứng dụng MatLab Simulink được thể hiện trên hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối giải hệ phương trình trên Matlab

3. Kết quả và thảo luận

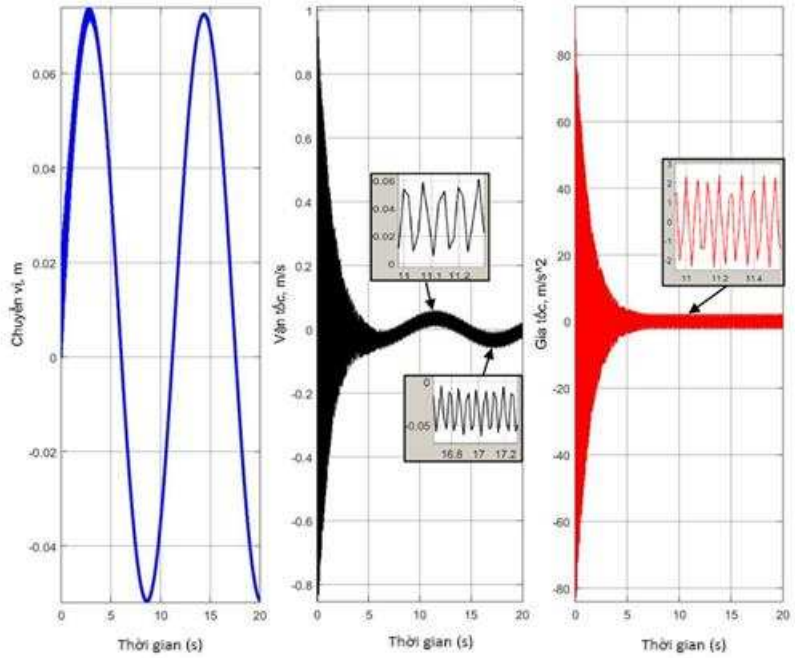
Các tham số đầu vào để khảo sát (Bảng 1) dựa trên các thông số kỹ thuật của máy đầm cóc Mikasa MT55 của Nhật Bản là loại máy phổ biến hiện nay trên thị trường và các hệ số đặc trưng của đất nén được lấy theo các tài liệu 1, 2, 3, 4.

Bảng 1. Các tham số đầu vào

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Tổng khối lượng của khung, động cơ dẫn động và bộ giảm tốc bánh răng [kg];	m_1	35
Tổng khối lượng của tấm nén và xi lanh [kg];	m_2	11
Tổng khối lượng của piston, thanh truyền và lò xo [kg];	m_3	4
Chiều dài của trục khuỷu [m];	r	0,025
Chiều dài của thanh truyền [m];	b	0,210
Chiều dài của đầu chốt cần piston tới quả piston [m];	a	0,325
Chiều dài của xylanh và độ dầy tấm đầm [m];	d	0,520

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Chiều dài của các lò xo 1 khi được lắp đặt.	l_1	0,130
Chiều dài của các lò xo 2 khi được lắp đặt.	l_2	0,130
Hằng số đàn hồi của lò xo xoắn [N/m];	k_1	35000
Hằng số đàn hồi của lò xo xoắn [N/m];	k_2	20000
Hệ số giảm chấn của bộ giảm chấn nhớt [Ns/m];	c_1	330
Hệ số giảm chấn của bộ giảm chấn nhớt [Ns/m];	c_2	300
Mô men tác dụng lên trục khuỷu [Nm];	M	15
Hệ số đàn hồi của đất [N/m]	k_s	100000
Hệ số giảm chấn của đất [Ns/m]	c_s	50
Hệ số dẻo của đất [N/m]	k_{pl}	20000
Lực ma sát khô của đất [N]	F_{df}^{o}	4000

Kết quả tính toán cho máy đầm cóc Mikasa MT55 được trình bày dưới dạng đồ thị chuyển vị, vận tốc và gia tốc chuyển động của tấm rung (Hình 4).



Hình 4. Chuyển vị, vận tốc và gia tốc chuyển động của tấm rung

Dựa vào các biểu đồ, ta thấy trong khoảng 5 giây đầu tiên khi máy đầm làm việc chưa ổn định thì vận tốc và gia tốc của tấm rung (chân đầm) có sự tăng đột biến ($v_{max} \approx 1$m/s, $a_{max} \approx 100$ m/s^2), nhưng sau đó giá trị của chúng sẽ ổn định và dao động theo chu kỳ tương đối ổn định với $v_{max} \approx 0{,}06$ m/s, $a_{max} \approx 2$ m/s^2). Đồng thời, biên độ chuyển vị của tấm rung lớn nhất

khoảng 70mm nằm trong dải biên độ nhảy 50÷80 mm của phần lớn các loại máy đầm cóc có trên thị trường hiện nay.

Theo các kết quả nghiên cứu 4, 5, 6 và trong thực tế thì năng suất và hiệu quả sử dụng của máy đầm cóc sẽ được đánh giá qua hiệu quả đầm mà cụ thể là chiều sâu đầm nén; trong đó có biên độ và gia tốc dao động của nền đất. Cụ thể, với loại máy đầm cóc Mikasa MT55 đang khảo sát có chiều sâu đầm khoảng 70mm sẽ đáp ứng tốt được với các loại đất cấp III trở xuống ở điều kiện Việt Nam.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng và phân tích mô hình động lực học của máy đầm cóc, làm rõ sự tương tác giữa máy đầm và nền đất. Kết quả cho thấy các thông số động lực học như độ dịch chuyển, vận tốc, gia tốc dao động quanh vị trí cân bằng và có tính đối xứng.

Ứng dụng MATLAB-Simulink giúp mô phỏng và đánh giá hiệu suất làm việc của máy một cách trực quan. Kết quả này cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa thiết kế và vận hành máy đầm cóc, từ đó nâng cao hiệu suất làm việc và kéo dài tuổi thọ thiết bị.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Văn Mỹ, Đoàn Việt Hải. (2010). *Nghiên cứu tương tác động giữa đất nền và kết cấu (SSI) lên cầu dây văng chịu tác động của động đất theo phương pháp phổ phản ứng*. Tạp chí KH&CN Đại học Đà Nẵng, số 4 (39).
2. Adina Veronica Crișan, Radu Mircea Morariu – Gligor. (2019). *A Study on the Impact Force inCase of Tamping Rammers*. RJAV vol 16 issue 1, pp. 78-83.
3. Игнатьев А.А. (2012). *Определение рациональных параметров вибрационных катков для уплотнения грунта*. Научно-техническая диссертация, Москва.
4. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. (1975). *Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог*. Москва, Транспорт.
5. Broman G., Jönsson A. (2000). *The nonlinear behavior of a rammer soil compaction tamping machine*. Proceeding of 14th ASCE Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas.
6. Radu Mircea Morariu-Gligor (2022). *The Study of the Dynamic Behavior for a Tamping Rammer*. Symmetry 14, 980. https://doi.org/10.3390/sym14050980.

The study of the dynamic for a tamping rammer

Abstract: *The paper presents a mechanical model and a mathematical model developed by the authors to study the dynamic behavior of tamping rammers. Initially, it discusses several aspects related to the soil compaction process in construction projects. In this study, the soil is modeled based on the approach proposed by Professor Gheorghe Oproescu. To investigate the dynamic model, a solution algorithm was developed in the MATLAB environment using Simulink. Subsequently, the study analyzes the variations in the displacement of the frame and the base, as well as changes in impact forces and system parameters, which are illustrated through graphs. The parameter variations were found to be symmetric and oscillate around the equilibrium position. The results of the study provide a scientific basis for selecting suitable tamping rammers, thereby improving their practical efficiency.*

Keywords: Tamping rammer, ground, vibrating plate, soil compaction coefficient.

❑

Nghiên cứu tính toán thiết kế hệ thống động truyền lực xe thiết giáp chở quân 8 × 8 sản xuất tại Việt Nam

Nguyễn Thanh Quang[1*], Nguyễn Minh Tân[1], Cù Xuân Phong[1]
[1]*Học viện Kỹ thuật quân sự*
Email: Nguyenthanhquang14071984@gmail.com

Tóm tắt:

Hiện nay xu hướng cải tiến hiện đại hóa, sản xuất, chế tạo mới xe thiết giáp là xu hướng tất yếu của lực lượng Tăng thiết giáp. Chủ trương của Quân đội ta là từng bước nghiên cứu thiết kế, chế tạo các dòng xe thiết giáp mới thay thế các loại xe thiết giáp thế hệ cũ nhằm đáp ứng được yêu cầu huấn luyện và sẵn sàng chiến đấu, trong đó có xe thiết giáp chở quân 8x8. Một trong những nhiệm vụ quan trọng đặt ra khi tính toán thiết kế chế tạo xe thiết giáp là tính toán, lựa chọn các cụm hệ thống động- truyền lực nhằm đáp ứng tốt các yêu cầu chiến - kỹ thuật đề ra. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày cơ sở lý thuyết và để nghiên cứu, tính toán thiết kế các cụm của hệ thống động - truyền lực cho xe thiết giáp chở quân 8 × 8 chế tạo tại Việt Nam.

Từ khóa: *Xe thiết giáp chở quân 8x8; hệ thống động truyền lực; hộp số; phân chia tỷ số truyền.*

1. Đặt vấn đề

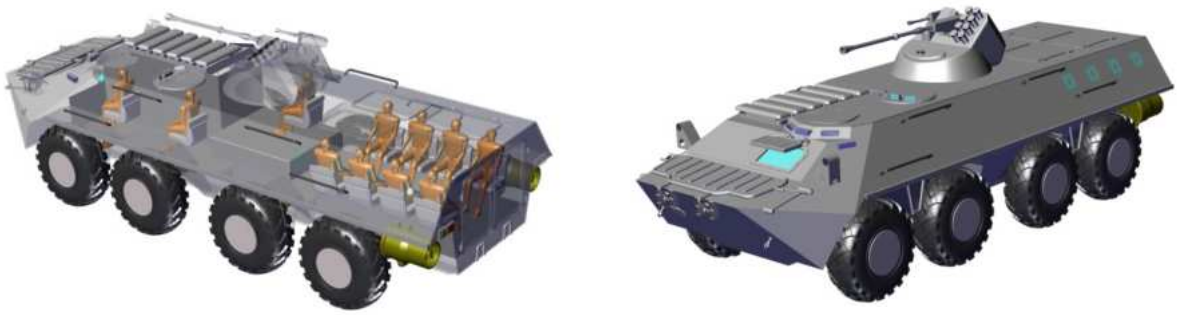
Ngày nay, hình thái chiến tranh và phương thức tác chiến tuy có nhiều thay đổi, nhưng xe chiến đấu bọc thép bánh lốp vẫn là loại trang bị chủ lực không thể thay thế trong trang bị lục quân các quốc gia trên thế giới. Các xe chiến đấu bọc thép ngày càng được các nước chú trọng nâng cấp, hiện đại hóa theo xu hướng tạo ra những chiếc xe thiết giáp: được trang bị vũ khí hiện đại, có tính đa nhiệm (trinh sát tuần tiễu, chiến đấu, chở thương binh, cứu hộ...), khả năng cơ động tốt trên mọi địa hình (sa mạc, rừng núi, sông hồ...) và được trang bị lớp vỏ giáp thế hệ mới đảm bảo khả năng chống đạn tốt [1].

Xe thiết giáp chở quân của Quân đội ta phần lớn là do Nga viện trợ hoặc xe chiến lợi phẩm của Mỹ và đều được sản xuất từ những năm 1960 trở về trước. Do nhiều nguyên nhân khác nhau mà tình trạng kỹ thuật của các dòng xe này đã bị suy giảm đáng kể, rất nhiều cụm hệ thống trên xe hư hỏng không thể phục hồi hoặc đã hết kích thước sửa chữa, khó có khả năng đáp ứng các yêu cầu của chiến tranh hiện đại [2].

Với công nghệ hiện tại của nước ta, xu thế cải tạo các xe thiết giáp phù hợp với điều kiện tình hình mới đang là hướng đi đúng trong giai đoạn hiện nay. Một số xe thiết giáp trong biên chế có khung và vỏ giáp vẫn đảm bảo đáp ứng tốt nhiệm vụ huấn luyện và sẵn sàng chiến đấu nên việc tận dụng lại các bộ khung vỏ này sẽ tiết kiệm rất nhiều về kinh phí chế tạo và để tập trung cải thiện những tính năng cơ động, bảo vệ và khả năng hỏa lực. Tuy nhiên việc nghiên cứu, chế tạo một dòng xe thiết giáp mới đủ khả năng tác chiến với tính đa nhiệm cao cùng những tính năng hiện đại là điều tất yếu chúng ta phải hướng tới [2].

Chủ trương của Quân đội ta là từng bước nghiên cứu thiết kế, chế tạo các dòng xe thiết giáp mới để thay thế các loại xe thiết giáp thế hệ cũ nhằm đáp ứng tốt yêu cầu huấn luyện và sẵn sàng chiến đấu. Với dòng xe thiết giáp bánh lốp 4x4 về cơ bản chúng ta đã làm chủ công nghệ thiết kế chế tạo, lắp ráp. Thời gian tới, chúng ta sẽ tập trung nghiên cứu thiết kế, chế tạo xe thiết giáp chở quân chiến đấu 8x8. Xe thiết giáp chở quân chiến đấu 8x8 có nhiều ưu điểm

nổi bật như khả năng bảo vệ, khả năng cơ động trên các địa hình phức tạp, tính năng thông qua cao, tải trọng chuyên chở lớn, có thể thực hiện nhiều nhiệm vụ đặc thù. Để hoàn thành nhiệm vụ chế tạo dòng xe này cần triển khai rất nhiều nội dung công việc, trong đó nhiệm vụ trước hết là nghiên cứu tính toán, lựa chọn các cụm hệ thống động truyền lực cho xe để đáp ứng yêu cầu tính năng kỹ thuật đề ra [1]. Một số chỉ tiêu về kỹ thuật cơ bản của xe được cho trong bảng 1.



Hình 1. Phương án thiết kế mới dòng xe chiến đấu chở quân 8x8 tại Việt Nam

Bảng 1. Chỉ tiêu kỹ thuật cơ bản

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
1	Công thức bánh xe		8×8
2	Khối lượng xe chiến đấu	Tấn	≤ 16,0
3	Khối lượng xe không tải	Tấn	≤ 15,0
4	Chiều dài tổng thể	mm	7.580 ± 20
5	Chiều rộng tổng thể	mm	2.985
6	Chiều cao đến nóc xe	mm	2.725 ± 20
7	Khoảng sáng gầm xe khi đủ tải	mm	≥ 475
8	Góc vượt trước	Độ	≥ 40
9	Góc thoát sau	Độ	≥ 30
10	Bán kính quay vòng nhỏ nhất của xe	m	13,2
11	Bán kính quay vòng dưới nước khi tốc độ lớn nhất	m	6 ÷ 10
12	Vận tốc lớn nhất trên đường nhựa	km/h	80
13	Vận tốc lớn nhất khi bơi tiến	km/h	9 ÷ 10
14	Vận tốc lớn nhất khi bơi lùi	km/h	3 ÷ 5
15	Dự trữ hành trình trên đường nhựa	km	≥ 700
16	Góc vượt dốc đứng lớn nhất	Độ	30
17	Góc vượt sường nghiêng lớn nhất	Độ	25

2. Cơ sở lý thuyết tính toán, lựa chọn động cơ và hệ thống truyền lực

2.1. Cơ sở lý thuyết tính toán, lựa chọn động cơ

Để đảm bảo các tính năng kỹ thuật đề ra theo Bảng 1, cần phải tính toán xác định công suất lớn nhất của động cơ. Trong thiết kế xe mới, người ta thường cho sẵn vận tốc lớn nhất v_{max}. Vận tốc này ta coi là đạt được khi xe chạy trên đường tốt, nghĩa là hệ số cản nhỏ, độ dốc không cao. Công suất lớn nhất của động cơ được xác định từ điều kiện đảm bảo vận tốc chuyển động lớn nhất, theo biểu thức sau [3,4]:

$$N_e^{'} = \frac{P_k.v}{\eta_\Sigma} \quad (1)$$

Trong đó:

η_Σ - Hiệu suất của xe có kể đến tổn thất trong thiết bị động lực; $\eta_{\Sigma=}$ 0,80 ÷ 0,85.

$N_e^{'}$ - Công suất động cơ [w]

v - Vận tốc của xe [m/s]

P_k - Lực kéo theo động cơ [N].

Khi xe chuyển động đều (v = const), lực kéo theo động cơ P_k được xác định theo công thức sau [4]:

$$P_k = \psi.G + P_w \quad (2)$$

Trong đó:

G - Trọng lượng của xe; G= 160000 [N]

ψ - Hệ số cản tổng cộng của đường;

P_w - Lực cản không khí. [N]

Đối với xe không kéo moóc chuyển động đều với vận tốc $v = v_{max}$, công suất của động cơ được xác định như sau [4]:

$$N_e^{'} = N_{emax}^{'} = \frac{(\psi_{min}.G + P_w) \, . \, v_{max}}{\eta_\Sigma} \quad (3)$$

Từ công thức trên ta thấy rằng công suất $N_{emax}^{'}$ của động cơ phụ thuộc vào việc chọn hệ số cản tổng cộng của đường và hiệu suất của xe. Ở xe không kéo moóc, hệ số cản ψ thường được lấy theo điều kiện đường tốt (f = 0,015 ÷ 0,025) và có góc dốc nhỏ (i = 0,01 ÷ 0,015), nghĩa là hệ số ψ được chọn trong khoảng ψ = 0,025 ÷ 0,040 [5].

Hiệu suất của xe có tính đến tổn thất trong thiết bị động lực cho hệ thống truyền lực có cấp có thể lấy gần đúng η_Σ = 0,80 ÷ 0,85, ở đây chọn η_Σ = 0,82.

Như đã phân tích ở trên, ta thấy rằng các thông số để xác định $N_{emax}^{'}$ được lựa chọn trong khoảng rộng, do vậy giá trị công suất lớn nhất $N_{emax}^{'}$ có thể xác định theo hệ số cản quy dẫn ψ_0 theo công thức:

$$\psi_0 = (\psi_{min} + \frac{P_w}{G}) \, . \, \frac{1}{\eta_\Sigma} \quad (4)$$

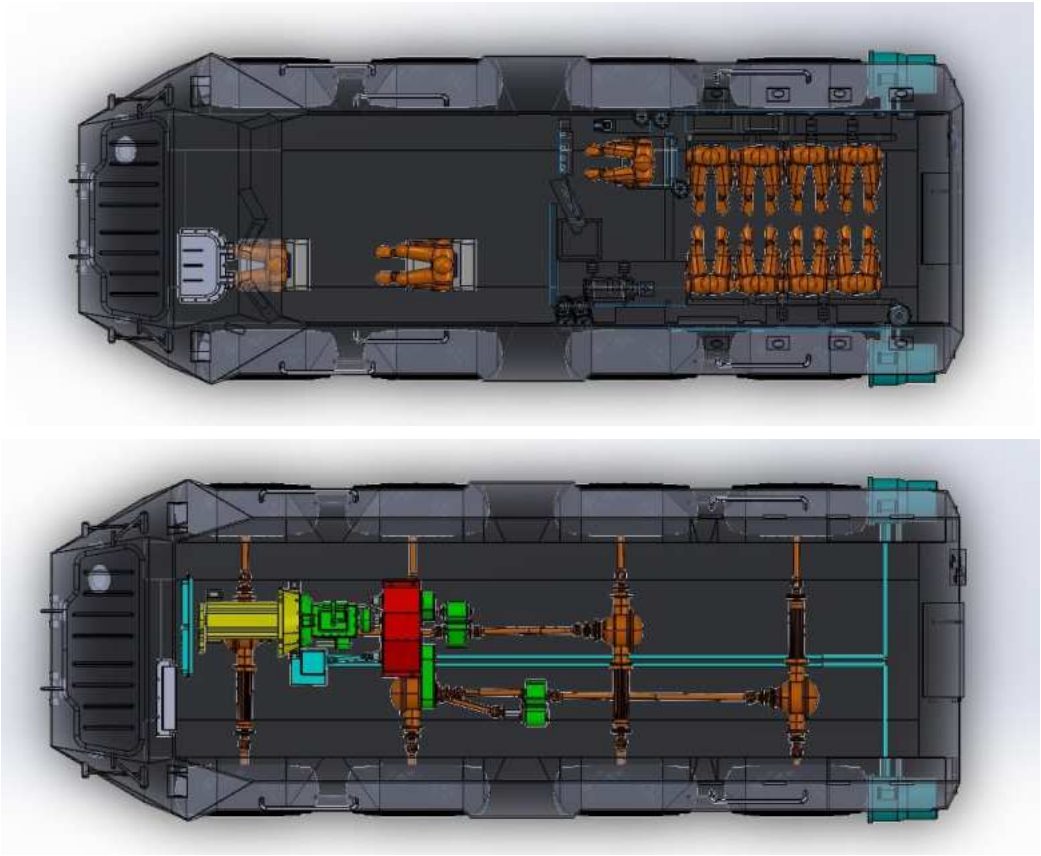
Khi đó:

$$N_{emax}^{'} = \psi_0 \, . \, G \, . \, v_{max} \quad (5)$$

Hệ số cản quy dẫn ψ_0 đối với xe thiết giáp có giá trị trong khoảng ψ_0 = 0,04 ÷ 0,08 [5]. Ở đây ta lấy ψ_0 = 0,06

2.2. Cơ sở lý thuyết tính toán, lựa chọn các cụm trong hệ thống truyền lực

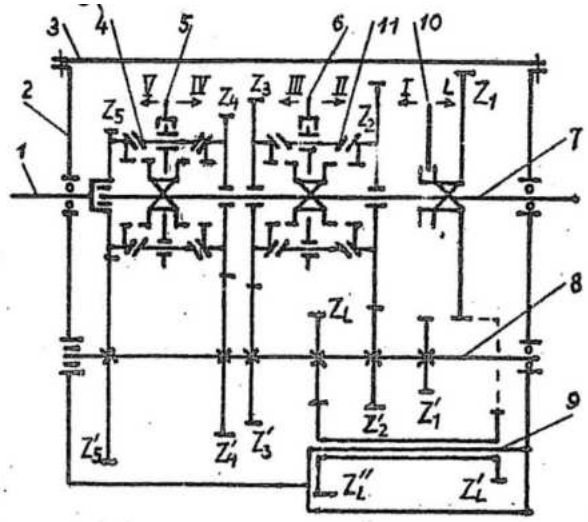
Hệ thống truyền lực (HTTL) xe thiết giáp chở quân 8x8 bao gồm: ly hợp, hộp số, hộp phân phối trung tâm, cầu chủ động, bộ truyền các đăng, hộp giảm tốc bánh xe theo hình 2. Trong giới hạn bài báo, tác giả tập trung vào tính toán, lựa chọn hộp số chính, đây là nhiệm vụ quan trọng nhất khi tính toán thiết kế HTTL. Các cụm còn lại như hộp số phân phối, cầu chủ động, bộ truyền các đăng, hộp giảm tốc bánh xe được lựa chọn dựa trên việc tham khảo các mẫu xe thiết giáp lốp có sẵn.



Hình 2. Phương án bố trí chung hệ thống động truyền lực của xe

Hộp số dùng để thay đổi tỷ số truyền của HTTL trong quá trình chuyển động của xe nhằm thay đổi lực kéo ở các bánh xe chủ động và thay đổi vận tốc chuyển động của xe trong khoảng rộng tuỳ theo sức cản bên ngoài, ngoài ra hộp số còn giúp cho xe có thể chuyển động lùi được và có thể tách động cơ đang làm việc ra khỏi hệ thống truyền lực trong khoảng thời gian tuỳ ý. Hộp số được tính toán, lựa chọn phải đáp ứng được các yêu cầu: Bảo đảm cho xe có chất lượng kéo và chất lượng kinh tế tối ưu trong những điều kiện sử dụng cho trước, điều khiển thuận tiện và nhẹ nhàng, làm việc êm và không ồn, có hiệu suất truyền lực cao [6,7].

Thông qua việc phân tích, đánh giá ưu nhược điểm của các loại hộp số thông dụng và tham khảo kết cấu hộp số trên một số xe thiết giáp 8x8, chúng tôi lựa chọn loại hộp số cho xe là hộp số cơ khí 3 trục dọc, 5 cấp để nâng cao hiệu quả sử dụng công suất của động cơ. Ngoài ra để nâng cao chất lượng động lực học, khả năng tăng tốc và tính kinh tế của xe, chọn thiết kế số 5 là số truyền thẳng.



Hình 3. Sơ đồ động học hộp số ba trục dọc 5 cấp xe thiết giáp chở quân 8 × 8

1. Trục sơ cấp; 2. Vỏ hộp số; 3. Nắp hộp số; 4,11. Đồng tốc; 5, 6, 10. Càng gài số; 7. Trục thứ cấp; 8. Trục trung gian; 9. Trục số lùi.

2.2.1. Xác định khoảng động học và khoảng lực học của xe.

Khoảng động học của xe sẽ được xác định theo công thức sau đây [4]:

$$\mathrm{d}_k = \frac{v_{t\max}}{v_{t\min}} \tag{6}$$

Trong đó: d_k - khoảng động học của xe; $v_{t\max}$ - tốc độ tính toán lớn nhất của xe, $v_{t\max} = 80$ km/h; $v_{t\min}$ - tốc độ tính toán nhỏ nhất của xe ứng với trường hợp động cơ ở chế độ công suất cực đại.

Để có thể xác định được d_k trước tiên phải xác định khoảng lực học. Khoảng lực học của xe được xác định theo công thức sau [4,6]:

$$\mathrm{d}_1 = \frac{\varphi}{\psi_0 . \eta_\Sigma} \frac{G\varphi}{G} \tag{7}$$

d_l - khoảng lực học của xe; Khoảng lực học của ô tô có tất cả các cầu đều là chủ động có giá trị nằm trong khoảng d_1=14-15; chọn $d_l = d_k = 15$.

G- trọng lượng toàn bộ xe;

G_φ - trọng lượng bám của xe;

Hệ số bám φ lấy giá trị lớn ($\varphi = 0{,}7 - 0{,}8$) để đảm bảo ô tô có thể sử dụng triệt để lực bám khi chuyển động trên đường tốt có độ dốc $\alpha = 30^0$. chọn $\varphi = 0{,}75$.

2.2.2. Xác định tỉ số truyền lớn nhất và nhỏ nhất của hệ thống truyền lực.

Tỉ số truyền lớn nhất xác định theo công thức sau đây:

$$i_{tl\max} = \frac{0{,}377 n_N r_K}{v_{t\min}} \tag{8}$$

Trong đó:

n_N - số vòng quay của động cơ ứng với trường hợp có công suất lớn nhất: 2200 (v/ph).

r_K - bán kính tính toán của bánh xe chủ động:

+ Bán kính thiết kế: r = ($\frac{d}{2}$+B) = ($\frac{1.15}{2}$+0.4) = 0.975 (m)

+ Bán kính tính toán: $r_K = \lambda_1.r = 0.95.0.975 = 0.926$ (m)

Với: d - Đường kính vành bánh xe (m); B: Chiều rộng lốp (m); λ_1 : Hệ số biến dạng của lốp 0,95.

Đối với ô tô quân sự số truyền cao nhất của hộp số thường là số truyền thẳng với tỉ số truyền $i_{hn} = 1$ và số truyền cao nhất của hộp số phân phối thường có tỉ số truyền $i_{Pc} = 1$.Do đó tỉ số truyền nhỏ nhất của hệ thống truyền lực cũng chính là tỉ số truyền của cầu chủ động :

$$i_0' = i_{t1_{min}} = \frac{0,377\, n_N r_K}{V_{tmax}} \quad (9)$$

Trong đó :

i_0' – Tỉ số truyền của cầu chủ động.Tỉ số truyền này bao gồm :tỉ số truyền lực chính i_0 và tỉ số truyền lực cạnh i_c .

$i_0' = i_o \,.\, i_c$

Đối với hộp số có số truyền cao nhất là số truyền tăng i_{hmin} sẽ được xác định theo công thức sau đây :

$$i_{hmin} = \frac{n_N}{n_{max}} \quad (10)$$

Trong đó :

i_{hmin} – Tỉ số truyền của số truyền tăng trong hộp số.

n_{max} – Số vòng quay lớn nhất của trục thứ cấp hộp số.Để hạn chế tốc độ vòng tại vị trí ăn khớp của cặp bánh răng giá trị n_{max} được chọn phải nhỏ hơn 4000 - 4500 v/ph .

Khi hộp số có tỉ số truyền tăng ,tỉ số truyền của cầu chủ động sẽ được xác định theo công thức:

$$i_0' = \frac{0,377\,.n_N\, r_k}{i_{hmin}\,.V_{tmax}} \quad (11)$$

Hộp số phân phối của ô tô quân sự thường có hai số truyền : số truyền cao và số truyền thấp . Tỉ số truyền của số truyền cao thường chọn $i_{Pc} = 1$. Tỉ số truyền của số truyền thấp trong các hộp số phân phối hiện có i_{Pt} = 1,5-2,5 .

Xác định tỉ số truyền của các tay số trong hộp số :

Tỉ số truyền của số một được xác định theo công thức :

$$i_{h1} = \frac{i_{t1max}}{i_{Pt}\ i_0} \quad (12)$$

Thông thường số truyền cao nhất của hộp số là số truyền thẳng với $i_{pc} = 1$. Do đó khoảng động học làm việc thường xuyên của ô tô có thể xác định theo công thức sau:

$$d'_k = \frac{i_{h1}}{i_{hn}} = 1 \quad (13)$$

Các tỉ số truyền của hộp số ô tô quân sự thông thường được phân chia theo cấp số nhân và có hiệu chỉnh ở các số truyền cao để đảm bảo khoảng cách giữa các tốc độ lớn nhất ở các số truyền đó thu hẹp lại.

Khi các tỉ số truyền được phân chia theo cấp số nhân thì công bội của cấp số nhân đó sẽ là:

$$q = \sqrt[n-1]{d_k} = \sqrt[n-1]{i_{h1}} \quad (14)$$

Trong đó:

q – Công bội của cấp số nhân .

n – Số lượng các số truyền của hộp số .

Đối với ô tô không có hộp số phụ hoặc hộp số phân phối thì khoảng động học làm việc thường xuyên của ô tô :

$$d'_k = d_k = \frac{V_{tmax}}{V_{tmin}} \quad (15)$$

Và công bội của cấp số nhân sẽ bằng :

$$Q = \sqrt[n-1]{d_k} \quad (16)$$

Tỉ số truyền của các số truyền trung gian xác định theo công thức sau :

$i_{h2} = i_{h1}.q^{-1}$

$i_{h3} = i_{h2}.q^{-1} = i_{h1}.q^{-2}$

. . . . . .

$i_{h\,i} = i_{h(i-1)}.q^{-1} = i_{h1}.q^{-(i-1)}$

Trong đó:

$i_{h(i-1)}$;i_{hi} - tỉ số truyền của số truyền trung gian thứ (i-1)và thứ i

Để đảm bảo khoảng cách giữa các tốc độ lớn nhất ở các số truyền cao thu hẹp lại nên tiến hành hiệu chỉnh các tỉ số truyền trung gian sao cho:

Đối với hộp số có số truyền tăng và trước số truyền tăng là số truyền thẳng,thì từ số một đến số truyền thẳng tỉ số truyền được phân chia theo cấp số nhân.công bội của cấp số nhân này sẽ là:

$$q = \sqrt[n-2]{d_k}$$

Tỉ số truyền của các số truyền trung gian(từ số một đến số truyền thẳng)cũng xác định theo công thức như đối với hộp số không có số truyền tăng.

Tỉ số truyền của số lùi được chọn sao cho đảm bảo tốc độ thấp nhất của ô tô và đảm bảo khắc phục được lực cản lớn nhất của đường.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả tính toán lựa chọn động cơ

Thay các số liệu vào công thức (5) ta xác định được công suất lớn nhất của động cơ:

$N'_{emax} = 0.06.16.10^4 .22,2 = 213.12$ (kw) = 289,76 (hp).

Do xe thiết giáp chở quân 8x8 đòi hỏi khả năng tác chiến độc lập trên nhiều địa hình, sử dụng nhiều cầu chủ động và tích hợp nhiều tính năng được trích từ hộp phân phối trung tâm nên ta chọn động cơ có công suất lớn nhất nằm trong khoảng 320 hp đến 350 hp (lớn hơn khoảng 15% so với tính toán lý thuyết). Qua nghiên cứu về chất lượng cũng như tính phổ biến của các dòng động cơ trên thị trường cho xe quân sự hạng nhẹ, nhận thấy động cơ MTU6R106 do Đức sản xuất là tương đối phù hợp có thể đáp ứng được tốt yêu cầu về mặt công suất và kích thước lắp đặt vào khoang động truyền lực xe thiết giáp chở quân 8x8. Đây là loại động cơ Diesel 4 kỳ, 6 xi lanh thẳng hàng, tăng áp với những tính năng:

Bảng 2. Chỉ tiêu kỹ thuật cơ bản của động cơ MTU6R106

TT	Thông số	Đơn vị	Loại, giá trị
1	Tên động cơ		MTU6R106
2	Kiểu động cơ		Diesel 4 kỳ, 6 xi lanh thẳng hàng, tăng áp
3	Kích thước (dài x rộng x cao)	mm	1053 x 666 x 898
4	Công suất lớn nhất	ml	325
5	Mô men xoắn lớn nhất	N.m	1100
6	Tốc độ vòng quay ở chế độ công suất lớn nhất (n_{emax})	vg/phút	2200
7	Tốc độ vòng quay nhỏ nhất	vg/phút	600
8	Hành trình làm việc của piston	mm	136
9	Đường kính xi lanh	mm	106
10	Hệ thống khởi động		Bằng điện
11	Hệ thống làm mát		Bằng nước, tuần hoàn cưỡng bức

3.2. Kết quả tính toán lựa chọn hộp số

Thay các số liệu tính toán vào (8) ta được: $i_{tlmax} = 144,1$

Thay các số liệu tính toán vào (9) ta được: $i_{tlmin} = 9,6$

Tỉ số truyền của cầu chủ động: $i_0 = i_{tlmin} = 9,6$

- *Xác định tỉ số truyền của các tay số trong hộp số.*

Tỉ số truyền của tay số I được xác định theo công thức (12):

$$i_{h1} = \frac{i_{tl\max}}{i_{pt}.i_0} = \frac{144,1}{1,95.9,6} = 7,7$$

Các tỉ số truyền của hộp số xe thiết giáp bánh lốp thông thường được phân chia theo cấp số nhân theo điều kiện sử dụng tối đa công suất của động cơ. Khi các tỉ số truyền được phân chia theo cấp số nhân thì công bội sẽ là:

$$q = \sqrt[n-1]{d_{hs}} = \sqrt[n-1]{i_{h1}} = \sqrt[4]{7,7} = 1,666$$

Với: n- Số lượng số truyền của hộp số (n=5).

Tỉ số truyền của các số truyền trung gian xác định theo công thức sau:

$i_{h2}=i_{h1}.q^{-1}= 7,7.1.666^{-1}=4,61$; $i_{h3}=i_{h2}.q^{-1}=i_{h1}.q^{-2}=7,7.1,666^{-2}=2,77$

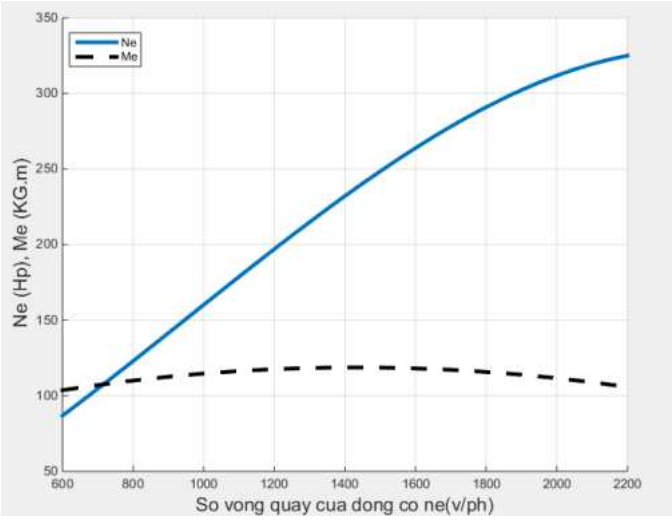
$i_{h4}=i_{h3}.q^{-1}=i_{h1}.q^{-3}=7,7.1,666^{-3}=1,66$; $i_{h5}=1$

trong đó: i_{hi} - tỉ số truyền của số truyền trung gian thứ i

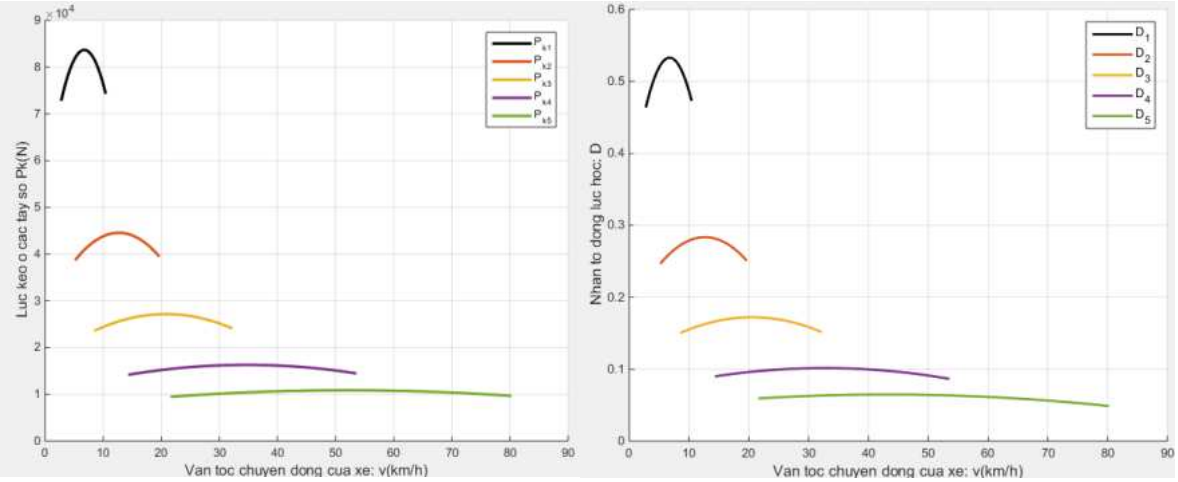
Sau khi hiệu chỉnh ở các số truyền cao để đảm bảo khoảng cách giữa các tốc độ lớn nhất ở các số truyền đó thu hẹp lại theo điều kiện tính đến xác suất lực cản gặp phải. Nhóm tác giả đề xuất lựa chọn hộp số chính với các thông số: $i_{h1}= 7.7$; $i_{h2}=4.1$; $i_{h3}=2.5$; $i_{h4}= 1,5$; $i_{h5}=1$.

3.3. Xây dựng đồ thị đặc tính kéo chuyển động thẳng

Với các thông số của động cơ và hộp số như đã tính toán thiết kế, lựa chọn, sử dụng các công thức tính toán trong [3,5,8] và phần mềm Matlab nhóm tác giả xây dựng được các đồ thị đặc tính kéo chuyển động thẳng xe thiết giáp chở quân 8x8 (Hình 3,4) nhằm đánh giá chất lượng kéo chuyển động thẳng của xe.



Hình 4. Đồ thị đặc tính ngoài của động cơ MTU6R106



Hình 5. Đồ thị đặc tính kéo chuyển động thẳng xe thiết giáp chở quân 8x8

Nhận xét đánh giá:

- Tốc độ lớn nhất của xe đạt được trên đường nhựa là 80 (km/h).

- Lực kéo lớn nhất xe đạt được khi xe chuyển động ở tay số 1 là P_k= 83669 (N).

- Nhân tố động lực học lớn nhất của xe ở tay số 1 là D_{max}= 0.533 từ đây ta có thể xác định được góc vượt dốc lớn nhất mà xe vượt được theo công thức [4]:

α_{max}= arsin (D_{max} - f $\sqrt{1-D_{max}^2}$)= 31,7 (độ)

Như vậy xe thiết giáp chở quân 8x8 với các thông số của động cơ và hộp số như đã tính toán thiết kế, lựa chọn đáp ứng tốt các yêu cầu về vận tốc lớn nhất, lực kéo lớn nhất và góc vượt dốc lớn nhất cần đạt được.

4. Kết luận

Dựa trên yêu cầu tính năng chiến kỹ thuật đề ra đối với xe thiết giáp chở quân 8x8, trên cơ sở lý thuyết tính toán xe quân sự, bài báo đã trình bày các bước tính toán, lựa chọn các cụm của hệ thống động- truyền lực cho xe thiết giáp chở quân 8x8 chế tạo tại Việt Nam. Trong đó tập trung vào tính toán, lựa chọn động cơ động cơ, tính toán thiết kế hộp số chính và xây dựng đồ thị đặc tính kéo chuyển động thẳng. Kết quả tính toán kéo cho thấy chất lượng kéo chuyển động thẳng của xe thiết giáp chở quân 8x8 lắp động cơ MTU6R106 và hộp số tính toán thiết kế đã đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật với v_{max}= 80 (km/h), P_{kmax}= 83669 (N), D_{max}= 0.533, α_{max}= 31,7 (độ).

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Thanh Quang, Nguyễn Minh Tân, Cù Xuân Phong, *Tính toán độ dày vỏ giáp xe thiết giáp chở quân 8x8 sản xuất tại Việt Nam*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam số tháng 12/2024.
2. Nguyễn Huy Trưởng. (2011). *Đề tài NCKH:Nghiên cứu đánh giá tình trạng kỹ thuật và đề xuất giải pháp cải tiến nguồn động lực xe thiết giáp chở quân BTR-60PB*, Viện kỹ thuật Cơ giới Quân sự.
3. Hà Quang Minh. (2002). *Lý thuyết động cơ đốt trong* , NXB QĐND.
4. Nguyễn Phúc Hiểu, Vũ Đức Lập. (2001). *Lý thuyết xe quân sự,* Học viện KTQS.
5. Nguyễn Sĩ Đỉnh. (2015). *Hướng dẫn thiết kế đồ án môn học "Kết cấu tính toán ô tô", Tập I*, Học viện KTQS.
6. Nguyễn Văn Trà. (2016). *Kết cấu tính toán ô tô, Tập 1,* NXB QĐND.
7. Vũ Đức Lập. (2015). *Kết cấu tính toán ô tô, Tập 2*, NXB QĐND.
8. Vũ Đức Lập. (2001). *Ứng dụng máy tính trong tính toán xe Quân sự*, Học viện KTQS.
9. Nguyễn Phùng Quang. (2004). *MatLab & Simulink*, NXB KHKT.

Study on the Design Calculation of the Power Transmission System for the 8 × 8 Armored Personnel Carrier Manufactured in Vietnam

Abstract: *Currently, the trend of improving, modernizing, and manufacturing new armored vehicles is an inevitable development for the Armored Force. The policy of our military is to gradually research, design, and manufacture new generations of armored vehicles to replace outdated models, in order to meet the training and combat readiness requirements, including the 8x8 armored personnel carrier. One of the critical tasks in the design and manufacturing process of armored vehicles is the calculation and selection of components for the powertrain and drivetrain systems, to ensure they meet the required technical specifications. This paper presents the theoretical basis and calculation methods for the components of the powertrain and drivetrain systems for the 8x8 armored personnel carrier, which is manufactured in Vietnam.*

Keywords: The 8x8 armored personnel carrier; powertrain and drivetrain systems; gearbox, gear ratio distribution

❑

Effect of Duct Intake Flow Deflector on Aerodynamic Characteristic of an electric Propulsion Fan

Chu Hoang-Quan[1], Nguyen Trung-Kien[1], Nguyen Binh-Nguyen[2], and Dinh Cong-Truong[2]

[1]*Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam*

[2] *Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam*

Email: chu.h-quan.fas@lqdtu.edu.vn; Contact number: 0985885958

Abstract

Electric ducted fans are progressively finding application in the aviation sector due to their advantages of convenient size, low noise and net-zero-emissions when compared to conventional gas turbine engines. However, these electric propulsors face complex aerodynamic problems in subsonic flight such as flow separation at the duct lip surface area and possible inflow turbulence. These adverse events are responsible for the loss of performance, thrust and instability in the operation of the electric fan. In essence, the appearance of the recirculation region when separating the flow causes inflow asymmetry, which in turn causes pitching moment and instability in the electric thruster. This research introduces a novel concept, the Duct Intake Flow Deflector (DIFD), to mitigate flow separation at the inlet region of an electric Ducted Propulsion Fan (eDPF). The research model is simulated by commercial CFD software on the k-omega SST turbulence model and is validated with the experiment data. Four geometric parameters, including axial distance W from Duct Leading-edge to DIFD Trailing-edge; axis length L; thickness t; and opening angle α relative to the axial direction, are fixed as reference case in this research. For the pre-feasibility study, two DIFD shapes, straight and curve, are first evaluated by comparing with the original model without DIFD technology. The simulation results demonstrate that total thrust may increase or decrease slightly but generally DIFD reduces torque, meaning it takes less energy to operate. Moreover, DIFD technique reduces low pressure zone at duct intake surface. In addition, high static entropy at the fan tip region reduces thrust in the DIFD straight case. In contrast, in the DIFD curve case, the thrust increases due to high static entropy is located in the strut shroud region.

Keywords: *electric Ducted Propulsion Fan; Duct Intake Flow Deflector; RANS analysis; Aerodynamic Characteristic; Thrust.*

1. Introduction

The electric ducted propulsors are progressively studied in Urban Air Mobility (UAM) because of their safety, more compact dimensions than turbofans, and less noise than open rotors. For subsonic voyages, Kazula and Höschler [1] exposed that airflow disturbances during takeoff and climb come from the influence of the angle of attack and crosswind. Receiving this unhealthy amount of air causes flow separation at the inlet area of the ducted fans, creating various dangers.

During forward flight, an angle of attack is formed between the flow entering the electric ducted thruster and its axis of rotation. Similar to the phenomena occurring on aircraft main wings and fan/compressor blades at a great attack angle, the inlet stream no longer slides smoothly and separates gradually from the duct lip surface. The airflow separation formed at the entrance leads to the creation of an asymmetric area, ensuing in the appearance of a pitching moment. This is the first major root affecting the performance and stability of the electric propulsion device [2, 3]. When the UAM speed changes, the second phenomenon is flow distortion inside the engine core

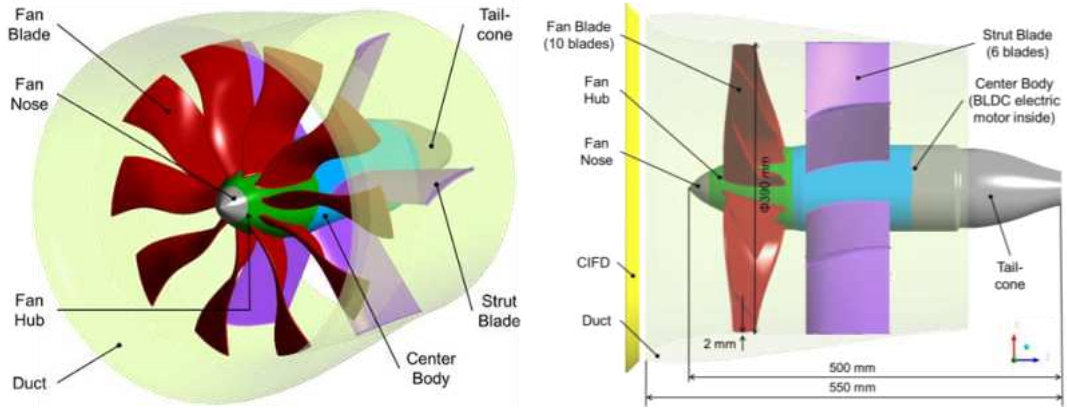
itself in the thrust reversal manner [4] or at the upstream location of the ducted fan such as crosswind [1, 2]. The stream distortion problem sources serious complications such as rotor vibration and noise [2], or total pressure losses inside this power device [4]. In hover mode for flying machine using a ducted fan in the wing, the simulation images of separated flow by velocity vector at the inner surface of the duct are also described [5]. There are two main areas where the air clears out of the duct surface: inlet separation due to the sudden inlet duct shape change as the air stream is sucked into the ducted fan; and diffuser separation because of the tip vortex forming at the fan blade trailing edge. These flow separation events affect the hover performance and efficiency of the airborne device.

To overcome the harms produced by flow separation and distortion at the inlet zone of ducted fans, several papers and inventions have proposed different typical directions, including double-ducted fans [3, 6], lip spoilers [7, 8], duct deflectors [8], nacelle with leading-edge slates [9] or inlet airfoil [10], adaptive ducted fan [11, 12], recess vaned [13], and anti-stall fin [14-16]. Two enclosures at the inlet of the ducted fan, introduced by Akturk and Camci [3, 6], act as a flow separation control device when the thruster is subjected to crosswind conditions. Another approach is to use a design called “lip spoilers” [7, 8] to break the flow separation zone formed in the duct lip area, thereby improving the performance of the propulsion device. Graf et al. [8] also introduced another solution using a duct deflector to create a reduction and redistribution of mass flow on the duct lip surface with the aim of reducing the pitch moment. This proposal increased the performance compared to the case of using a lip spoiler configuration at lower pitch angles.

The two patents that use structural modifications of the nacelle at the inlet both use actuator controllers to intervene in the active control of the flow at the surface boundary layer [9, 10]. While the leading-edge slates [9] configuration is responsible for varying the nacelle inlet area and shape, the inlet airfoil design [10] can be placed on the inside or outside of the nacelle intake, correspondingly, to perform operative boundary layer thickness or to correct the airflow of approaching stream. The next two innovations use a flexible design called an adaptive ducted fan which improves thrust by about 35-40% [11] and allows for maximum exploitation of the air intake area [12]. The proposed casing treatment of recess vaned for low-speed axial flow fan with aerospace-type rotor blade loadings was used by Azimian et al. [13] to improve the stall margin. This experimental study isolated the rotor blade to avoid the influence of the stator blade.

The anti-stall fin is designed to be placed on the inlet surface area of the axial industrial fan [14-16]. This solution is studied by both experimental and numerical simulations to reduce the negative impacts caused by stalls such as noise, vibration, and unstable flow. Another passive flow control concept is the “Circumferential Splitter Blade” (CSB) developed independently by three research groups. Taylor et al. [17] used a CSB design for short-length S-ducts of air-breathing rocket engines to diminish end-walls, corner separations, and downstream compressor flow distortion. Developing on the earlier idea of warning potential locations for separation [18], Kuchana et al. studied the splitter blade to limit separated flow in aggressive annular diffusers [19]. By exploiting the inner and outer CSB on quick ducted fan stator blades, Hine et al. [20] proved load delivery control and condensed flow separation dimensions at the outlet.

In summary, the applications of flow deflection in aerodynamic turbomachinery are extremely diverse. Almost every component in the GTE can use different variations of deflectors. The deflector design has great potential in wind turbines, both in the laboratory and in outdoor testing. With the analytical advantages from the related publications such as [3, 7-20], the initial profile of DIFD is taken to be similar to the corresponding duct lip. For preliminary research, two straight and curved shapes of DIFD are first studied in this paper.



(a) 3D view of original eDPF *(b) eDPF with DIFD*

Fig. 1. Main parts of eDPF 3D model.

2. Numerical Analyse

2.1 Model Description

An electric Ducted Propulsion Fan, called eDPF, which has 10 fan blades of 390 mm shroud diameter and a fan blade tip clearance of 2 mm, is the subject of investigation, as shown in Fig. 1a [21-26]. It is equipped with 6 strut blades at the back with the task of reinforcing and connecting the duct part and center body covering a brushless direct current electric motor (or BLDC). While the eDPF can activate in the rotation speed range from 1500 rpm to 10000 rpm, the steady operating speed is around 70% of the maximum one, i.e., 7200 rpm. The materials for making the duct, fan and strut blades are all carbon fiber composite. The eDPF is furnished with a circumferential flow deflector located in front of the intake area to reduce the presence of low-speed flow areas here, thereby increasing thrust (Fig. 1b). This initiative we named Duct Intake Flow Deflector (of DIFD) shown in Fig. 2. Besides the straight and curve shapes, four other geometric parameters are used for DIFD design, including axial distance W from duct leading-edge to DIFD trailing-edge; axis length L; thickness t; and opening angle α relative to the axial direction.

2.2 Thrust and Torque formulas

The eDPF is a ducted fan type [27], so the formula for calculating thrust follows the Newton's second law, like so:

$$T = \dot{m} \cdot \left(v_e - v_i \right) + A_e \cdot p_e - A_i \cdot p_i \tag{1}$$

where T is the eDPF thrust (N), $\dot{m}$ denotes the mass flow rate (kg/s), and $v_e, v_i, A_e, A_i, p_e, p_i$ are velocity (m/s), cross-sectional area (m^2), pressure (Pa) at the eDPF exit and inlet section, correspondingly.

Accordingly, torque equation [27] is implemented as follows:

$$\tau = T \cdot l \tag{2}$$

where τ denotes the fan torque (N·m), l is the lever arm (m).

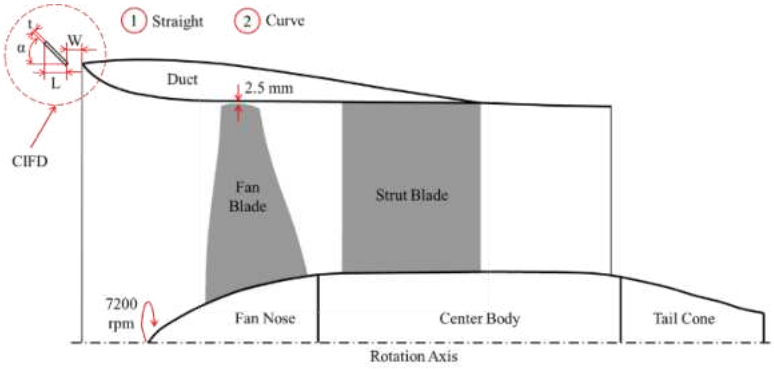


Fig. 2. DIFD geometric parameters at the eDPF meridional plane view.

3. Numerical Method

3.1 Meshing and Boundary Conditions

The geometrical body was meshed using ANSYS Turbo Grid and ICEM CFD software version 2024 R2, respectively, for the core part, containing fan blades and strut blades and for the outer fluid one (Fig. 3). Full 360° total nodes for computational meshing is around 17 million, of which, the eDPF fluid zone alone accounts for 10.2 million nodes. So, if we consider one passage for fan and another for strut, the grid will be reduced to about 2.42 million nodes for the entire domain, or approximately 1.3 million nodes for eDPF part only.

The size of the simulation domain, as exposed in Fig. 4, is a cylinder with a radius of 5D. With the center coordinates located at the fan nose, the front space is 5D, and the rear one is 15D where D is the diameter of the eDPF shroud. The simulation conditions at the Inlet, Outlet, Opening surfaces are taken according to the atmospheric pressure and 25°C ambient temperature at ground level. Rotation zone covers fan blades with an angular velocity of 7200 rpm in counterclockwise direction. The interfaces between the rotating and stationary domains use the frozen rotor method with pitch angles between 60° and 36°, one-to-one. The general grid interface technique is applied to the mesh connection between these domains. To reduce the computational time, only one passage fan and strut are considered. The SST based k-omega turbulence model is practical for steady analysis in the article.

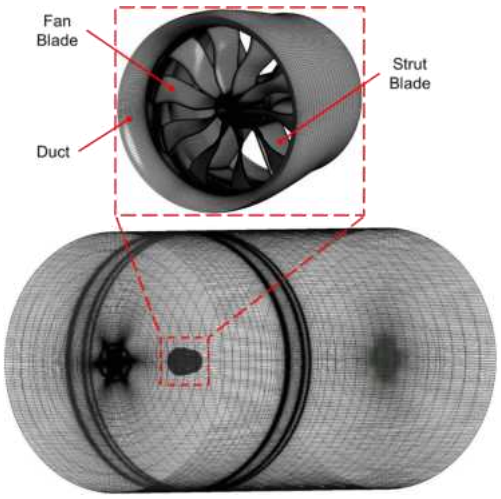


Fig. 3. Computational meshing domain with eDPF meshing area zoomed-in.

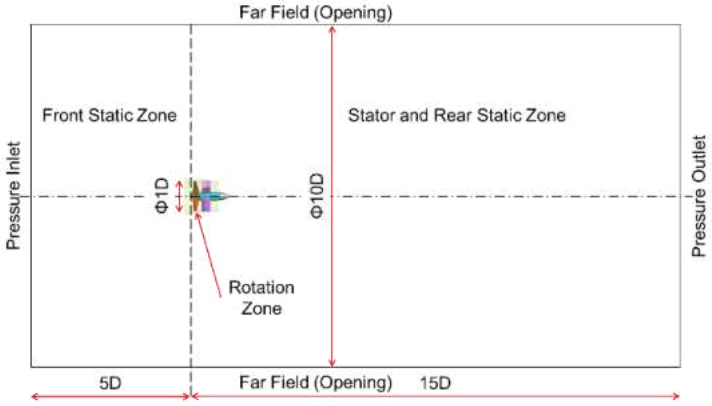


Fig. 4. Computational cylindrical boundary conditions.

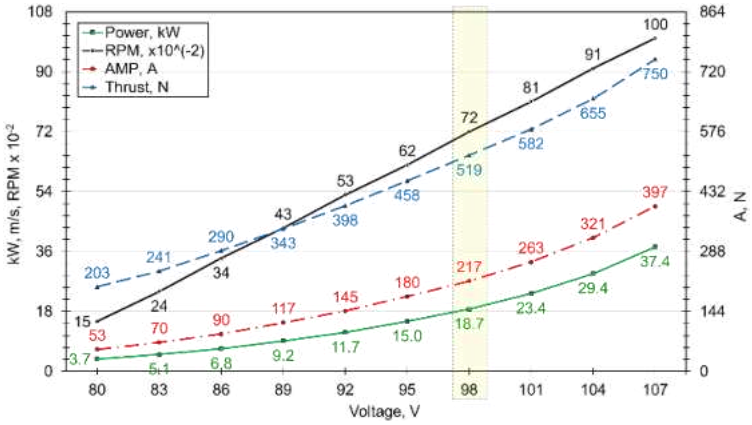


Fig. 5. Computational meshing domain with eDPF meshing area zoomed-in.

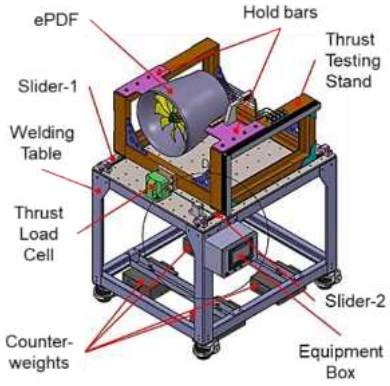


Fig. 6. Thrust Testing Stand and Welding Table.

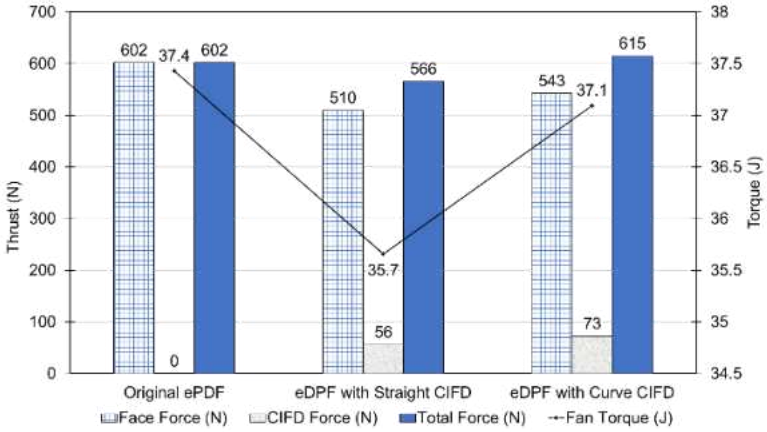


Fig. 7. Comparison of Thrust and Torque.

3.2 CFD Validation with Experiments

Each design point is rented on the Dell workstation configured with Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v4 @ 2.40GHz 2.40 GHz (2 processors) with 24 parallel computing threads. The average time to solve a design point with 2000 iterations is about 3.5h to 4.5h on ANSYS CFX 2024 R2 software [28].

The experimental data of electric ducted fan supplier [29] are given in Fig. 5 at ten measuring points. In essence, the BLDC electric motor is accelerated by gradually increasing the power (kW) based on the change of voltage (V) and current (A). Ten different levels of fan blade rotation speed are 1500, 2400, 3400, 4300, 5300, 6200, 7200, 8100, 9100, and 10000 rpm, respectively. Thrust produced by this propulsor also rises gradually from 203 N to 750 N. At the explored rotation speed of 7200 rpm, corresponding to the design point in the CFD simulation, the thrust value recorded in the experiment is 519 N.

The test model is placed on a thrust testing stand system structured as showing in Fig. 6. Because the experimental system is affected by sliding friction, the thrust measured in the experiment will decline.

The eDPF mass is about 18 (kg), each holding bar weighs 7 (kg), and the U-shaped steel plate test stand evaluates 108 (kg). Then the assembly total weight will be:

$$m_{\Sigma} = 18 + 7 \cdot 2 + 108 = 140 \ (N)$$

At that point, the normal force will be:

$$N = m_{\Sigma} \cdot g = 140 \cdot 9.81 \approx 1373 \ (N)$$

The lubricated slides should have a sliding friction coefficient of about 0.02. While the ePDF is placed perpendicular to the test stand, the sliding friction force of the system will be:

$$F_s = \mu_s \cdot N \cdot \cos\theta = 0.02 \cdot 1373 \cdot 1 \approx 27.5 \ (N)$$

So, the actual thrust in the ePDF experiment will be:

$$519 + 27.5 = 546.5 \ (N)$$

At the design rotation speed of 7200 rpm, the CFD calculated thrust result for the original eDPF is 602.159 (N). So, the error between simulation and experiment will be:

$$(602.159 - 546.5)/602.159 \cdot 100 \approx 9.24\%$$

**** Preliminary assessment of the difference between experiment and simulation:***

It is still within the allowable error threshold of 10%. This error reflects the difference in results between CFD and experiment at a somewhat acceptable level.

The causes of this difference may come from experimental factors such as measuring device errors, measurement uncertainties, the electric fan system efficiency (battery system, BLDC electric motor, electric ducted fan itself) and influences from environmental conditions (surrounding obstacles, wind effects, temperature, etc.).

On the other hand, numerical simulation can be influenced by issues like as grid independence assessment, turbulence modeling accuracy, etc.

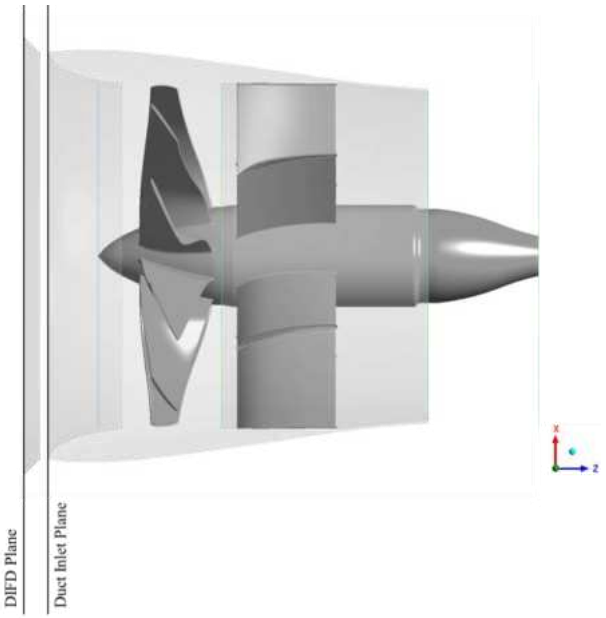
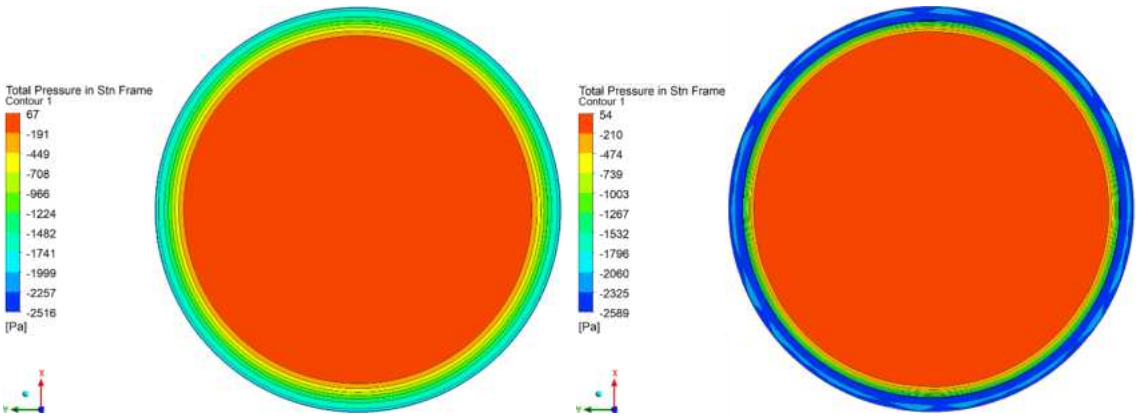


Fig. 8. Cross-sections surveyed along the eDPF.



(a) Straight CIFD case *(b) Curve DIFD case*

Fig. 9. Total pressure at DIFD plane.

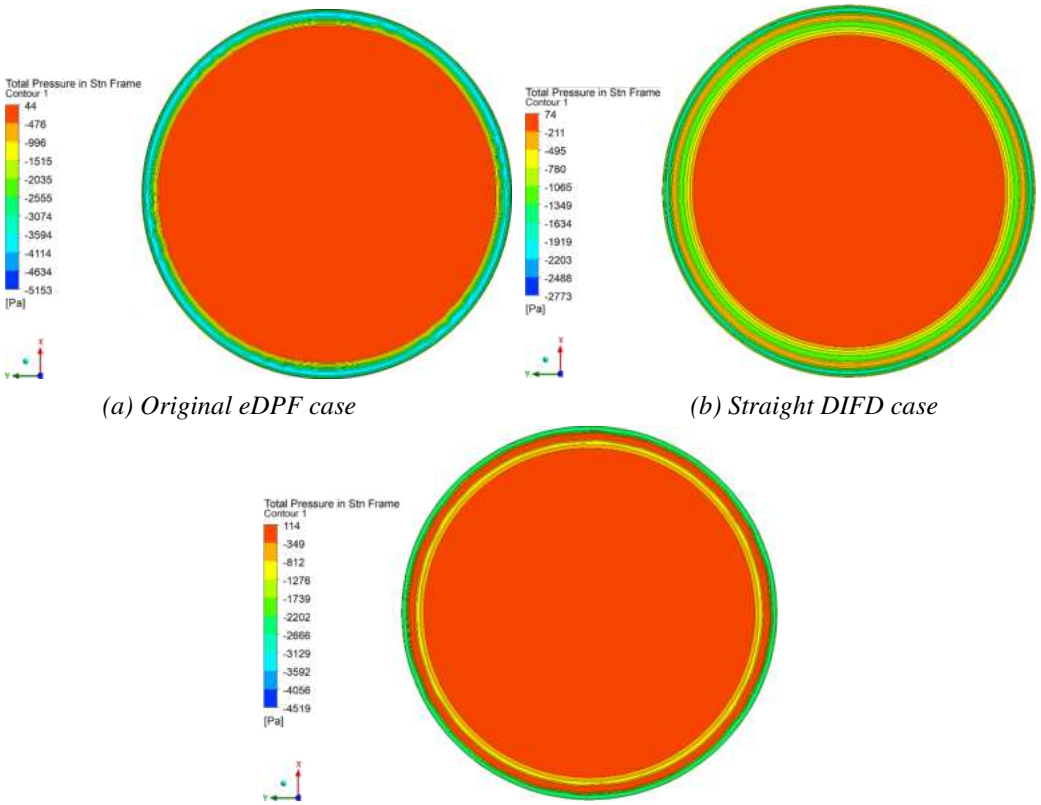
4. Results and Discussion

4.1 Quantitative Results

Quantitative and qualitative analysis of simulation results was performed similar to previous publications [30-32].

After the original model having simulation results is validated with experiment data. Two different shapes of DIFD, as well as straight and curve, are compared with the model without DIFD invention. Four design parameters are fixed as reference values, counting axial distance W = 10 mm, axis length L = 50 mm, thickness t = 1 mm, and opening angle $\alpha = 45^{o}$.

Overall, Fig. 7 shows that the eDPF thrust alone decreases with the addition of DIFD, but the total thrust increases slightly to 615 N in the case of curve DIFD, or about 2.1% compared to the base case. Interestingly, although the eDPF's own thrust is slightly reduced; however, the fan blade's torque is also weaker, which means that less energy from the BLDC is required to operate the ducted propulsor.



(a) Original eDPF case *(b) Straight DIFD case*

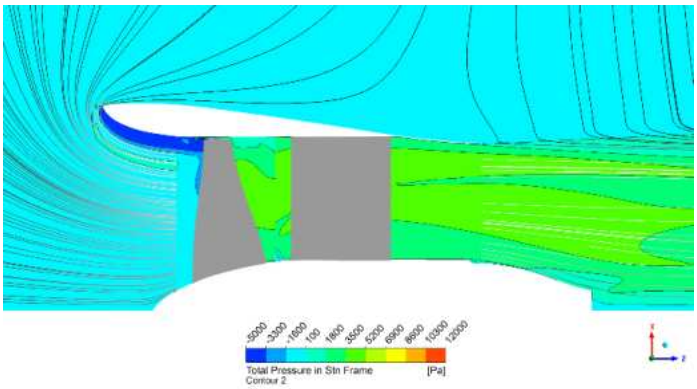
(c) Curve DIFD case

Fig. 10. Total pressure at Duct Inlet plane.

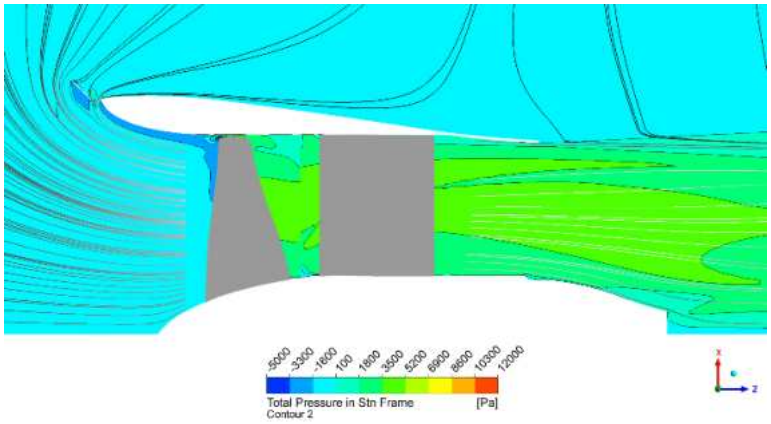
4.2 Qualitative Results

Qualitative values will be considered in turn in aspects including total pressure, velocity streamlines, vertex velocity, and static entropy at different cross-sections in both the streamwise and spanwise directions. Two cross-sections, including DIFD, and Duct Inlet, as cited in Fig. 8, are distributed and investigated to evaluate the change of aerodynamic characteristics along the eDPF flow direction.

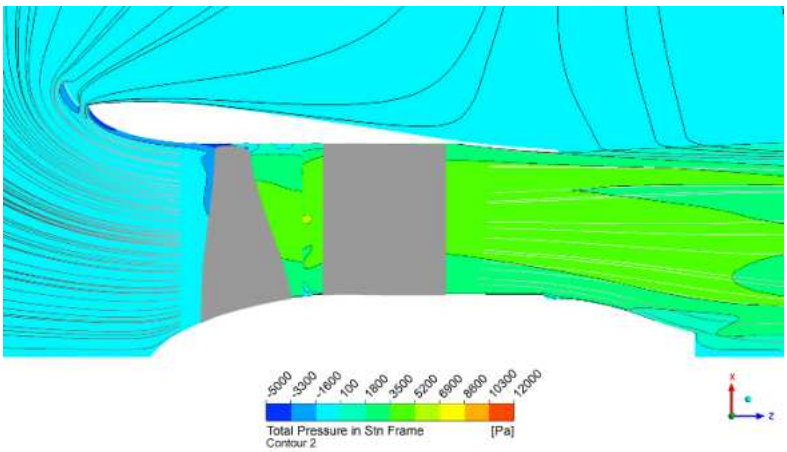
At the cross section on the DIFD plane, the airflow sucked into the electric propulsor has been effective thanks to the presence of DIFD (Fig. 9). The negative values of relative pressure, which appear at the outer border of the circular cross-sections are the locations of the DIFD, clearly demonstrate the suction effect caused by the rotation of the fan blades. In the two cases with DIFD, the curve shape gives rise to a larger “blue” region, i.e., creates a larger negative pressure region, or generates a better suction effect than the straight shape.



(a) Original eDPF case

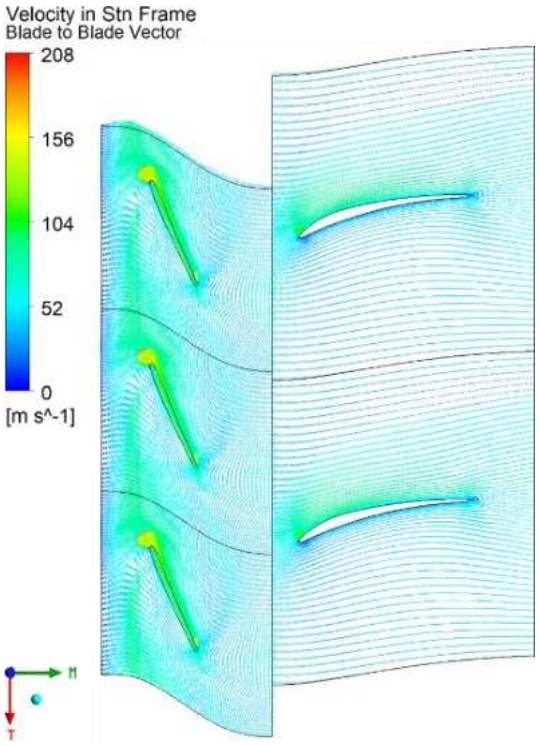


(b) Straight DIFD case

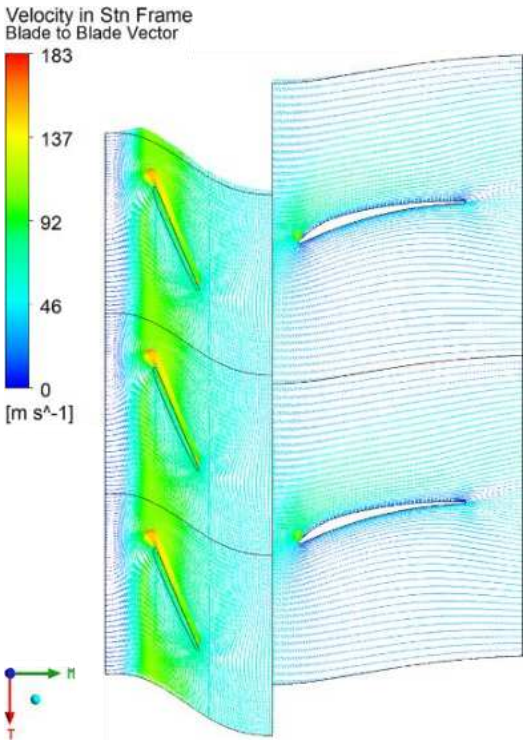


(c) Curve DIFD case

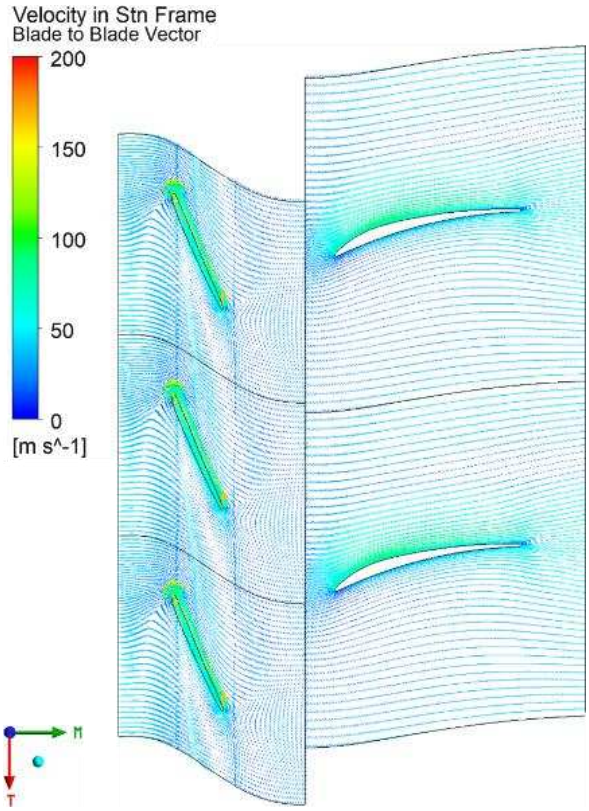
Fig. 11. Total Pressure and Streamlines at XZ Plane.



(a) Original eDPF case



(b) Straight DIFD case



(c) Curve DIFD case

Fig. 12. Total Pressure and Streamlines at XZ Plane.

At the eDPF inlet cross-section, the large central region in all three cases is "red" color, indicating that there is no air intake effect in this area due to the positive relative pressure (Fig. 10). For the basic eDPF, the negative pressure area at the lip edge shows that the suction effect is playing a role there (Fig. 10a). Meanwhile, in both DIFD cases, the color discontinuity shows a sharp decrease in relative pressure at the center of the outer zone. In the straight case, the suction effect declines as it gets closer to the center, but it still remains (Fig. 10b). However, the suction effect seems to disappear rapidly at the middle of the border zone in the curve case (Fig. 10c). It is clear that the suction effect of straight DIFD seems to be doing better than the curve shape case at the duct inlet cross section.

At the XZ plane, in the same survey value range from -5000 Pa to 12000 Pa, the Low-Pressure Bubble (LPB) region appeared in the duct intake surface area (Fig. 11). For the original eDPF case, huge LPB with strong intensity at duct intake surface. For both DIFD inventions, LPB shrinks and loses intensity at duct Intake surface, but small LPB appears below DIFD surface. In the case of straight DIFD, the small LPB has weak intensity at duct intake surface. In the case of curve DIFD, there is still a tiny LPB with strong intensity at duct intake surface.

At the M-θ plane corresponding to 0.98 spans (Fig. 12), both original and straight DIFD cases have the clear appearance of turbulence regions. If there are more disturbances for the original case, the turbulence zone is narrower but has a higher active area than the straight-shaped case. For the curve DIFD case, vertex velocity is almost regulated everywhere!

As we know, any increase in entropy in turbomachinery means that useless work exists, i.e., energy loss occurs. Fig. 13 illustrates large and very high static entropy before fan blade in the case of original eDPF. For DIFD straight shape, the great and very high static entropy located on the fan tip region causes a decrease in total thrust. In the case of curve form, the very long and huge region of higher static entropy at the strut shroud region, thereby increasing surface thrust and total thrust.

5. Conclusion

This study proposes a new concept named DIFD, to overpower the separated flow bubble at the eDPF inlet region. As the results obtained and the analysis presented in the paper, some points that can be highlighted are listed as follows:

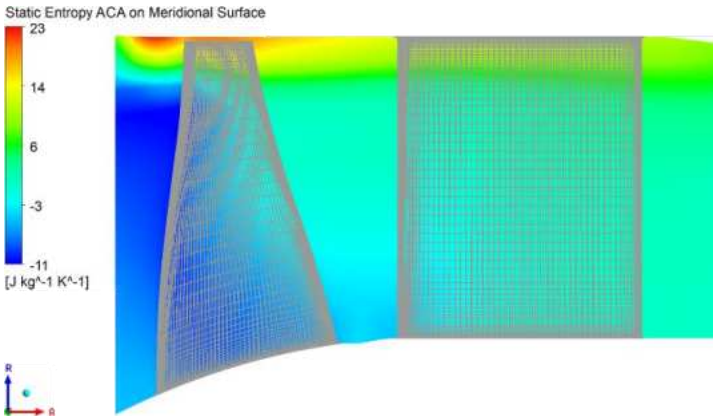
(i) Total thrust may upsurge or decline a little but mostly DIFD lessens torque, meaning it takings fewer energy to work.

(ii) DIFD method reduces LPB at the duct intake surface through images of pressure contours, velocity profiles, and entropy distribution.

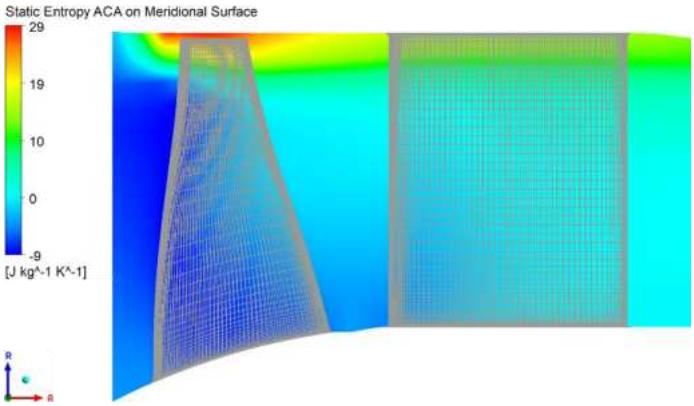
(iii) High static entropy at the fan tip region diminishes thrust for the DIFD straight shape.

(iv) On the contrary, in the DIFD curve case, the thrust rises due to high static entropy is positioned in the strut shroud region.

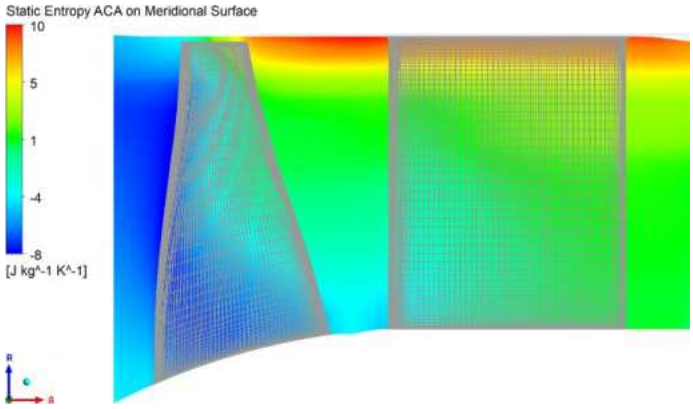
(v) It is necessary to guarantee lubrication of the sliders in aerodynamic experiments so that friction has the smallest effect.



(a) Original eDPF case



(b) Straight DIFD case



(c) Curve DIFD case

Fig. 13. Static Entropy on Meridional Surface.

In future work, aerodynamic experiments are needed to validate with simulations with smaller errors. Moreover, it is necessary to investigate grid independence. Besides the DIFD straight or curved shape, additional DIFD geometric parameters, for example, axial distance, axis length, thickness, and opening angle, need to be supplemented for upcoming optimization studies.

Acknowledgement

This work received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References

1. Kazula, S. and K. Höschler (2021, August 1). Review of variable leading-edge patents for aircraft wings and engine inlets and their relevance for variable pitot inlets in future supersonic transport, *CEAS Aeronautical Journal*. https://doi.org/10.1007/s13272-021-00520-y
2. Akturk, A. and C. Camci (2014). Lip separation and inlet flow distortion control in ducted fans used in VTOL systems, *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. Vol. 1A: Aircraft Engine; Fans and Blowers. Düsseldorf, Germany. https://doi.org/10.1115/GT2014-26249
3. Akturk, A. and C. Camci (2022). Double-ducted fan as an effective lip separation control concept for vertical-takeoff-and-landing vehicles, *Journal of Aircraft*, 59(1), pp. 233–252. https://doi.org/10.2514/1.C036386
4. Rajendran, D.J. and V. Pachidis (2021). Flow distortion into the core engine for an installed variable pitch fan in reverse thrust mode, *Journal of Turbomachinery*, 143(7). https://doi.org/10.1115/1.4050331
5. Sheng, C., Q. Zhao, and N.P. Bi (2015). Numerical investigations of ducted fan hover performance for fan-in-wing applications, *The 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*. https://doi.org/10.2514/6.2015-1935
6. Camci, C. and A. Akturk (2011). Double-Ducted Fan, *Penn State Research Foundation*, Patent No. US20110217163A1. https://patents.google.com/patent/US20110217163A1
7. Camci, C., N. Herwig, and A. Akturk (2016). Inlet flow separation control via novel lip-spoilers for ducted Fan-based VTOL uninhabited aerial vehicles, *Open Archives of the 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. https://hal.science/hal-01887487

8. Graf, W., J. Fleming, and W. Ng (2008). Improving ducted fan UAV aerodynamics in forward flight, *The 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. https://doi.org/10.2514/6.2008-430
9. Chaudhry, A.Z. (2008). Nacelle with articulating leading-edge slates, *Raytheon Technologies Corporation*, Patent No. US20080308684A1. https://patents.google.com/patent/US20080308684A1
10. Jain, K.A., and M. Winter (2013). Nacelle assembly having inlet airfoil for a gas turbine engine, *RTX Corporation*, Patent No. US8408491B2. https://patents.google.com/patent/US8408491B2
11. Balan A. (2020). Adaptive ducted fan propulsion system, *Individual*, Patent No. US11780560B2. https://patents.google.com/patent/US11780560B2
12. Balan A. (2023). Adaptive duct fan with individually controlled slats, *Xagon Solutions Inc.*, Patent No. WO2024006584A2. https://patents.google.com/patent/WO2024006584A2
13. Azimian, A.R., R.L. Elder, and A.B. McKenzie (1990). Application of Recess Vaned Casing Treatment to Axial Flow Fans, *Journal of Turbomachinery*, 112(1), pp. 145-150. https://doi.org/10.1115/89-gt-68
14. Kim, Y.I., S.Y. Lee, H.M. Yang, K.Y. Lee, S.H. Yang, and Y.S. Choi (2022). Suppression of Stall-Induced Instability and Positive Slope at Low Flow Rates of an Axial FAN with Two-Dimensional Anti-stall fin, *Journal of Fluids Engineering*, Transactions of the ASME, 144(12). https://doi.org/10.1115/1.4055541
15. Kim, Y.I., H.M. Yang, K.Y. Lee, and Y.S. Choi (2022). Numerical investigation on functional limitations of the anti-stall fin for an axial fan: one-factor analyses, *Scientific Reports*, 12, 15240. https://doi.org/10.1038/s41598-022-19530-9
16. Choi, Y.S., Y.I. Kim, H.M. Yang, and K.Y. Lee (2022). Anti-stall structure and axial fan including same, *Korea Institute of Industrial Technology*, Application No. 1020220099333. https://doi.org/10.8080/1020220099333?urlappend=en
17. Taylor, J.V., F. Flanagan, A. Dunlop, S.D. Grimshaw, and R.J. Miller (2021). Super aggressive S-ducts for air breathing rocket engines, *Journal of Turbomachinery*, 143(6). https://doi.org/10.1115/1.4050596
18. Kuchana, V., N. Balakrishnan, and B. Srinivasan (2020). Design of Curved Annular Diffusers, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 142(4). https://doi.org/10.1115/1.4046233
19. Kuchana, V., N. Balakrishnan, and B. Srinivasan (2022). Design of Curved Annular Diffusers II: Using Splitter Blades, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 144(8). https://doi.org/10.1115/1.4054580
20. Hine, R.D., J.R. Farman, S.D. Grimshaw, and J.V. Taylor (2023). Short ducted fan diffusers with integral splitter blades, *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, Vol. 13C. https://doi.org/10.1115/GT2023-102165
21. Dinh, V.S., H.Q. Chu, T.K. Nguyen, D.A. Le, N.B. Le, A.T. Nguyen, W.Y. Kim, and C.T. Dinh (2024). *Flow analysis through center body of ducted fan to electric motor cooling*, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2707, 012103. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2707/1/012103

22. Vu, T.S., T.M. Le, C.T. Nguyen, V.T. Tran, H.Q. Chu, and C.T. Dinh (2023). Stator blades effect on thrust of an electric ducted propulsion fan, *Journal of Science and Transport Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 38-46. https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.vn.3.4.38-46

23. Co-Tan A.V., V.H. Nguyen, H.Q. Chu, T.S. Vu, K.Q. Pham, A.T. Nguyen, and T.L. Nha (2024). Effect of Bleeding Dual Discharge Port on Aerodynamic Performance of a Single-stage Transonic Axial Compressor, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 17, No. 2. http://dx.doi.org/10.5293/IJFMS.2024.17.2.088

24. Chu, H.Q., M.H. Dang, A.T. Nguyen, V.D. Vu, T.K. Nguyen, and C.T. Dinh (2024). Numerical Analysis of the Duct Effects on Aerodynamic Noise Reduction for electric Propulsion Fan, *Vietnam Mechanical Engineering Journal*, Vol. 11, pp. 352-356. https://www.researchgate.net/publication/386479865

25. Trinh P.A., H.Q. Chu, Q.N. Dinh, H.Q. Luu, V.D. Vu, G.D. Pham, and C.T. Dinh (2024). Aerothermal Characteristic of the Air Gap Between Rotor and Stator Inside BLDC Electric Motor using Blade Airflow Deflectors, *Vietnam Mechanical Engineering Journal*, Vol. 11, pp. 357-361. https://www.researchgate.net/publication/386480676

26. Nguyen, Q.V., H.Q. Chu, Q.N. Dinh, T.S. Vu, H.S. Truong, G.D. Pham, and C.T. Dinh (2024). Effects of airflow injection channel on aerodynamic performance of an electric ducted propulsion fan, *Collection of Scientific Works of the National Mechanical Conference celebrating the 45th anniversary of the Institute of Mechanics*, Vol. 2, pp. 502-510, VAST Publishing House for Science and Technology. https://www.researchgate.net/publication/387511042

27. Gudmundsson S. (2022), "General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures", Chapter 15, Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818465-3.09989-4

28. ANSYS Inc. (2024), "Ansys CFX-Solver Manager User's Guide". Release 2024 R2.

29. VasyFan (2021), "EDF VF-390 Data Sheet and Instruction Manual – 2021 PRODUCT". Available at: https://www.vasyfan.com/Edf390/PlusVF390Nacelle.html.

30. Chu H.Q. and C.T. Dinh (2022). Aerodynamic and structural performances of a single-stage transonic axial compressor with blade fillet radius, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, Vol. 11, Issue 3, pp. 407-424. https://doi.org/10.1108/IJIUS-07-2021-0069

31. Chu H.Q., Q.H. Nguyen, Q.H. Nguyen, Q.V. Nguyen, V.H. Nguyen, T.K.D. Hoang, X.T. Le, C.T. Dinh, and T.T. Tran (2022). Aerodynamic Performance of a Multi-stage Axial Compressor with Tip Clearance Coupled with Hub Fillet, *The AUN/SEED-Net Joint Regional Conference in Transportation, Energy, and Mechanical Manufacturing Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 1306-1323. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1968-8_111

32. Nguyen A.T., H.D. Vo, C.T. Dinh, and H.Q. Chu (2022). Aerodynamic Performances of a Single-Stage Transonic Axial Compressor using an Inclined Casing Groove, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 22, Issue 1, pp. 179-188. https://doi.org/10.1080/14484846.2022.2070100

Ảnh hưởng của bộ hướng dòng đầu vào lên đặc tính khí động của quạt đẩy điện có ống hướng dòng

ThS. Chu Hoàng Quân[1], PGS. TS. Nguyễn Trung Kiên[2]
[1, 2] Viện Cơ khí động lực/Học viện Kỹ thuật quân sự
KS. Nguyễn Bình Nguyên[3], TS. Đinh Công Trường[4]
[3, 4] Trường Cơ khí/Đại học Bách khoa Hà Nội

Tóm tắt: *Quạt đẩy điện có ống hướng dòng được ứng dụng trong lĩnh vực hàng không do có ưu điểm là kích thước nhỏ gọn, tiếng ồn thấp và lượng phát thải ròng bằng 0 khi so sánh với các động cơ tua bin khí thông thường. Tuy nhiên, các thiết bị đẩy điện này phải đối mặt với các vấn đề khí động học phức tạp trong chuyến bay dưới âm như sự tách dòng tại bề mặt thiết bị vào và khả năng xảy ra nhiễu loạn dòng khí đi vào. Những bất lợi này là nguyên nhân gây nên mất hiệu suất, lực đẩy và sự ổn định trong quá trình vận hành quạt đẩy điện. Về bản chất, sự xuất hiện một cách tuần hoàn của vùng khí tách dòng gây ra sự bất đối xứng dòng vào, từ đó gây ra mô men chúc ngóc và mất ổn định trong thiết bị đẩy điện. Bài báo này đề xuất một thiết kế mới được gọi là Bộ hướng dòng đầu vào (DIFD) để khắc phục hiện tượng tách dòng tại thiết bị vào của quạt đẩy điện có ống hướng dòng. Mô hình nghiên cứu được mô phỏng bằng phần mềm thương mại CFD trên mô hình rối SST k-omega và được xác minh bằng dữ liệu thực nghiệm. Bốn thông số hình học, bao gồm khoảng cách W theo phương trục quay từ mép trước đến mép sau ống hướng dòng; chiều dài L theo phương trục quay; độ dày t; và góc mở α so với phương trục quay, được cố định làm trường hợp tham chiếu. Đối với nghiên cứu tiền khả thi, hai hình dạng thẳng và cong, được đánh giá trước tiên bằng cách so sánh với mô hình nguyên mẫu. Kết quả mô phỏng chứng minh rằng lực đẩy tổng thể có thể tăng hoặc giảm nhẹ nhưng nhìn chung DIFD làm giảm mô-men xoắn, nghĩa là cần ít năng lượng hơn để vận hành. Hơn nữa, thiết kế mới giúp giảm vùng áp suất thấp tại bề mặt thiết bị vào của ống hướng dòng. Ngoài ra, entropy tĩnh có giá trị cao tại vùng khe hở ở đầu lá cánh quạt đẩy và làm giảm lực đẩy trong trường hợp DIFD dạng thẳng. Ngược lại, trong trường hợp DIFD dạng cong, lực đẩy tăng lên do entropy tĩnh có giá trị cao chuyển sang vị trí mặt trong của ống hướng dòng tại khu vực thanh chống.*

Keywords: Quạt đẩy điện có ống hướng dòng; Bộ hướng dòng đầu vào; Phân tích RANS; Đặc tính khí động; Lực đẩy.

❑

Nghiên cứu thiết kế cơ cấu phanh xe thiết giáp bánh lốp chở quân XTC - 02 sản xuất tại Việt Nam

Lưu Mạnh Linh[1], Tô Viết Thành[2], Nguyễn Trường Sinh[2]

[1] Hệ quản lý học viên sau đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2] Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[1]Email: linhlm02@gmail.com, Tel: 0976765259

Tóm tắt

Xe thiết giáp bánh lốp XTC - 02 là một sản phẩm hoàn toàn mới do Việt Nam nghiên cứu, chế tạo. Hệ thống phanh là một trong những hệ thống quan trọng nhất của xe ô tô, nó đảm bảo cho xe chuyển động an toàn ở vận tốc cao, cho phép lái xe điều chỉnh được tốc độ chuyển động và dừng xe trong những tình huống nguy hiểm hoặc giữ xe cố định trong thời gian dừng xe, nhất là trên dốc. Vì vậy, cùng với thiết kế sản xuất các cụm, cơ cấu của xe, việc nghiên cứu về cơ cấu phanh xe có ý nghĩa khoa học và thực tiễn. Dựa theo cơ cấu phanh mẫu của xe Kamaz - 43502 có công thức bánh xe 4×4, bài báo tập trung nghiên cứu lý thuyết và thiết kế cơ cấu phanh tang trống, loại guốc có chốt tựa cùng phía, chuyển dịch các guốc như nhau cho cả 2 cầu. Trên cơ sở các yêu cầu đối với hệ thống phanh, nhóm nghiên cứu tiến hành khảo sát bằng phần mềm Matlab, kiểm nghiệm sự ảnh hưởng của các yếu tố kết cấu đến hiệu quả phanh, đảm bảo xe có khả năng cơ động nhanh, linh hoạt, tính năng thông qua cao, hệ thống bảo vệ tốt, hỏa lực mạnh và khả năng sẵn sàng chiến đấu đa dạng theo nhiệm vụ tác chiến.

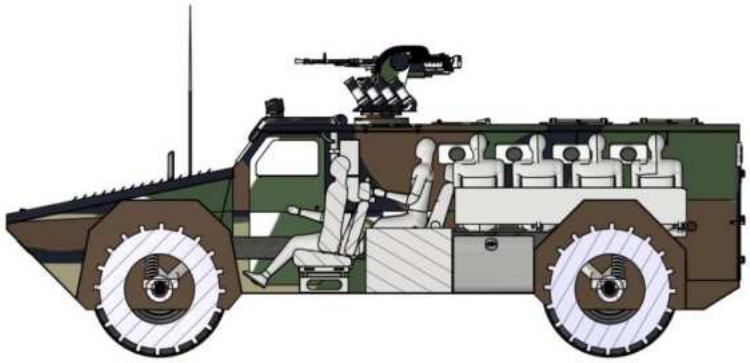
Từ khóa: *Cơ cấu phanh tang trống; guốc; chốt tựa; hệ thống phanh; thiết giáp bánh lốp.*

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của khoa học công nghệ, yêu cầu về tính năng và độ an toàn của các phương tiện quân sự, đặc biệt là xe thiết giáp bánh lốp, ngày càng trở nên quan trọng. Xe thiết giáp bánh lốp chở quân là phương tiện chiến đấu đa dụng, sử dụng trong việc vận chuyển binh lính và trang thiết bị, cũng như thực hiện các nhiệm vụ trinh sát và tác chiến. Với cấu trúc bánh lốp, loại xe này có khả năng di chuyển linh hoạt trên nhiều loại địa hình như đường đất, đường cát và địa hình phức tạp. Cấu tạo của xe thiết giáp bánh lốp thường bao gồm khung gầm chắc chắn, lớp giáp bảo vệ và các hệ thống hỗ trợ vận hành như động cơ, hệ thống truyền động, hệ thống lái và hệ thống phanh.

Hệ thống phanh không chỉ giúp điều khiển tốc độ, dừng xe mà còn đảm bảo tính ổn định của xe khi di chuyển trên các địa hình phức tạp. Đặc biệt, trong điều kiện tác chiến, yêu cầu về hiệu quả phanh càng trở nên khắt khe hơn nhằm đảm bảo an toàn cho xe và người sử dụng. Trong số các hệ thống phanh hiện nay, cơ cấu phanh tang trống kết hợp với dẫn động khí nén được đánh giá cao về độ bền và khả năng làm việc trong điều kiện khắc nghiệt. Hệ thống phanh tang trống bao gồm các thành phần chính như: tang trống, guốc phanh, lò xo hồi vị, và cơ cấu dẫn động. Khi áp suất từ hệ thống dẫn động tác động lên cơ cấu phanh, các guốc phanh được ép vào bề mặt tang trống, tạo ra lực ma sát để làm giảm tốc độ hoặc dừng xe.

Trước yêu cầu đó, bài báo *"Nghiên cứu thiết kế cơ cấu phanh xe thiết giáp bánh lốp chở quân XTC - 02 sản xuất tại Việt Nam"* được thực hiện nhằm mục tiêu tối ưu hóa thiết kế cơ cấu phanh, đảm bảo đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật và tính năng an toàn cho xe thiết giáp bánh lốp 4x4 trên điều kiện địa hình nước ta.



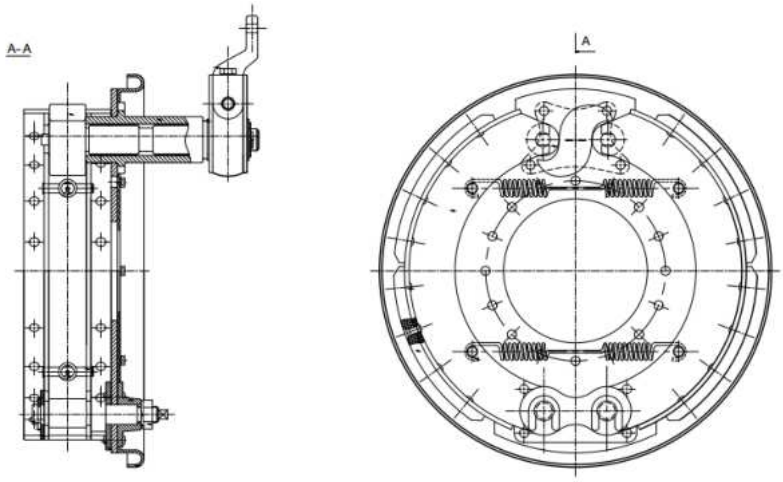
Hình 1. Bố trí chung xe XTC - 02

2. Vai trò và yêu cầu đối với hệ thống phanh khi thiết kế, chế thử, cải hoán

Trước tiên, hệ thống phanh đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo an toàn và hiệu quả hoạt động của xe thiết giáp bánh lốp, như: Kiểm soát tốc độ (cho phép xe giảm tốc độ hoặc dừng hẳn một cách an toàn, đặc biệt trong các tình huống khẩn cấp hoặc địa hình hiểm trở), tăng tính ổn định (giữ xe ổn định khi di chuyển trên các bề mặt không đồng đều, đảm bảo khả năng điều khiển tốt và tránh lật xe), hỗ trợ cơ động (cung cấp khả năng phanh hiệu quả ngay cả khi xe đang chở tải trọng lớn, giúp tối ưu hóa khả năng cơ động trong môi trường chiến đấu), đảm bảo an toàn cho binh lính và hoạt động tin cậy trong mọi điều kiện.

Về yêu cầu đối với hệ thống phanh như hiệu quả phanh cao (đảm bảo khả năng giảm tốc và dừng xe trong khoảng cách an toàn, ngay cả khi tải trọng lớn), độ bền (khả năng làm việc ổn định trong điều kiện khắc nghiệt như bùn lầy, nước, bụi bẩn), và khả năng bảo trì, dễ dàng sửa chữa và thay thế các bộ phận khi cần thiết trong điều kiện thực địa.

Trên cơ sở vai trò và yêu cầu đối với hệ thống phanh trên phương tiện cơ giới, bài báo đi phân tích và lựa chọn hệ thống phanh phù hợp với tiêu chí của nhà sử dụng đưa ra. Nghiên cứu được thực hiện trên dòng xe thiết giáp bánh lốp chở quân 4×4 với tải trọng 12 tấn. Phương án sử dụng phanh tang trống đặt như nhau tại tất cả các bánh xe, kết hợp với dẫn động khí nén và cơ cấu guốc phanh có chốt tựa cùng phía, dịch chuyển các guốc như nhau là lựa chọn phù hợp cho hệ thống phanh. Trong khuôn khổ bài báo, chỉ thực hiện nghiên cứu lý thuyết: thiết kế chi tiết cơ cấu phanh tang trống, bao gồm tính toán lực phanh, mô men phanh, kích thước các chi tiết chính và tiến hành kiểm nghiệm, khảo sát ảnh hưởng của yếu tố kết cấu đến hiệu quả phanh.



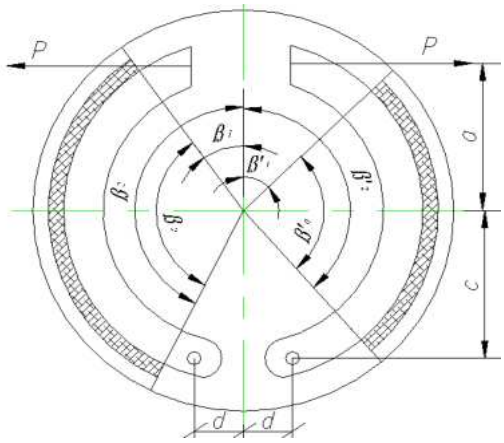
Hình 2. Cơ cấu phanh tang trống trên xe XTC - 02

3. Thiết kế cơ cấu phanh tang trống

3.1. Mục đích, nhiệm vụ và lựa chọn các thông số

Mục đích của tính toán thiết kế cơ cấu phanh là xác định các kích thước và thông số cơ bản của cơ cấu phanh nhằm thỏa mãn các yêu cầu về hiệu quả phanh ô tô.

Nhiệm vụ tính toán thiết kế là đi xác định mô men phanh cần sinh ra ở các cơ cấu phanh (CCP); chọn dạng cơ cấu phanh và các kích thước cơ bản của cơ cấu phanh như: Bán kính tang phanh (r_t), khoảng cách từ tâm cơ cấu phanh đến cam phanh (a), khoảng cách từ tâm cơ cấu phanh tới chốt tựa (c), hệ số ma sát (μ), chiều rộng tấm ma sát (b)…và xác định lực đẩy cần thiết tác dụng lên guốc phanh (P_1, P_2).



Hình 3. Sơ đồ tính toán cơ cấu phanh

* Số liệu đầu vào:

Bảng 1. Các thông số ban đầu

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Trọng lượng tác dụng lên toàn bộ xe	G	12000	KG
Trọng lượng phân bố lên cầu trước	G_1	5500	KG
Trọng lượng phân bố lên cầu sau	G_2	6500	KG
Chiều cao trọng tâm xe	h_g	1,25	m
Chiều dài cơ sở của xe	L	4,18	m
Vận tốc chuyển động khi bắt đầu phanh	V_{Pmax}	40	km/h
Bán kính bánh xe	r_k	0,254	m
Bán kính tang phanh	r_t	0,24	m
Chiều rộng má phanh	b	0,14	m
Khoảng cách từ tâm cơ cấu phanh đến cam	a	0,18	m
Khoảng cách từ tâm CCP đến chốt tựa guốc	c	0,18	m
Khoảng cách từ tâm CCP đến chốt tựa chung	d	0,03	m
Hệ số ma sát giữa má phanh và tang phanh	μ	0,3	

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Nhiệt độ môi trường	T_1	25 ± 3	^oC
Nhiệt dung riêng vật liệu tang phanh	C_t	500	J/kg.^oC
Hệ số bám giữa bánh xe và đường	φ	0,7	
Cánh tay đòn lực P_1, P_2	d_k	0,015	m
Cơ cấu phanh bánh trước:			
Góc từ trục đứng đến đầu tấm ma sát trước	β_{T1}	33	độ
Góc từ trục đứng đến cuối tấm ma sát trước	β_{T2}	147	độ
Góc từ trục đứng đến đầu tấm ma sát sau	β_{S1}	33	độ
Góc từ trục đứng đến cuối tấm ma sát sau	β_{S2}	147	độ
Cơ cấu phanh bánh sau:			
Góc từ trục đứng đến đầu tấm ma sát trước	β_{T1}	33	độ
Góc từ trục đứng đến cuối tấm ma sát trước	β_{T2}	147	độ
Góc từ trục đứng đến đầu tấm ma sát sau	β_{S1}	25	độ
Góc từ trục đứng đến cuối tấm ma sát sau	β_{S2}	155	độ

3.2. Tính lực đẩy từ cơ cấu doãng má phanh lên guốc phanh

Các lực này xác định trên cơ sở biết được áp suất khí nén đưa đến bầu phanh và diện tích màng bầu phanh. Lực do bầu phanh sinh ra tỷ lệ với áp suất khí nén đưa đến bầu phanh. Theo tài liệu "Hướng dẫn thiết kế môn học" ta có áp suất khi nén đi vào bầu phanh xe: p = 6,5 - 8,0(kg/cm^2). Với p = 7,5 (kg/cm^2).

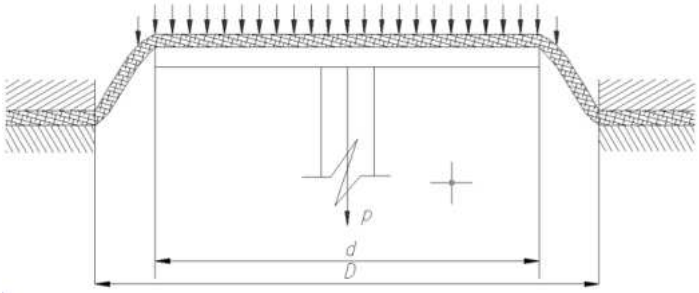
Gọi lực tác dụng lên guốc là P. Theo công thức [II.4] sách "Hướng dẫn thiết kế môn học" ta có:

$P = p_0.S_M$

Trong đó:

S_M - Diện tích làm việc của bầu phanh (cm^2)

p_0 - Áp suất trong bầu phanh (N/cm^2)



Hình 4. Sơ đồ tính toán lực do bầu phanh sinh ra

$S_M = \frac{\pi}{12}(D^2 + D.d + d^2)$. Thay D = 11 (cm); d = 7 (cm), ta có lực đẩy tác dụng lên các guốc phanh là: P = 490 (kg).

Momen xoắn cần thiết M_t sinh ra trên các trục quay để trực tiếp ép các guốc phanh với truyền động cơ khí và cam có cánh tay đòn cố định được xác định theo công thức:

$$M_t = (P_1 + P_2)\ \frac{d_k}{2} \quad \Leftrightarrow \quad P_1 + P_2 = \frac{2M_t}{d_k}$$

Trong đó: d_k – cánh tay đòn, d_k = 0,015 (m)

P_1, P_2: lực ép cần thiết tác dụng lên guốc phanh trước và sau.

l_k: chiều dài cần cam ép, l_k = 0,125 (m)

$M_t = P.\ l_k = 490.0{,}125 = 61{,}25$ (KGm). Vậy ta có: $P_1 + P_2 = \frac{2M_t}{d_k} = 8166$ (KG)

Mặt khác: $$\frac{P_1}{P_2} = \frac{c.(\cos\delta + \mu\sin\delta) - \mu.\rho}{c.(\cos\delta - \mu\sin\delta) + \mu.\rho} \qquad (3.1)$$

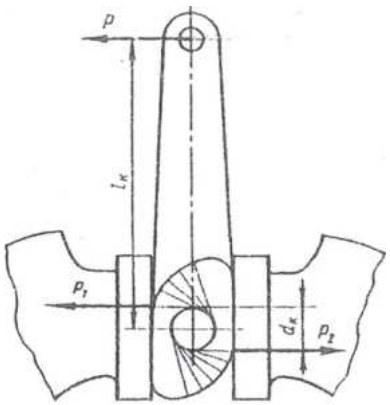
Trong đó:

c : Khoảng cách từ tâm cơ cấu phanh đến tâm chốt tựa, c = 0,018 (m).

δ : Góc hợp bởi N_1 và trục thẳng đứng

μ : Hệ số ma sát

ρ : Khoảng cách từ trục T_1 tới tâm O



Hình 5. Sơ đồ tính toán tỷ số truyền cam ép

Khi áp suất trên bề mặt má phanh phân bố theo quy luật hình sin, theo công thức I.38 sách "Hướng dẫn thiết kế môn học" ta có:

$$P = P_{max}.\sin\beta$$

$$\rho = \frac{2r_t.(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)}{\sqrt{\beta_0^2 + \sin^2\beta_0 - 2\beta_0.\sin\beta_0.\cos(\beta_1 + \beta_2)}}$$

Thay số vào ta có:

$$\rho = 0{,}3$$

Theo công thức I.39 sách "Hướng dẫn thiết kế môn học":

$$tg\delta = \frac{\cos 2\beta_1 - \cos 2\beta_2}{2\beta_0 + \sin 2\beta_1 - \sin 2\beta_2}$$

Thay số vào ta có:

$$\delta = 0^0$$

Thay tất cả các giá trị trên vào [3.4] ta được :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{0,18.(1+0) - 0,3.0,03}{0,18.(1-0) + 0,3.0,03} = 0,905$$

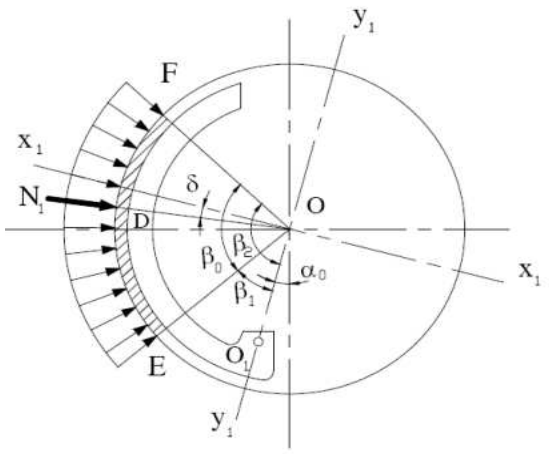
Từ đó, ta tính được: $P_1 = 3880$ (KG); $P_2 = 4286$ (KG).

3.3. Xác định mômen phanh thực tế và mômen phanh yêu cầu của cơ cấu phanh

3.3.1. Xác định mô men phanh thực tế

Do có các lực tác dụng lên má phanh P_1, P_2,các má phanh được đẩy ra ép sát vào tang phanh sinh ra lực má sát. Mômen ma sát giữa má phanh và tang phanh còn gọi là mômen phanh có tác dụng làm cho bánh xe quay chậm lại và thực hiện quá trình phanh xe.

Theo lý thuyết, để xác định được mômen phanh cần tìm ra quy luật phân bố áp suất trên cung má phanh và tùy theo sự thừa nhận quy luật phân bố áp suất khác nhau, ta đưa ra các công thức tính toán.



Hình 6. Phân bố áp suất trên cơ cấu phanh

Thừa nhận quy luật phân bố áp suất trên cung má phanh là quy luật phân bố hình sin ($q = q_{max}\sin\beta$) với sự phân bố áp suất Hình 6, ta có giả thuyết tính toán như sau:

Khi phanh, áp suất tại một điểm bất kỳ trên cung má phanh tỷ lệ với biến dạng hướng kính của điểm ấy, và bỏ qua biến dạng của guốc phanh và tang phanh mà chỉ có tấm ma sát bị biến dạng khi phanh.

a) Tính tọa độ điểm đặt hợp lực tác dụng lên má phanh (δ, ρ)

- Xét cho cơ cấu phanh bánh trước: từ mục (3.2) ta đã tính được:

$\delta = \delta_1 = 0^0$ và $\rho = 0,3$ (m).

- Cơ cấu phanh bánh sau:

+ Guốc trước: $\beta_1 = 33^0$; $\beta_2 = 147^0$; $\beta_0 = 114^0$

+ Guốc sau: $\beta_1 = 25^0$; $\beta_2 = 155^0$; $\beta_0 = 130^0$

Các thông số như cơ cấu phanh bánh trước do đó ta có được: $\delta_2 = \delta_1 = 0^0$

Thay các giá trị, ta được:

$$tg\delta_2 = \frac{c\cos(2.25^0) - c\cos(2.155^0)}{\frac{2.130.3,14}{180} - \sin(2.155^0) + \sin(2.25^0)} = 0$$

Xác định bán kính từ điểm đặt lực N tới tâm O, ta có:

$$\rho = \frac{2r_t.(c\cos\beta_1 - c\cos\beta_2)}{\sqrt{\beta_0^2 + \sin^2\beta_0 - 2\beta_0.\sin\beta_0.c\cos(\beta_1 + \beta_2)}}$$

- Với CCP bánh trước: guốc trước và sau như nhau nên ta có: $\rho = \rho_1 = 0,3$ (m).

- Với CCP bánh sau:

+ Đối với guốc trước: Thông số như CCP bánh trước nên ta được $\rho_2 = \rho_1 = 0,3$ (m)

+ Guốc sau: $\beta_1 = 25^0$; $\beta_2 = 155^0$; $\beta_0 = 130^0$; $r_t = 0,24$ (m)

Thay các giá trị vào công thức ta được:

$$\rho_2 = \frac{2.0,24.(c\cos 25^0 - c\cos 155^0)}{\sqrt{\frac{130.3,14}{180} + \sin^2(130^0) - \frac{2.130.3,14}{180}.\sin(130^0).c\cos(25^0 + 155^0)}}$$

$\rho_2 = 0,362$ (m)

b) Xác định mômen phanh do cơ cấu phanh sinh ra

- Đối với cơ cấu phanh bánh trước: Mômen phanh bánh trước được xác định theo công thức I.32 tài liệu "Hướng dẫn thiết kế môn học" ta có:

$$M_p = (a+c).\rho.\mu.\left(\frac{p_1}{\frac{c}{\cos\theta}(\cos\delta + \mu\sin\delta) - \mu\delta} + \frac{p_2}{\frac{c}{\cos\theta}(\cos\delta + \mu\sin\delta) + \mu\delta}\right)$$

Trong đó:

+ μ hệ số ma sát giữa má phanh và tang phanh. Tham khảo mẫu xe Kamaz - 43502, vật liệu má phanh là Ferado đồng và vật liệu tang phanh bằng gang, nên theo tài liệu ta chọn $\mu = 0,3$; vì vậy ta có $tg\theta = 0,3 \rightarrow \theta = 16,7^0$.

+ P_1, P_2 lực tác dụng lên guốc phanh trước và sau theo tính toán ở phần trên ta được $P_1 = 3880$ (KG); $P_2 = 4286$ (KG).

+ Cầu trước có: $\theta = 16,7^0$; $\delta = 0$; $\rho = 0,3$ (m); $a = c = 0,18$ (m). Thay các giá trị vào công thức tính mômen phanh bánh trước ta được:

$M_{p1} = 1416$ (KGm).

- Đối với cơ cấu phanh bánh sau:

Tương tự như trên ta có: $\mu = 0,3$; $\rho_2 = 0,362$ (m); $a = c = 0,18$ (m);

$\theta = 16,7^0$; $\delta_2 = 0^0$. Thay các giá vào công thức trên ta có:

$M_{p2} = 1692$ (KGm).

Vậy mômen thực tế toàn xe là:

$M_p = M_{p1} + M_{p2} = 1416 + 1692 = 3108$ (KGm).

3.3.2. Mômen phanh yêu cầu của cơ cấu phanh

Mô men phanh sinh ra ở các cơ cấu phanh của ô tô phải đảm bảo giảm tốc độ hoặc dừng ô tô hoàn toàn với gia tốc chậm dần trong giới hạn cho phép.

Từ hình 7, ta có:

$$a = \frac{G_2.L}{G} = \frac{6500.4,18}{12000} = 2,264 \quad (m)$$

$$b = \frac{G_1.L}{G} = \frac{5500.4,18}{12000} = 1,916 \quad (m)$$

Ta có hệ số phân bố tải trọng lên cầu trước và cầu sau tương ứng là:

$$m_1 = 1 + \frac{J_{pmax}.h_g}{g.b} = 1 + \frac{6.1,25}{9,81.1,916} = 1,399$$

$$m_2 = 1 - \frac{J_{pmax}.h_g}{g.a} = 1 - \frac{6.1,25}{9,81.2,264} = 0,663$$

Trong đó:

h_g: chiều cao trọng tâm xe;

g: gia tốc trọng trường;

$_{pmax}$: gia tốc phanh cực đại;

$_1$, m_2: hệ số phân bố tải trọng tương ứng lên cầu trước và cầu sau khi phanh.

Lực phanh cực đại có thể tác dụng lên một bánh xe ở các cầu là:

- Đối với cầu trước:

$$P_{p1} = \frac{G_1}{2} \cdot m_1 \cdot \varphi = \frac{6500}{2} \cdot 1,399 \cdot 0,7 = 3411 \text{ (KG)}$$

- Đối với cầu sau:

$$P_{p2} = \frac{G_2}{2} \cdot m_2 \cdot \varphi = \frac{5500}{2} \cdot 0,663 \cdot 0,7 = 1368 \text{ (N)}$$

Bán kính tính toán của bánh xe: $r_k = \lambda_1.r$

Trong đó:

r: bán kính tính toán của bánh xe;

λ_1: hệ số biến dạng lốp.

Do bánh xe sử dụng lốp áp suất thấp nên ta có:

$\lambda_1 = 0,93 \ldots 0,935$

Ta chọn: $\lambda_1 = 0,93$

+ Đường kính trong lốp: d = 0,4572 (m)

+ Chiều rộng lốp: B = 0,3048 (m)

Ta có bán kính bánh xe thiết kế:

$$r = \frac{1}{2} \cdot d + B = \frac{1}{2} \cdot d + B = \frac{1}{2} \cdot 0,4572 + 0,3048$$

r = 0,533 (m)

Vậy bán kính tính toán của bánh xe là:

$r_k = \lambda_1 \cdot r = 0,93 \cdot 0,553 = 0,496$ (m)

Do xe XTC - 02 có cơ cấu phanh của hệ thống phanh công tác đặt trực tiếp ở tất cả các bánh xe nên mô men phanh cần sinh ra ở mỗi cơ cấu phanh của một bánh xe ở các cầu là:

Đối với bánh xe cầu trước:

$M_{p1} = P_{p1}.r_k = 3411.0,496 = 1696$ (KGm)

Đối với bánh xe cầu sau:

$M_{p2} = P_{p2}.r_k = 1368.0,496 = 684$ (KGm)

Vậy mô men phanh yêu cầu của toàn xe là:

$M_p = M_{p1} + M_{p2} = 1696 + 684 = 2380$ (KGm)

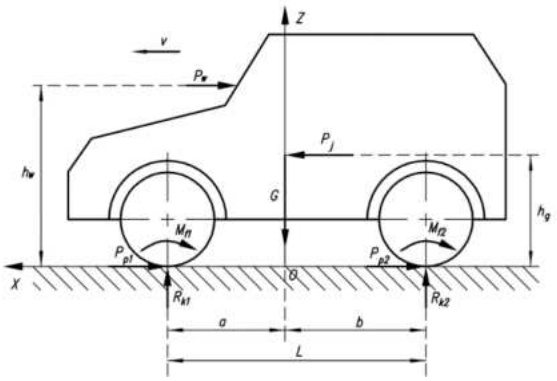
*Nhận xét:

Qua kết quả tính toán ta thấy mô men phanh yêu cầu của toàn xe là 2380 (KGm) và mô men phanh thực tế của toàn xe là 3108 (KGm).

Như vậy mô men phanh thực tế do cơ cấu sinh ra lớn hơn mô men phanh yêu cầu, do đó hệ thống phanh xe thiết giáp bánh lốp XTC - 02 đảm bảo an toàn trong quá trình chuyển động.

4. Khảo sát ảnh hưởng của yếu tố kết cấu đến hiệu quả phanh và thảo luận

4.1. Giả thiết và mô hình khảo sát



Hình 7. Sơ đồ lực tác dụng lên ô tô khi phanh

Khi đang chuyển động trên đường cũng như khi bắt đầu vào chế độ phanh ô tô chịu tác dụng của nhiều nội lực và ngoại lực phức tạp. Để đơn giản và thuận tiện cho việc tính toán, ta đưa ra một số giả thiết sau:

- Khảo sát mô hình phẳng của xe hai cầu, không tính đến ảnh hưởng của chiều rộng bánh xe, các bánh xe của một cầu được coi là một, các bánh xe ở các cầu giống nhau trong khi phanh.

- Toàn bộ khối lượng của ô tô tập trung tại trọng tâm xe. Bánh xe tiếp xúc với mặt đường tại một điểm.

- Cầu xe và khung xe nối cứng với nhau, bỏ qua ảnh hưởng của hệ thống treo.

- Xe chuyển động thẳng không đổi hướng trong khi phanh, trên đường bằng phẳng, nằm ngang, đồng nhất và không biến dạng.

- Hệ số bám của các bánh xe ở các cầu là không đổi và bằng nhau.

- Phản lực thẳng đứng của đường tác dụng lên bánh xe đi qua trục bánh xe. Sự chuyển dời tâm áp lực được kể đến qua mômen cản lăn.

- Khi tính toán được tính cho chế độ phanh có cường độ phanh là lớn nhất (phanh cấp tốc). Không kể đến các yếu tố ảnh hưởng của người lái và kết cấu hệ thống phanh.

Từ các giả thiết trên, sơ đồ khảo sát động lực học quá trình phanh xe được đưa ra như trên hình 7.

Trong đó:

+ P_{P1}, P_{P2} là lực phanh

+ P_j là lực quán tính

+ G là trọng lượng toàn bộ của ôtô

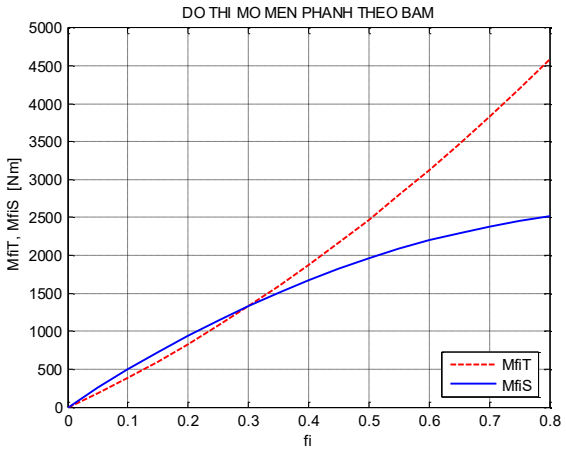
+ R_{k1} và R_{k2} là các phản lực pháp tuyến của đường

+ M_{f1}, M_{f2} là các mô men cản lăn ở các bánh xe cầu trước, bánh xe cầu sau của ôtô.

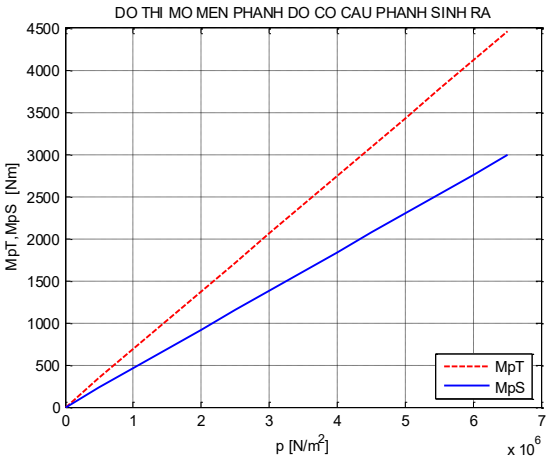
+ P_W là lực cản không khí.

4.2. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của yếu tố kết cấu đến hiệu quả phanh xe XTC - 02 bằng phần mềm Matlab

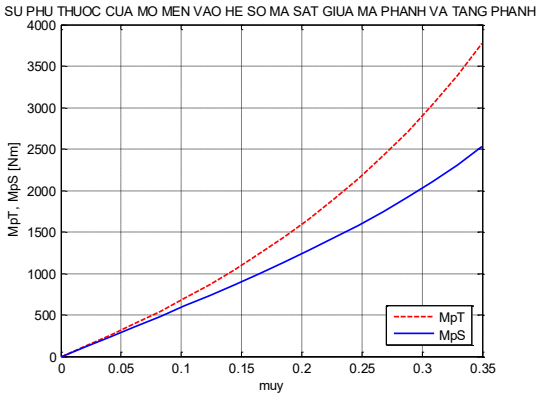
a) Kết quả khảo sát bằng phần mềm Matlab



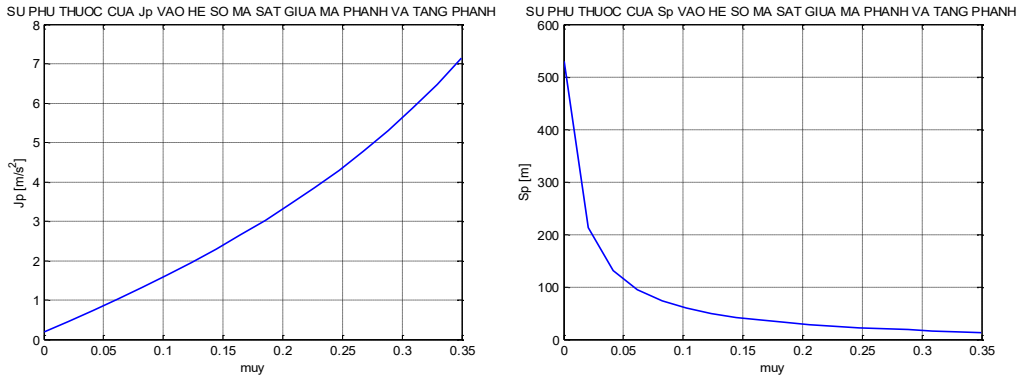
Hình 8. Đồ thị mô men phanh theo bám



Hình 9. Mô men phanh do CCP sinh ra



Hình 10. Sự phụ thuộc của mô men phanh vào hệ số ma sát



Hình 11. Sự phụ thuộc của gia tốc phanh và quãng đường phanh vào hệ số ma sát μ giữa má phanh và tang phanh

* Nhận xét:

Qua đồ thị hình 8 và 9 và bảng kết quả mô men phanh theo điều kiện bám, ta thấy được ở chế độ toàn tải với điều kiện bám tốt (φ = 0,8), mô men phanh cầu sau theo điều kiện bám là $M_{\varphi S}$ = 2513,54 [Nm], nếu mô men phanh do cơ cấu phanh sinh ra ở cầu sau mà lớn hơn giá trị này bánh sau sẽ bị khóa cứng và xảy ra hiện tượng trượt ngang.

Đồ thị hình 10 cho thấy sự phụ thuộc mô men phanh theo hệ số ma sát có dạng phi tuyến. Nếu hệ số ma sát μ càng nhỏ mô men phanh càng nhỏ, dẫn đến việc sử dụng không hết trọng lượng bám ở các cầu, hiệu quả phanh sẽ giảm. Nếu hệ số ma sát μ càng lớn (μ > 0,4) thì mô men phanh do cơ cấu phanh sinh ra càng lớn tuy nhiên mô men phanh mà quá lớn sẽ dẫn đến lực phanh lớn hơn lực bám của bánh xe với mặt đường có thể gây ra hiện tượng khóa cứng bánh xe khi phanh dẫn đến hiện tượng trượt, chẳng hạn như đối với bánh xe cầu sau.

Từ hình 11, đồ thị sự phụ thuộc của gia tốc phanh và quãng đường phanh vào hệ số ma sát μ giữa má phanh và tang phanh có dạng phi tuyến. Khi hệ số ma sát tăng thì gia tốc phanh chậm dần tăng, quãng đường phanh giảm và ngược lại. Nghĩa là nếu μ tăng thì hiệu quả phanh tăng, μ giảm thì hiệu quả phanh giảm. Điều này giải thích trong quá trình sử dụng nếu bề mặt ma sát giữa má phanh và tang phanh bị dính nước hoặc dính dầu thì hệ số ma sát μ giảm đáng kể và hiệu quả phanh giảm đi rõ rệt. Qua đồ thị trên và bảng kết quả khảo sát cho thấy hiệu quả phanh chỉ đạt được theo quy chuẩn QCVN 09:2015/BGTVT khi hệ số ma sát μ = 0,31÷0,4.

Như vậy qua khảo sát hệ thống phanh của xe hoàn toàn đạt yêu cầu, đạt tiêu chuẩn kỹ thuật và hệ thống phanh hoạt động ổn định trong điều kiện khắc nghiệt, đáp ứng được việc đảm bảo an toàn trong quá trình thực hiện nhiệm vụ cũng như quá trình di chuyển trên đường.

b) Thảo luận

- Ưu điểm: Thiết kế đảm bảo độ bền, dễ bảo trì, phù hợp cho các nhiệm vụ quân sự.
- Hạn chế: Cần cải thiện thêm khả năng tản nhiệt của tang trống để tăng tuổi thọ.

5. Kết luận và kiến nghị

a) Kết luận

Nghiên cứu đã thiết kế thành công cơ cấu phanh tang trống cho xe thiết giáp bánh lốp 4x4, đáp ứng các tiêu chuẩn về hiệu quả phanh và độ an toàn. Cơ cấu phanh này phù hợp cho điều kiện làm việc khắc nghiệt và đảm bảo tính linh hoạt trong thực chiến.

b) Kiến nghị

- Tiếp tục nghiên cứu cải tiến vật liệu cho guốc phanh và tang trống.
- Tích hợp hệ thống điều khiển điện tử để nâng cao tính năng phanh.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Hữu Cẩn - Phan Đình Kiên. (1971). *Thiết kế và tính toán ô tô máy kéo (Tập 2)*, Nhà xuất bản Đại học và Trung học chuyên nghiệp, Hà Nội.
2. Nguyễn Hoàng Hải - Nguyễn Trung Dũng - Nguyễn Khắc Điểm (2003). *Lập trình Matlab*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
3. Nguyễn Phúc Hiểu - Vũ Đức Lập. (2002), *Lý thuyết ô tô Quân sự*, Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân, Hà Nội.
4. Vũ Đức Lập. (1998). *Hướng dẫn thiết kế môn học "Kết cấu tính toán ô tô Quân sự" (Tập V: Hệ thống phanh)*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
5. Vũ Đức Lập. (2015). *Kết cấu và tính toán ô tô (Tập 2)*, Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân, Hà Nội.
6. Vũ Đức Lập. (2004). *Sổ tay tra cứu tính năng kỹ thuật ô tô* (Dùng cho sinh viên chuyên ngành ô tô), Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.

Research on designing the drum brake mechanism on wheeled amphibious armored personnel carrier (XTC - 02) manufactured in Vietnam

Abstract: *The XTC - 02 wheeled armored vehicle is a completely new product developed and manufactured by Vietnam. The braking system is one of the most critical systems in a vehicle, ensuring safe operation at high speeds, allowing the driver to control vehicle speed, stop in hazardous situations, and keep the vehicle stationary when needed, especially on slopes. Therefore, along with the design and production of vehicle components and mechanisms, research on the braking system holds both scientific and practical significance.*

Based on the sample braking mechanism of the Kamaz - 43502 vehicle, which features a 4x4 wheel configuration, this study focuses on the theoretical analysis and design of a drum brake mechanism with brake shoes that share a common anchor pin and move symmetrically on both axles. In accordance with the braking system requirements, the research team conducted simulations using MATLAB to evaluate the impact of structural parameters on braking performance. The goal is to ensure the vehicle possesses high maneuverability, flexibility, excellent off-road capability, robust protection, powerful firepower, and versatile combat readiness to meet operational demands.

Keywords: Drum brake mechanism; Brake shoe; Anchor pin; Braking system; Wheeled armored vehicle.

❑

Nghiên cứu ảnh hưởng tỷ số tăng áp khí nạp đến thông số động cơ và trạng thái nhiệt của nhóm piston - xi lanh động cơ diesel tàu thủy

Nguyễn Đắc Lợi[1], Nguyễn Văn Dương[2]

[1]Hệ QLHV Sau đại học, [2]Viện Cơ khí Động lực

Email: nguyendacloi95pl@gmail.com, Tel: 0333123986

Tóm tắt

Bài báo khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tăng áp khí nạp đến thông số động cơ và trạng thái nhiệt của nhóm piston - xi lanh động cơ diesel 4 kỳ 3D12 sử dụng làm máy chính trên tàu thủy. Mô hình tính toán chu trình công tác được thiết lập trên phần mềm GT-Suite, trạng thái nhiệt của piston, xi lanh được xác định thông qua phần mềm Ansys workbench. Kết quả tính toán cho thấy, tăng áp khí nạp mang lại hiệu quả kinh tế cao, hiệu suất và công suất động cơ tăng đáng kể. Tuy nhiên, nhiệt độ piston và xi lanh tăng mạnh. Khi tăng tỷ số tăng áp từ $\Pi_k = 1,0$ lên $\Pi_k = 2,5$ nhiệt độ phần đầu piston tăng trung bình tới gần 150 K, nhiệt độ bề mặt trong của xi lanh tăng trung bình tới gần 100 K, điều này làm giảm đáng kể sức bền của chi tiết và giới hạn bền của vật liệu.

Từ khóa: *Tăng áp khí nạp, trạng thái nhiệt, nhiệt độ, piston, xi lanh.*

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, trước nhu cầu của khách hàng và các quy định nghiêm ngặt về phát thải, việc tăng công suất lít, hiệu suất nhiên liệu và giảm phát thải ở động cơ đốt trong ngày càng được các nhà phát triển động cơ quan tâm. Để tăng công suất lít và hiệu suất nhiên liệu cho các động cơ thế hệ cũ, các phương pháp cường hóa động cơ thường được áp dụng như tăng tỷ số nén [1, 2], tăng hiệu suất phun nhiên liệu [3, 4] và tăng áp khí nạp [5 - 7]. Trong đó, tăng áp khí nạp cho động cơ đốt trong là phương pháp được sử dụng rộng rãi và mang lại hiệu quả cao [5 - 7]. Tuy nhiên, việc tăng áp khí nạp cho các động cơ thế hệ cũ cần phải xem xét tới nhiều yếu tố như khả năng làm mát, sự phù hợp của pha phối khí, độ bền của các chi tiết, khả năng cung cấp nhiên liệu…v.v.

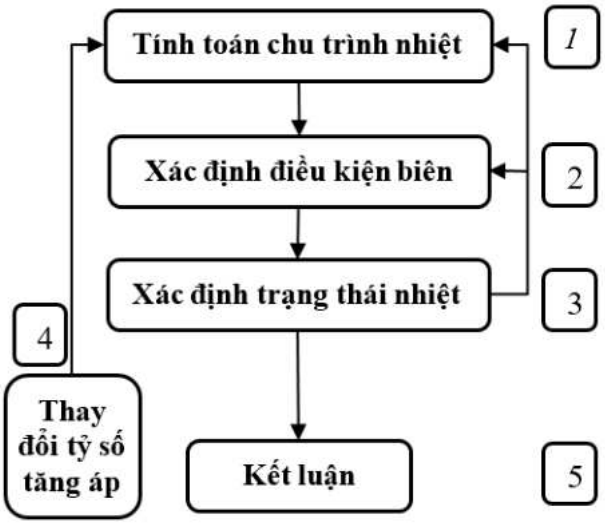
Số lượng lớn bài báo về tăng áp khí nạp đã được công bố [5-8], các nghiên cứu thường tập trung khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tăng áp đến các thông số động cơ như hiệu suất, công suất và lượng phát thải. Saad S. Alrwashdeh và cộng sự nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số tăng áp đến hiệu suất của động cơ đốt trong đánh lửa cưỡng bức [5]. Nguyễn Đức Khánh và các cộng sự nghiên cứu đặc điểm của động cơ diesel thế hệ cũ khi lắp thêm tăng áp [6]. Tác động của tỷ số tăng áp lên hiệu suất động cơ diesel và lượng khí thải nitơ Oxit được xem xét bởi Abdullah Alghafis và cộng sự [7]. Tuy nhiên, việc cường hóa động cơ bằng tăng áp khí nạp hay tăng tỷ số tăng áp khí nạp sẽ làm tăng nhiệt độ và áp suất khí cháy trong buồng đốt. Từ đó làm tăng phụ tải nhiệt lên các chi tiết, đặc biệt là nhóm piston – xi lanh. Mặt khác, theo tính chất của vật liệu, sức bền của vật liệu sẽ giảm khi nhiệt độ tăng lên, đặc biệt ở dải nhiệt độ cao, giới hạn bền của vật liệu bị giảm nghiêm trọng [9, 10]. Vì vậy, sự ảnh hưởng của tỷ số tăng áp khí nạp đến trạng thái ứng suất, nhiệt độ và độ bền của piston – xi lanh cũng cần được xem xét một cách nghiêm túc. Mặt khác, giới hạn chịu đựng của các chi tiết máy, đặc biệt là các chi tiết trong nhóm khuỷu trục thanh truyền cũng là một trong các yếu tố quan trọng để giới hạn tỷ số tăng áp khi cường hóa động cơ bằng phương pháp tăng áp khí nạp.

Trong bài báo này, tác giả tiến hành khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tăng áp khí nạp đến thông số động cơ và trạng thái nhiệt độ của piston - xi lanh động cơ diesel tàu thủy. Kết quả của bài báo là thông số đầu vào để xác định trạng thái ứng suất cơ-nhiệt và đánh giá độ bền của piston, xi lanh khi cường hóa động cơ bằng phương pháp tăng áp khí nạp.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Để khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tăng áp tới trạng thái nhiệt của piston - xi lanh cần xác định được điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt piston - xi lanh tương ứng với từng tỷ số tăng áp của động cơ. Sơ đồ tính toán được xác định như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ tính toán

Trong đó, kết quả nhiệt độ và hệ số trao đổi nhiệt giữa môi chất công tác và thành buồng đốt thu được trong quá trình tính toán chu trình công tác (bước 1) được sử dụng làm dữ liệu đầu vào để tính toán điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt piston - xi lanh (bước 2). Điều kiện biên nhiệt thu được từ bước 2 được sử dụng để tính toán trạng thái nhiệt của piston - xi lanh trong phần mềm Ansys Workbench. Tác giả tiến hành thay đổi tỷ số tăng áp theo các trường hợp khảo sát để xác định ảnh hưởng của nó tới trạng thái nhiệt của piston - xi lanh. Sự thay đổi tỷ số tăng áp được thực hiện ở bước 4. Khi thay đổi tỷ số tăng áp, thông số chu trình nhiệt của động cơ sẽ thay đổi, bao gồm cả nhiệt độ môi chất công tác và hệ số trao đổi nhiệt giữa môi chất công tác với thành buồng đốt, vì vậy cần tính toán lại chu trình công tác và điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt piston - xi lanh.

Ở bước 5, dựa vào kết quả xác định trạng thái nhiệt của piston - xi lanh theo các trường hợp thay đổi tỷ số tăng áp khí nạp để đánh giá ảnh hưởng của tỷ số tăng áp khí nạp tới trạng thái nhiệt của piston - xi lanh.

2.2. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu được tác giả lựa chọn là động cơ diesel 4 kỳ không tăng áp 3D12 sử dụng làm máy chính và máy phát điện trên tàu thủy. Thông số kỹ thuật của động cơ 3D12 được thể hiện như trong bảng 1.

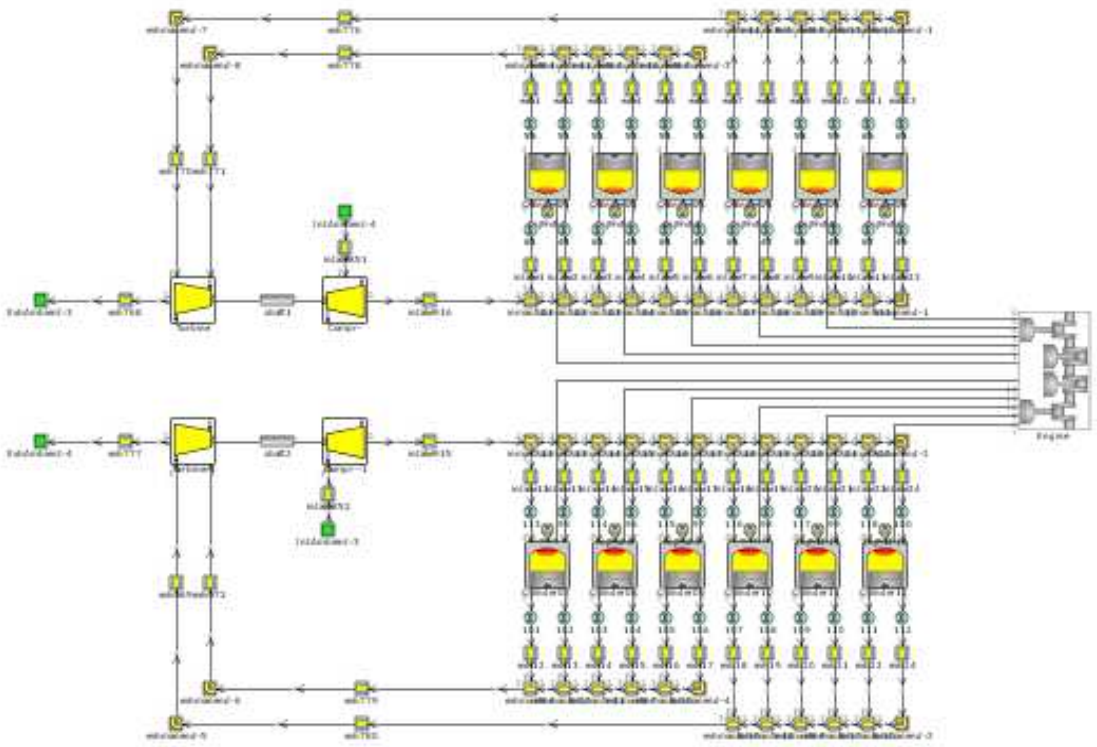
Bảng 1. Các thông số của động cơ 3D12

Thông số	Trị số	Thông số	Trị số
Số xi lanh	12	Góc mở sớm xu páp nạp trước ĐCT, (GQTK)	20 ± 3
Đường kính xi lanh/Hành trình piston (mm/mm)	150/183	Góc đóng muộn xu páp nạp sau ĐCD, (GQTK)	48 ± 3
Thể tích công tác của 1 xi lanh (lít)	38,8	Góc mở sớm xu páp thải trước ĐCD, (GQTK)	48 ± 3
Tỷ số nén	14,5	Góc đóng muộn xu páp thải sau ĐCT, (GQTK)	20 ± 3
Suất tiêu hao nhiên liệu (g/kW.h)	242+12	Công suất định mức (kW)	220
Góc phun sớm nhiên liệu trước điểm chết trên, (GQTK)	28-30	Tốc độ vòng quay trục khuỷu ứng với công suất định mức (v/ph)	1500

2.3. Thiết lập mô hình tính toán chu trình công tác

Mô hình tính toán chu trình công tác của động cơ nguyên bản (động cơ chưa tăng áp) và động cơ sau khi được cường hóa bằng tăng áp khi nạp được thiết lập trong phần mềm GT-Suite. Phần mềm GT-Suite được xây dựng và phát triển bởi hãng Gamma Technologies của Mỹ, với các ưu điểm nổi bật và kết quả có độ tin cậy cao, hiện đã và đang được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng để mô phỏng chu trình công tác của động cơ đốt trong [11, 12].

Mô hình tính toán chu CTCT của động cơ 3D12 sau khi tăng áp khí nạp được trình bày trên hình 2.



Hình 2: Mô hình động cơ 3D12

2.4. Tính chất vật liệu

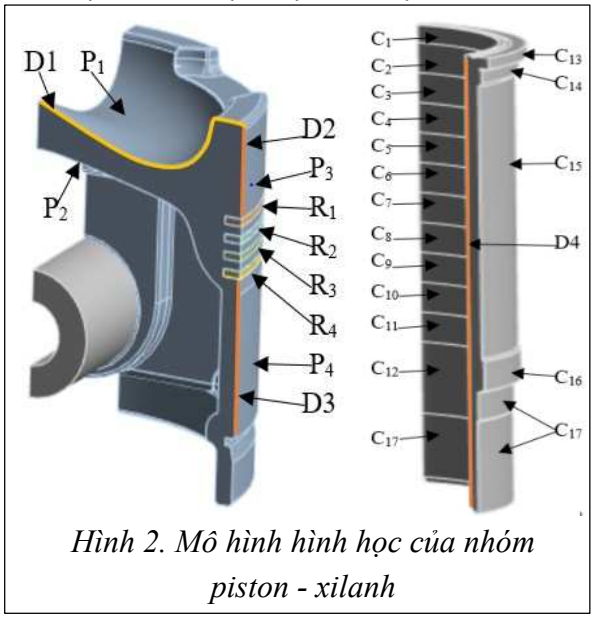
Piston động cơ 3D12 được làm từ hợp kim nhôm AK-4 và xi lanh được làm từ thép chịu nhiệt 38XMIOA. Tính chất nhiệt của nhôm AK-4 và thép chịu nhiệt 38XMIOA được thể hiện như trong bảng 2.

Bảng 2. Tính chất dẫn nhiệt của vật liệu

Nhôm AK-4		**Thép 38 XMIOA**	
Nhiệt độ (^{0}C)	**Hệ số dẫn nhiệt (W/m.^{0}C)**	**Nhiệt độ (^{0}C)**	**Hệ số dẫn nhiệt (W/m.^{0}C)**
20	142,4	20	33
150	148,6	100	33
200	150,7	300	31
250	155	400	20
300	159	500	20

2.5. Xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt piston - xi lanh

Các bề mặt piston - xi lanh cần xác định điều kiện biên nhiệt được thể hiện như trên hình 3. Trong đó, các bề mặt P_2, P_3, P_4 và C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17} được xác định theo [13]. Các bề mặt còn lại bao gồm P_1, R_1, R_2, R_3, R_4 và C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12} được xác định theo phương pháp được giới thiệu trong các báo cáo [14, 15]. Trong đó sử dụng kết hợp giữa Phần mềm tính toán chu trình nhiệt, Modul tính toán điều kiện biên "BCOPC" và Phần mềm mô phỏng FEM để mô hình hóa quá trình truyền nhiệt không gián đoạn giữa các thành phần trong nhóm piston - xi lanh. Phần mềm tính toán chu trình nhiệt sử dụng các công thức bán thực nghiệm để xác định điều kiện biên nhiệt trên bề mặt buồng đốt theo góc quay trục khuỷu, Modul tính toán điều kiện biên "BCOPC" và Phần mềm mô phỏng FEM để giải quyết các vấn đề truyền nhiệt trong nhóm piston - xi lanh.



Hình 2. Mô hình hình học của nhóm piston - xilanh

Trong hình 3: P_1...P_4 – *tương ứng với bề mặt đỉnh piston, bề mặt dưới của đỉnh piston, bề mặt bên của đầu piston, mặt bên của thân piston;* R_1…R_4 – *bề mặt lưng của các xéc măng từ 1 tới 4 ở phần đầu pít tông (R_4 là xéc măng dưới cùng ở trên phần đầu pitson); các bề mặt* C_1…C_{17} *tương ứng với các vùng bề mặt xi lanh. D_1, D_2, D_3, D_4 là các đường khảo sát nhiệt độ piston - xi lanh.*

2.6. Các trường hợp khảo sát

Trong nghiên cứu này, để khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tăng áp khí nạp đến trạng thái nhiệt của piston - xi lanh, sự thay đổi tỷ số tăng áp khí nạp được thực hiện trên mô hình tính

toán chu trình công tác trong phần mềm GT-Suite. Sự thay đổi tỷ số tăng áp khí nạp được lựa chọn để khảo sát bao gồm 4 trường hợp như trong bảng 3. Trong đó, TH1 với Π_k = 1,0 tương ứng với động cơ nguyên bản, và 3 trường hợp còn lại với Π_k = 1,5; Π_k = 2,0; Π_k = 2,5 tương ứng với các tỷ số tăng áp sau khi cường hóa động cơ. Trong các trường hợp thay đổi tỷ số nén, nhiệt độ nước làm mát và tỷ số A/F (tỷ số không khí/nhiên liệu) không thay đổi và bằng với thông số của động cơ nguyên bản ở chế độ công suất định mức.

Bảng 3. Các trường hợp khảo sát sự thay đổi tỷ số tăng áp khí nạp

	TH1	**TH2**	**TH3**	**TH4**
Π_k	1,0	1,5	2,0	2,5

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kiểm nghiệm mô hình

Kết quả tính toán chu trình công tác của động cơ nguyên bản trong phần mềm GT-suite được so sánh với số liệu của nhà sản xuất để hiệu chỉnh và đánh giá độ tin cậy của mô hình.

Các kết quả tính toán chu trình công tác và số liệu của nhà sản xuất động cơ 3D12 được thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4. So sánh kết quả tính toán động cơ nguyên bản và số liệu do nhà sản xuất cung cấp ở chế độ công suất định mức.

	Số liệu của nhà sản xuất	**Kết quả mô phỏng**	**Sai số tương đối (%)**
Công suất lớn nhất (kW)	220	215	2,27
Suất tiêu hao nhiên liệu (g/Kw.h)	254	252	0,8

Kết quả trong bảng 4 cho thấy kết quả từ mô hình tính toán chu trình công tác của động cơ nguyên bản trong phần mềm GT-Suite phù hợp với số liệu do nhà sản xuất cung cấp, các giá trị có sai lệch không quá 5%. Vì vậy, có thể sử dụng mô hình tính toán trong GT-Suite để tiến hành tính toán chu trình công tác của động cơ theo các trường hợp khác nhau.

3.2. Kết quả tính toán điều kiện biên

Kết quả xác định được điều kiện biên nhiệt tương đương theo các bề mặt P_1, R_1,…,R_4, C1,…,C12 theo hình 3 được thể hiện trong bảng 5.

Bảng 5. Kết quả xác định điều kiện biên trên các bề mặt piston và xi lanh

Bề mặt	**TH1 (Π_k = 1,0)**		**TH2 (Π_k = 1,5)**		**TH3 (Π_k = 2,0)**		**TH4 (Π_k = 2,5)**	
	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)
P1	340,8	1089	448,9	1133	535,4	1174	623,3	1204
R1	25000	434,4	25000	468,2	25000	487,6	25000	528,6
R2	17000	433,2	17000	465,7	17000	484	17000	526

Bề mặt	TH1 (Π_k = 1,0)		TH2 (Π_k = 1,5)		TH3 (Π_k = 2,0)		TH4 (Π_k = 2,5)	
	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)
R3	12000	431,9	12000	463,3	12000	480,6	12000	523,5
R4	7000	430,7	7000	461,4	7000	478,2	7000	520,8
C1	340,8	1089	448,9	132,8	535,4	1174	587,8	1236
C2	314,1	1114	423,2	1163	504,5	1205	1108	920,1
C3	845,8	699,9	953	791,6	1029	855,4	1376	846,4
C4	1124	635,2	1229	721,4	1301	781,1	1124	641,5
C5	800,7	696,4	903,9	798	972,5	863,8	1044	931,5
C6	702,2	715,5	803,8	829,9	868,5	898,2	936,3	967,4
C7	649,2	711,1	751,2	845,6	811,4	915,5	875	986,7
C8	612,8	675,4	719,8	848,8	774,6	919,6	833	993,1
C9	580,5	595,3	695,1	830,6	741,1	899	790,6	972,9
C10	565,1	507,3	659,1	740,9	690,2	797,1	723,2	863,2
C11	606,4	474,5	644,8	584,7	658,3	621,9	672,1	673
C12	996,3	464	996,3	498,9	996,3	524,4	996,3	567,2

3.3. Ảnh hưởng của tỷ số tăng áp đến các thông số của động cơ

Kết quả tính toán thông số chu trình công tác của động cơ 3D12 khi thay đổi tỷ số tăng áp được trình bày trong bảng 6.

Bảng 6. Thông số động cơ khi thay đổi tỷ số tăng áp

TT	Tên thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Π_k = 1,0	Π_k = 1,5	Π_k = 2,0	Π_k = 2,5
1	Công suất có ích động cơ	N_e	kW	215,3	301	358	437
2	Hiệu suất có ích	η_e	%	33,0	34,1	34,7	35,8
3	Suất tiêu hao nhiên liệu	g_e	g/kW.h	252,1	246	241	234
4	Momen xoắn	M_e	N.m	1363	1916	2279	2783
5	Áp suất cháy cực đại	P_{max}	bar	65,7	95,8	122,3	150,6
6	Nhiệt độ cháy cực đại	T_{max}	K	1817	1850	1925	1968
7	Tổng lượng nhiệt thất thoát qua bề mặt buồng đốt, kW	Qw	kW	121,8	166	204,4	234,5

Kết quả trên bảng 6 cho thấy sự cải thiện đáng kể về hiệu suất động cơ khi tăng tỷ số tăng áp khí nạp cho động cơ. Cụ thể, khi tăng tỷ số tăng áp khí nạp từ Π_k = 1,0 lên Π_k = 2,5, tại chế độ công suất định mức (1500 v/ph), công suất có ích của động cơ tăng từ 215.3 kW lên 437 kW (tăng hơn 100%), hiệu suất có ích tăng từ 33% lên 35.8% (tăng 2,8%), suất tiêu hao nhiên liệu có ích giảm từ 252.1 g/kW.h xuống 234 g/kW.h (giảm 7,1%) và mô men xoắn tăng từ 1363 N.m lên 2783 N.m (tăng hơn 100%). Điều này chứng tỏ chứng tỏ sự cải thiện đáng kể về công

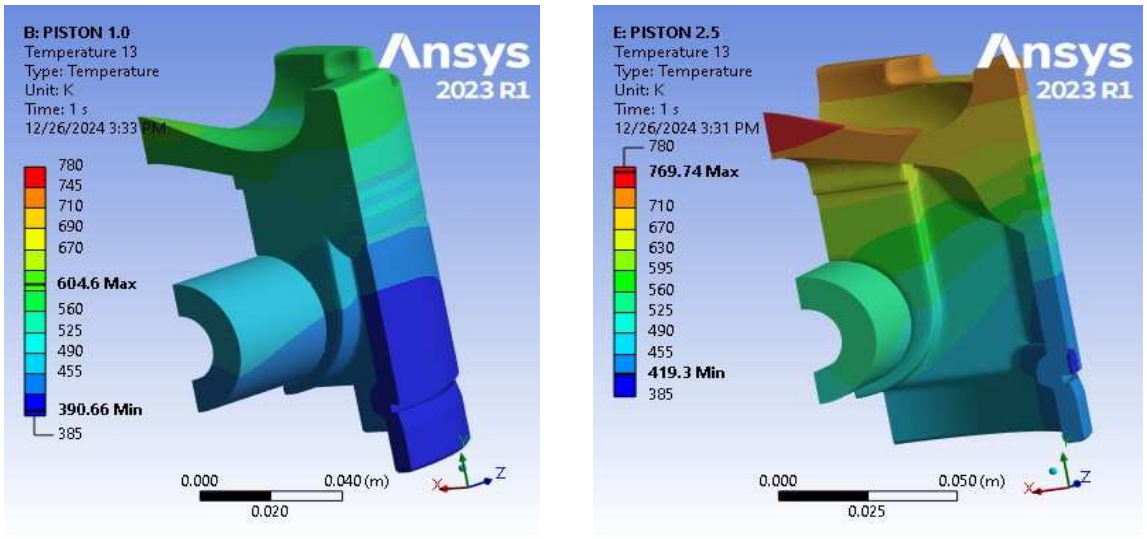
suất và hiệu suất kinh tế của động cơ. Tuy nhiên, áp suất tối đa trong buồng đốt tăng từ 65.7 bar lên 150,6 bar làm tăng tải cơ học lên các chi tiết. Mặc dù tỷ số A/F được giữ nguyên, tuy nhiên, khi tăng tỷ số tăng áp khí nạp, do mật độ môi chất công tác tăng lên và quá trình nén làm tăng nhiệt độ khí nạp, nên nhiệt độ môi chất công tác tăng lên. Nhiệt độ khí cháy tối đa tăng từ 1817K với $\Pi_k = 1,0$ lên 1968K với $\Pi_k = 2,5$. Việc tăng áp suất khí nạp làm tăng mật độ và nhiệt độ của môi chất công tác, điều này làm tăng sự thất thoát nhiệt qua bề mặt buồng đốt (lượng nhiệt truyền vào nắp máy, bề mặt trong của xi lanh, bề mặt đỉnh piston). Tổng lượng nhiệt thất thoát qua bề mặt buồng đốt tăng từ 121.8 kW với $\Pi_k = 1,0$ lên 234.5 kW với $\Pi_k = 2,5$.

3.4. Ảnh hưởng của tỷ số tăng áp khí nạp đến trạng thái nhiệt piston, xi lanh

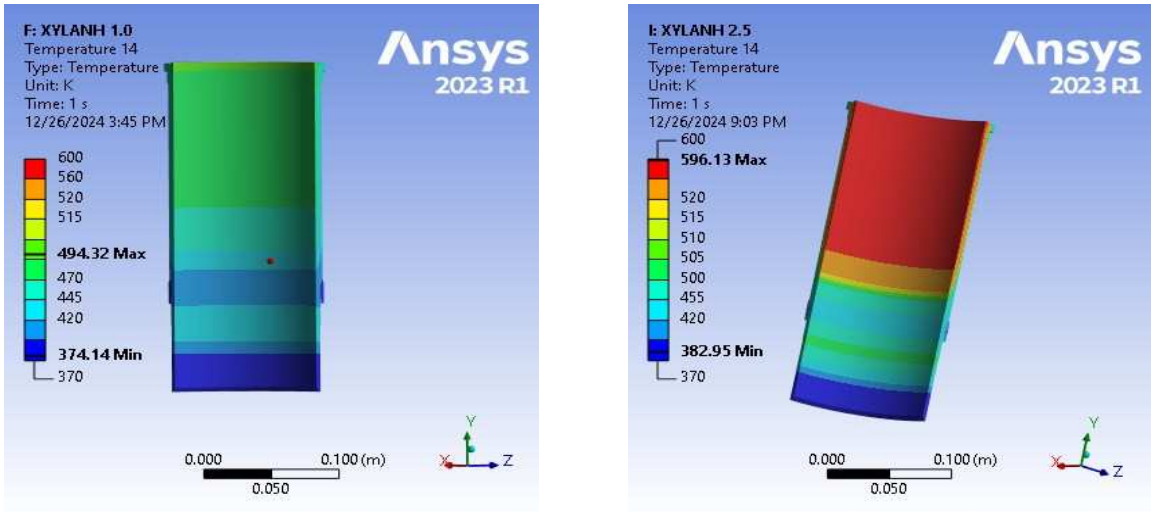
Kết quả trạng thái nhiệt của piston và xi lanh khi tăng tỷ số tăng áp từ $\Pi_k = 1,0$ lên $\Pi_k = 2,5$ được thể hiện trong hình 4 và hình 5.

Nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh piston và bề mặt trong của xi lanh (khu vực tiếp xúc với môi chất công tác) được thể hiện trong bảng 7.

Nhiệt độ piston và xi lanh theo các đường khảo sát D_1, D_2, D_3, D_4 được thể hiện trên hình 3.



Hình 4. Trạng thái nhiệt độ piston với $\Pi_k = 1,0$ và $\Pi_k = 2,5$



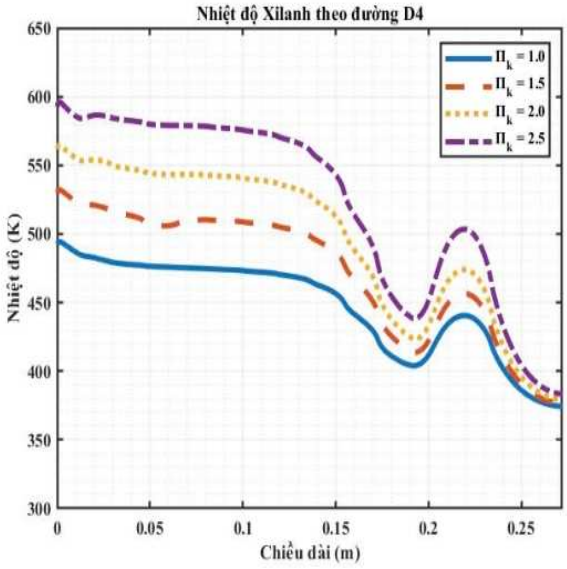
Hình 5. Trạng thái nhiệt độ xi lanh với $\Pi_k = 1,0$ và $\Pi_k = 2,5$

Kết quả trạng thái nhiệt của piston và xi lanh trên hình 4 và hình 5 cho thấy, khi tăng tỷ số tăng áp, nhiệt độ piston và xi lanh tăng lên đáng kể. Khi tăng tỷ số tăng áp từ $\Pi_k = 1,0$ lên $\Pi_k = 2,5$, nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh piston ($\overline{T_{P_1}}$) tăng từ 576.8 K lên 723.2 K, nhiệt độ trung bình trên bề mặt trong của xi lanh ($\overline{T_C}$) tăng từ 453.7 K lên 540.4 K. Theo kết quả phân tích trong phần 3.3 cho thấy, việc tăng tỷ số tăng áp khí nạp làm tăng tổng lượng nhiệt truyền đến bề mặt buồng đốt (tăng từ 121,8 kW với $\Pi_k = 1,0$ lên 234,5 kW với $\Pi_k = 2,5$), tuy nhiên, trong các trường hợp khảo sát, điều kiện làm mát của piston và xi lanh không thay đổi, chính điều này làm cho nhiệt độ piston và xi lanh tăng mạnh.

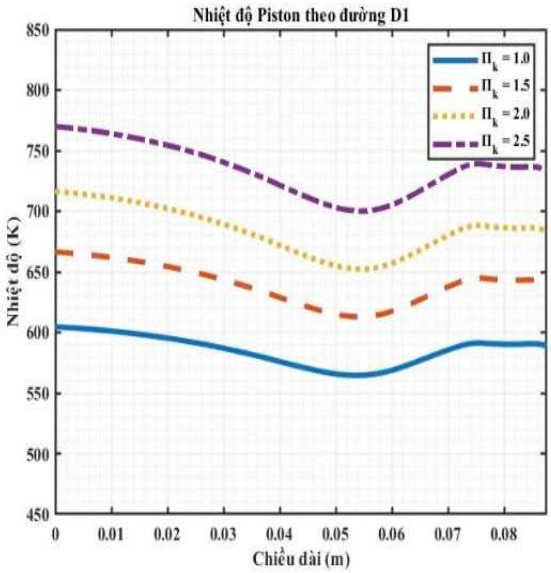
Bảng 7: Nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh piston ($\overline{T_{P_1}}$) và bề mặt trong của xi lanh ($\overline{T_C}$) theo các trường hợp khảo sát.

Tỷ số tăng áp / **Khu vực**	$\Pi_k = 1,0$	$\Pi_k = 1,5$	$\Pi_k = 2,0$	$\Pi_k = 2,5$
Đỉnh piston, $\overline{T_{P_1}}$	576,8	630,4	673,3	723,2
Xi lanh, $\overline{T_C}$	453,7	483,4	513,2	540,4

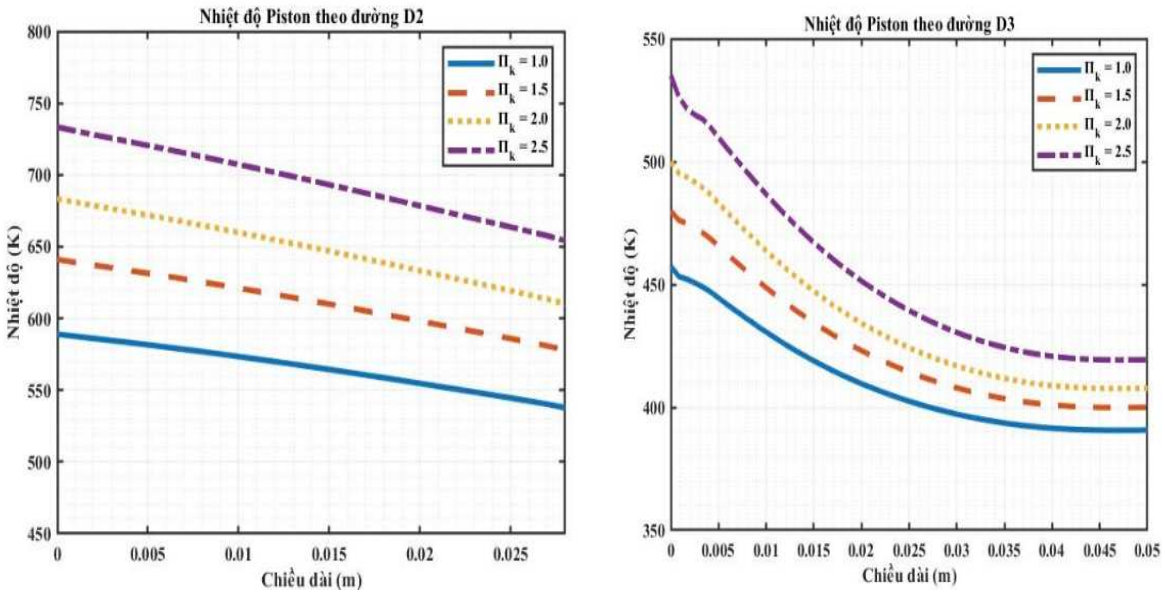
Trong bảng 7: $\overline{T_C}$ - nhiệt độ trung bình bề mặt trong xi lanh, được giới hạn từ điểm chết dưới của piston tới điểm trên cùng của xi lanh, (K).



Hình 6. Nhiệt độ xi lanh



Hình 7. Nhiệt độ piston theo đường D1



Hình 8. Nhiệt độ piston theo đường D2, D3

Trong các hình 6, 7, 8, trục hoành là chiều dài của các đường khảo sát tương ứng với các đương D_1, D_2, D_3, D_4 như trong hình 3.

Kết quả khảo sát nhiệt độ piston trong hình 7,8 cho thấy, khi tăng tỷ số tăng áp khí nạp, nhiệt độ tại các vị trí khảo sát đều tăng mạnh. Khi tỷ số tăng áp khí nạp tăng từ Π_k = 1,0 lên Π_k = 2,5, theo hình 7, nhiệt độ tại vị trí x = 0 mm tương ứng với trung tâm bề mặt đỉnh piston tăng từ 605 K lên 770 K (tăng 165 K), tại vị trí x = 55 mm tương ứng với vùng lõm của bề mặt đỉnh piston, nhiệt độ tăng từ 565 K lên 700 K (tăng 135 K), ở vị trí rìa ngoài của đỉnh piston, tương ứng với x = 87.5 mm, nhiệt độ tăng từ 589 K lên 733 K (tăng 144 K).

Trong hình 8, tại vị trí x = 0 mm, tương ứng với vị trí rìa ngoài của đỉnh piston, khi tỷ số tăng áp khí nạp tăng từ Π_k = 1,0 lên Π_k = 2,5, nhiệt độ tăng 144 K, giá trị gia tăng nhiệt độ này giảm dần về phía các rãnh xéc măng, tại vị trí x = 28 mm, tương ứng với vị trí mép trên của rãnh xéc măng thứ 1, nhiệt độ tăng từ 537 K lên 654 K (tăng 116 K). Khi khảo sát các vị trí về phía đuôi piston, sự gia tăng nhiệt độ giảm xuống (hình 8).

Khảo sát nhiệt độ trên bề mặt trong của xi lanh cho thấy, tỷ số tăng áp khí nạp tăng từ Π_k = 1,0 lên Π_k = 2,5, tại các vị trí gần điểm trên cùng của xi lanh, giá trị nhiệt độ tăng mạnh hơn (tăng khoảng 100 K), giá trị tăng nhiệt độ này được duy trì ổn đỉnh tới vị trí gioăng bao kín nước sau đó giảm dần về phía phần đuôi của xi lanh (hình 6). Tại vị trí đuôi xi lanh, nhiệt độ xi lanh chỉ tăng từ 374 K lên 383 K (tăng 9 K).

Như vậy, khi tăng tỷ số tăng áp, nhiệt độ piston và xi lanh đều tăng mạnh. Tại các vị trí cách xa bề mặt đỉnh piston, nhiệt độ tăng ít hơn. Trên bề mặt đỉnh piston, các vị trí gần các rãnh xéc măng, giá trị gia tăng nhiệt độ thấp hơn, ở các vị trí cách xa rãnh xéc măng (vị trí trung tâm bề mặt đỉnh piston), nhiệt độ tăng mạnh hơn. Ở bề mặt trong của xi lanh, nhiệt độ tại các vùng tiếp xúc với môi chất công tác tăng cao hơn so với các vùng phía đuôi xi lanh.

4. Kết luận

Bài báo khảo sát ảnh hưởng tỷ số tăng áp khí nạp đến thông số động cơ và trạng thái nhiệt của piston - xi lanh trên động cơ diesel tàu thủy 3D12. Kết quả khảo sát cho thấy khi tăng tỷ số

tăng áp thì công suất có ích, mô men xoắn, hiệu suất có ích tăng lên đáng kể, hiệu suất nhiên liệu cũng giảm rõ rệt. Tuy nhiên, việc tăng áp khí nạp làm tăng lượng nhiệt truyền đến các bề mặt buồng đốt, làm tăng nhiệt độ của piston và xi lanh. Nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh piston tăng từ 576.8 K lên 723.2 K, nhiệt độ trung bình trên bề mặt trong của xi lanh tăng từ 453.7 K lên 540.4K. Khảo sát nhiệt độ tại các vị trí trên piston và xi lanh cho thấy, khi tăng tỷ số tăng áp, tại các vị trí cách xa bề mặt đỉnh piston, nhiệt độ tăng ít hơn. Trên bề mặt đỉnh piston, các vị trí gần các rãnh xéc măng, giá trị gia tăng nhiệt độ thấp hơn, ở các vị trí cách xa rãnh xéc măng (vị trí trung tâm bề mặt đỉnh piston), nhiệt độ tăng mạnh hơn. Ở bề mặt trong của xi lanh, nhiệt độ tại các vùng tiếp xúc với môi chất công tác tăng cao hơn so với các vùng phía đuôi xi lanh.

Khi tăng tỷ số tăng áp khí nạp từ $\Pi_k = 1,0$ lên $\Pi_k = 2,5$, nhiệt độ phần đầu piston tăng trung bình tới gần 150 K, nhiệt độ bề mặt trong của xi lanh tăng trung bình tới gần 100 K, điều này làm giảm sức bền của chi tiết và giới hạn bền của vật liệu.

Kết quả bài báo là dữ liệu đầu vào để khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tăng áp khí nạp tới trạng thái ứng suất cơ nhiệt và biến dạng piston - xi lanh.

Tài liệu tham khảo

1. Ş. Yıldızhan, E. Uludamar, M. Ozcanli, and H. Serin, "Evaluation of effects of compression ratio on performance, combustion, emission, noise and vibration characteristics of a VCR diesel engine," *International Journal of Renewable Energy Research,* vol. 8, pp. 90-100, 01/01 2018.
2. T. Aina, C. O. Folayan, and G. Pam, "Influence of compression ratio on the performance characteristics of a spark ignition engine," *Adv Appl Sci Res,* vol. 3, pp. 1915-1922, 01/01 2012.
3. B. Mohan, W. Yang, and S. kiang Chou, "Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—A review," *Renewable Sustainable Energy,* vol. 28, pp. 664-676, 2013.
4. J. Sriyanto, A. Budiman, A. I. Majid, L. Al Huda, L. C. Yuswono, and W. Suyanto, "Effects of Fuel Injection Pressure to Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions of SI Engine," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1273, no. 1, p. 012074: IOP Publishing.
5. S. S. Alrwashdeh, A. a. M. Al-falahat, and T. K. Murtadha, "Effect of Turbocharger Compression Ratio on Performance of the Spark-Ignition Internal Combustion Engine," *Emerging Science Journal,* vol. 6, no. 3, pp. 482-492, 2022.
6. K. N. Duc, H. N. Tien, and V. N. Duy, "A study of operating characteristics of old-generation diesel engines retrofitted with turbochargers," *Arabian Journal for Science Engineering,* vol. 43, pp. 4443-4452, 2018.
7. A. Alghafis, E. A. Raouf, A. Aldahlawi, F. Alassaf, A. Alrsheedi, and A. Alharbi, "Impact of Turbocharger Compressor Pressure Ratio on Diesel Engine Performance and Nitrogen Oxides Emissions," *Universal Journal of Mechanical Engineering,* vol. 8, no. 4, pp. 191-200, 2020.
8. S. A. F. a. M. A. l. Mohamed S. Oun, "THE EFFECT OF TURBOCHARGER PRESSURE AND INTERCOOLER TEMPERATURE ON ENGINE PERFORMANCE," *Journal of Engineering Research (University of Tripoli, Libya),* no. 23, pp. 103-116, 2017.
9. R. D. V. Bukhmirov V.V., Sonyshkova Yu.S., *Reference materials for solving problems in the course "Heat and mass transfer"*. Иваново: GOU VPO "Ivanovo State Energy University named after. V.I. Lenin.", 2009.

10. G. N. G., *Handbook on iron casting*. M.: Mechanical engineering. Leningr. department, 1978.
11. M. N. Nabi, M. Rasul, and P. Gudimetla, "Modelling and simulation of performance and combustion characteristics of diesel engine," *J Energy Procedia,* vol. 160, pp. 662-669, 2019.
12. N. H. H. Nguyễn Trọng Nguyễn, Nguyễn Văn Dương, "MÔ PHỎNG SỐ KHE HỞ NHIỆT GIỮA PIT TÔNG VÀ XI LANH," *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải,* vol. Số đặc biệt, pp. 60-67, 2023.
13. Đ. T. Thắng, *Tính toán sức bền các chi tiết của động cơ đốt trong bằng phương pháp phần tử hữu hạn*. Nxb QĐND, 2016.
14. Duong V. Nguyen and P. X. Pham, "Determining thermal equivalent boundary conditions for piston surfaces," *Transport and Communications Science Journal,* no. Special issue, pp. 452-464, 2023.
15. D. V. Nguyen and P. X. Pham, "Developing a Computational Fluid Dynamics-Finite Element Method Model to Analyze Thermal-Mechanical Stresses in a Heavy-Duty Medium-Speed Diesel Engine Piston During Warm-Up," *ASME Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 146, no. 2, 2023.

Research on the effect of intake pressure boost ratio on engine parameters and thermal conditions of the piston-cylinder assembly in marine diesel engine

Abstract*: A Study on the Impact of Intake Air Boost Pressure Ratio on engine parameters and thermal state of the Piston and Cylinder in a 4-Stroke 3D12 Diesel Engine Used as the Main Engine on Ships.The computational cycle model was developed using GT-Suite software, while the thermal state of the piston and cylinder was analyzed through Ansys Workbench software. The results indicate that increasing the intake air boost pressure significantly improves engine efficiency and power output. However, it also causes a substantial rise in the temperatures of the piston and cylinder. Specifically, the piston crown temperature rises by approximately 150K, while the inner surface temperature of the cylinder increases by around 100K.*

Keywords: Turbocharging, Thermal State, Temperature, Piston, Cylinder.

❑

Đánh giá độ bền các chi tiết chính của phận vận hành xe tăng T- 54B cải tiến

Đồng Văn Mạnh, Cù Xuân Phong
Viện Cơ khí Động lực, Học viện KTQS
*Email: dongvanmanh.89@icloud.com; SĐT: 0896695680

Tóm tắt

Bài báo này tập trung nghiên cứu đánh giá độ bền các cụm chi tiết của phần vận hành xe tăng T - 54B cải tiến. Đây là dòng xe được cải tiến từ xe tăng T - 54B nguyên bản, trong đó với phần vận hành chỉ tiến hành thay thế xích khớp kim loại hở bằng xích khớp kim loại-cao su và thay thế vành răng bánh sao chủ động để phù hợp với xích mới. Các nội dung bao gồm tính toán kiểm bền trục cân bằng và trục xoắn trong hệ thống treo, tính toán kiểm bền xích kim loại-cao su. Kết quả tính toán chỉ ra rằng, mặc dù xe tăng T - 54B cải tiến có trọng lượng tăng lên 2,2 tấn so với xe tăng T - 54B nguyên bản, các cụm chi tiết trong phần vận hành vẫn đảm bảo độ bền, độ tin cậy và tuổi thọ làm việc.

Từ khoá: *T - 54B cải tiến, hệ thống treo, xích, thanh xoắn.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay xe tăng hạng trung T - 54B vẫn đang được trang bị số lượng tương đối lớn trong quân đội ta phục vụ cho các nhiệm vụ huấn luyện, chiến đấu, sẵn sàng chiến đấu. Đây là các xe đã cũ, lạc hậu, do vậy việc khai thác sử dụng gặp nhiều khó khăn, không có vật tư phụ tùng thay thế. Để đảm bảo hoàn thành tốt nhiệm vụ đề ra trong tình hình mới, quân đội ta đã tiến hành cải tiến, nâng cấp xe tăng T - 54B (hình 1) với nhiều hạng mục khác như tích hợp hệ thống điều khiển hỏa lực TIFCS-3B, lắp bảo ôn cho nòng pháo theo công nghệ dẫn và cách nhiệt, tăng công suất động cơ, thay xích mới, lắp giáp phản ứng nổ cho phần mũi xe và xung quanh tháp pháo, thay mới hệ thống thông tin liên lạc [1]. Sau quá trình cải tiến, tính năng chiến đấu của xe tăng T - 54B đã được nâng cao đáng kể so với phiên bản nguyên bản. Những cải tiến này không chỉ giúp xe tăng T - 54B đáp ứng tốt hơn các yêu cầu tác chiến hiện đại mà còn gia tăng đáng kể khả năng sống sót và hiệu quả trong các chiến dịch quân sự. Qua khảo sát thực tế, tổng khối lượng của xe tăng T - 54B cải tiến là 38.7 tấn, tăng 2.2 tấn so với xe T - 54B nguyên bản [2]. Tuy nhiên, phần vận hành của xe, đặc biệt là hệ thống dẫn tiến xích, chỉ được cải tiến một phần. Cụ thể, xe đã được thay thế vành răng bánh chủ động và dải xích, nhưng hệ thống treo vẫn được giữ nguyên như trong thiết kế ban đầu của T - 54B. Do đó việc nghiên cứu đánh giá độ bền phần vận hành xe tăng T - 54B cải tiến là cần thiết.



Hình 1. Xe tăng T - 54B cải tiến

Bài báo này tập trung kiểm bền phần vận hành xe tăng T - 54B cải tiến. Trong đó tập trung vào các cụm chi tiết chính bao gồm trục xoắn, trục cân bằng và mắt xích.

2. Các thông số kỹ thuật chính xe tăng T - 54B cải tiến

Bảng 1 trình bày các thông số chính cho tính toán kiểm bền các chi tiết phần vận hành xe tăng T - 54B cải tiến.

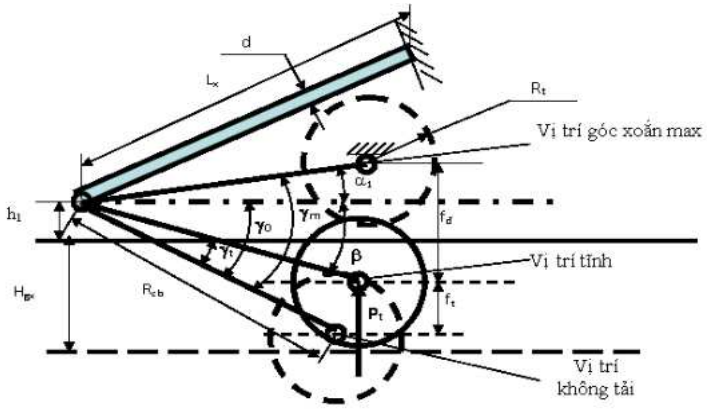
Bảng 1. Các thông số chính xe tăng T - 54B cải tiến [3]

TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng toàn bộ xe	G	387000	N
2	Tổng số bánh tỳ	n	10	Chiếc
3	Chiều dài làm việc của trục xoắn	L_x	1,96	m
4	Đường kính làm việc của trục xoắn.	d_x	0,052	m
5	Mô đun đàn hồi loại 2	G_{dh}	8,5.104	MPa
6	Trọng lượng phần treo	G_{tr}	337500	N
7	Khoảng cách từ tâm bánh tỳ thứ nhất đến trọng tâm xe	L_1	1,94	m
8	Khoảng cách từ tâm bánh tỳ thứ hai đến trọng tâm xe	L_2	0,93	m
9	Khoảng cách từ tâm bánh tỳ thứ ba đến trọng tâm xe	L_3	- 0,095	m
10	Khoảng cách từ tâm bánh tỳ thứ tư đến trọng tâm xe.	L_4	- 0,705	m
11	Khoảng cách từ tâm bánh tỳ thứ năm đến trọng tâm xe.	L_5	- 1,9	m
12	Chiều dài xích tiếp đất.	$L_{tđ}$	3,84	m
13	Chiều dài làm việc của trục cân bằng	R_{cb}	0,29	m
14	Bán kính bánh tỳ	R_t	0,405	m
15	Khoảng sáng gầm xe.	H_{gx}	0,425	m
16	Chiều dài thân xe	L_{tx}	6,2	m
17	Chiều cao thân xe.	H_{tx}	1,53	m
18	Khoảng cách từ đường tâm trục xoắn đến đáy gầm xe.	h_1	0,08	m
19	Khoảng cách từ tâm trục bánh tỳ khi trục cân bằng chạm vào gối giới hạn đến đáy gầm xe	h_2	0,14	m
20	Mô men quán tính độc cực tiết diện ngang:	I_P	$7,89.10^{-7}$	m^4

3. Tính toán kiểm bền trục xoắn và trục cân bằng

3.1. Xây dựng sơ đồ tính toán

Sơ đồ tính toán trong đó các phần tử đàn hồi được quy ước đặt thẳng đứng lên các trục bánh tỳ được biểu diễn trên hình 2 [4]



Hình 2. Sơ đồ tính toán cụm treo xe tăng T - 54B cải tiến

Các ký hiệu trên hình vẽ như sau: H_{gx} – Khoảng sáng gầm xe. H_{gx} = 0,425 [m]; h_1 – Khoảng cách từ tâm trục xoắn đến đáy gầm xe. h_1 = 0,08 [m]; R_{cb} – Chiều dài làm việc của trục cân bằng. R_{cb} = 0,29 [m]; L_x – Chiều dài trục xoắn. L_x = 1,96 [m]; R_t – Bán kính bánh tỳ. R_t = 0,405 [m]; d_x – Đường kính làm việc của trục xoắn; P_t – Tải trọng tĩnh của thân xe tác dụng lên bánh tỳ; f_d – Hành trình động của bánh tỳ; f_t – Hành trình tĩnh của bánh tỳ; α_1 – Góc giữa trục cân bằng và phương ngang khi trục cân bằng chạm vào vấu hạn chế hành trình; β – Góc nghiêng của trục cân bằng so với phương ngang; γ_t – Góc xoắn của trục xoắn khi chịu tải trọng tĩnh; γ_0 – Góc giữa trục cân bằng và phương ngang khi trục cân bằng ở trạng thái tự do; γ_m – Góc xoắn cực đại của trục xoắn

Sự tương đương giữa hai sơ đồ là khi đặt các tải trọng thẳng đứng như nhau lên trục các bánh tỳ của HTT thực cũng như trong sơ đồ tính toán thì độ dịch chuyển của các bánh tỳ đó so với thân xe cũng phải như nhau. Hay nói cách khác là HTT tương đương phải đảm bảo tải trọng tác dụng lên các bánh tỳ như nhau trong mọi trường hợp, ở vị trí tĩnh cũng như vị trí chuyển dời tương đối. Khi tính toán phần tử đàn hồi, ta xây dựng sơ đồ tính toán cho cụm treo trục xoắn đơn theo các tham số hình học cho trước của xe thực.

Tải trọng tĩnh tác dụng lên các bánh tỳ là như nhau và tổng của chúng bằng trọng lượng phần treo, do vậy [5]:

$$P_t = \frac{G_{tr}}{2.n} \quad (1)$$

Tải trọng đó gây ra mô men xoắn, xoắn trục xoắn. Mô men đàn hồi xoắn trục xoắn dưới tác dụng của tải trọng tĩnh là [5]:

$$M_{xt} = P_t.R_{cb}.\cos\beta \quad (2)$$

$$B = \arcsin((H_{gx} + h_1 - R_t)/R_{cb})$$

Khi đó trục xoắn bị xoắn đi một góc γ_t và gây ra mô men đàn hồi chống xoắn $M_{đh}$ có giá trị bằng mô men xoắn trục xoắn.

$$\gamma_t = \frac{M_{xt}.L_x}{G.I_p} = \frac{P_t.R_{cb}.L_x}{G.0,1.d^4}\cos\beta$$

$$f_t = R_{cb}.\left[\sin\left(\gamma_t + \beta\right) - \sin\beta\right] \quad (3)$$

Từ đó độ cứng qui dẫn cụm treo:

$$C_{bi} = \frac{P_t}{f_t} = \frac{G_{tr}}{2.n.f_t} \quad (4)$$

Hành trình cực đại của bánh tỳ f_{bmax}.

$$f_{bmax} = R_{cb}[\sin(\beta + \gamma_t) + \sin\alpha_1] \quad (5)$$

Trong đó $\sin\alpha_1 = (h_2\text{-}h_1)/R_{cb}$

Thay số thu được C_{bi} = 476254 N/m, f_{bmax}=0,26 m

3.2. Tính toán kiểm bền trục xoắn

Lực lớn nhất tác động lên bánh tỳ khi trục cân bằng chạm vấu giới hạn hành trình được xác định theo công thức [5]:

$$P_{bmax} = C_{bi}.f_{bimax} \quad (6)$$

Mô men xoắn lớn nhất:

$$M_{xmax} = P_{bmax}.R_{cb}.\cos\alpha_1 \quad (7)$$

Ứng suất trong trục xoắn khi chịu tải trọng tĩnh:

$$\tau_t = \frac{M_{xt}}{W_x} = \frac{M_{xt}}{0,2.d_x^3} \quad (8)$$

Ứng suất lớn nhất trong trục xoắn:

$$\tau_{max} = \tau_t \frac{f_{b\max}}{f_t} \quad (9)$$

Thay số thu được:

τ_{max}=1021<[τ]=1100

Như vậy trục xoắn đảm bảo điều kiện bền.

Ứng suất chèn dập then hoa:

$$\sigma_d = \frac{8.M_{x\max}}{\lambda.z.(D_2^2 - D_1^2).b} \quad (10)$$

Trong đó: M_{xmax} - Mô men xoắn cực đại xác định theo công thức sau:

$$M_{xmax} = \tau_{max}.W_x = \tau_{max}.0,2.d_x^3$$

Z - số then hoa; D_1, D_2 - Đường kính chân, đường kính đỉnh then hoa: D_1 = 65 mm; D_2 = 69 mm; b - Chiều dài then hoa, b = 82 mm; λ - Hệ số dịch chỉnh tính đến sự phân bố không đều lực vòng theo các răng thường lấy giá trị λ = 0,75.

Thay số vào ta tính được σ_d = 131,75 (MPa) < [σ] = 200 (Mpa) [6]. Từ kết quả tính toán cho thấy then hoa trục xoắn đảm bảo điều kiện bền dập.

3.3. Tính toán kiểm bền trục cân bằng

Tải trọng lớn nhất tác động lên trục cân bằng xuất hiện khi va đập trục cân bằng vào vấu hạn chế, xác định theo giá trị của tải trọng tĩnh P_t có tính đến hệ số tải trọng động. Vị trí các

mặt cắt nguy hiểm đối với trục cân bằng được chỉ ra trên hình 3. Lực lớn nhất tác dụng lên trục cân bằng khi trục cân bằng chạm gối giới hạn hành trình [5]:

$$P_{bmax} = P_t.k_đ \quad (11)$$

$k_đ$ - hệ số tải trọng động tác dụng lên bánh tỳ, $k_đ = 8 \div 10$, chọn $k_đ = 10$. Thay số thu được $P_{bmax} = P_t.k_đ = 337500$ (N)

Với mặt cắt, mô men uốn tại mặt cắt I-I:

$$M_u = P_t.l_1 \quad (12)$$

Ứng suất uốn tại mặt cắt I-I là:

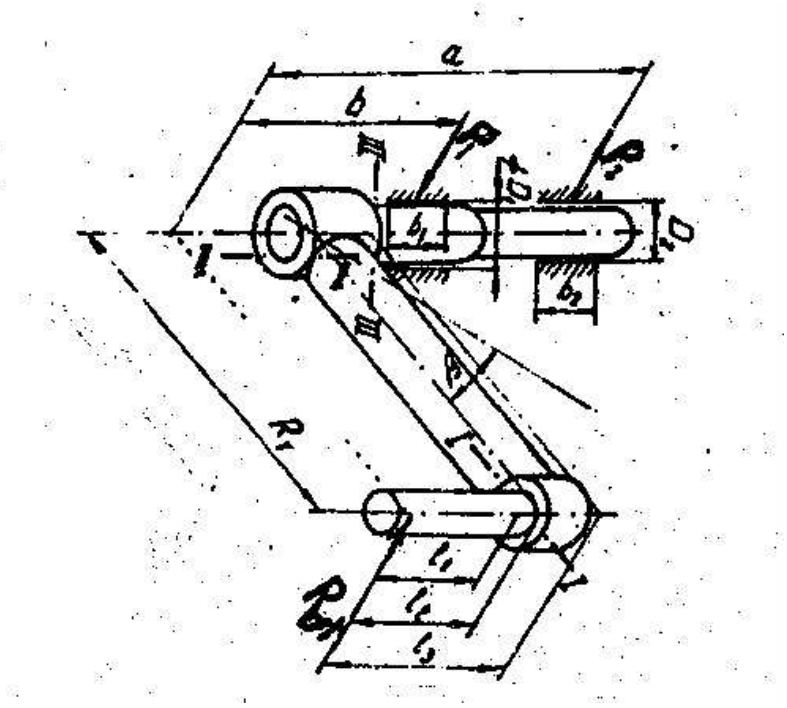
$$\sigma_u = \frac{M_u}{W_u} \quad (13)$$

Trong đó W_u : mô men chống uốn của mặt cắt I-I.

$$W_u = \frac{\pi.(D^4 - d^4)}{32.D}$$

Mặt cắt I-I có dạng hình vành khăn với D = 115 mm, d = 50 mm. Thay số vào (10, 11) thu được $\sigma_u = 352$ MPa

Trục bánh tỳ dập liền khối với trục cân bằng là thép 38XCA có ứng suất cho phép là $[\sigma_u] = 500$ MPa. Như vậy $\sigma_u = 351{,}562\text{MPa} \le [\sigma_u]$



Hình 3. Sơ đồ tính toán trục cân bằng

Với mặt cắt II-II, mô men tính toán tác dụng lên trục cân bằng ở mặt cắt nguy hiểm II-II là chỗ tiếp giáp đầu to trục cân bằng với thân trục cân bằng, mô men tác dụng gồm mô men xoắn M_x và mô men uống M_u. Trong đó [5]:

$$M_x = P_{bmax}.l_2 \quad (14)$$

$$M_u = M_{dh} = \frac{G.I_p}{L_x}.\gamma_i \quad (15)$$

Ứng suất uốn mặt cắt II-II :

$$\sigma_u = \frac{M_u}{Wu} \quad (16)$$

Trong đó $W_u = \frac{b.a^3}{12}.\frac{2}{a} = \frac{b.a^2}{6}$, có thể xem mặt cắt II-II có dạng chữ nhật: a = 140 mm, b = 100 mm.

Ứng suất xoắn tại mặt cắt II-II:

$$\tau = \frac{M_x}{W_x} \quad (17)$$

Trong đó $W_x = 0,2.d_x^3$

Ứng suất tổng hợp mặt cắt II-II:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + 4.\tau^2} \quad (18)$$

Thay số vào các công thức (14, 15, 16, 17, 118) thu được:

$\sigma = 397 < [\sigma] = 500$ (MPa)

Ở mặt cắt nguy hiểm III-III trục cân bằng chịu mô men uốn:

$$M_u = P_{bmax}.l_3 \quad (19)$$

Ứng suất của mặt cắt III-III là:

$$\sigma = \frac{M_u}{W_u} \quad (20)$$

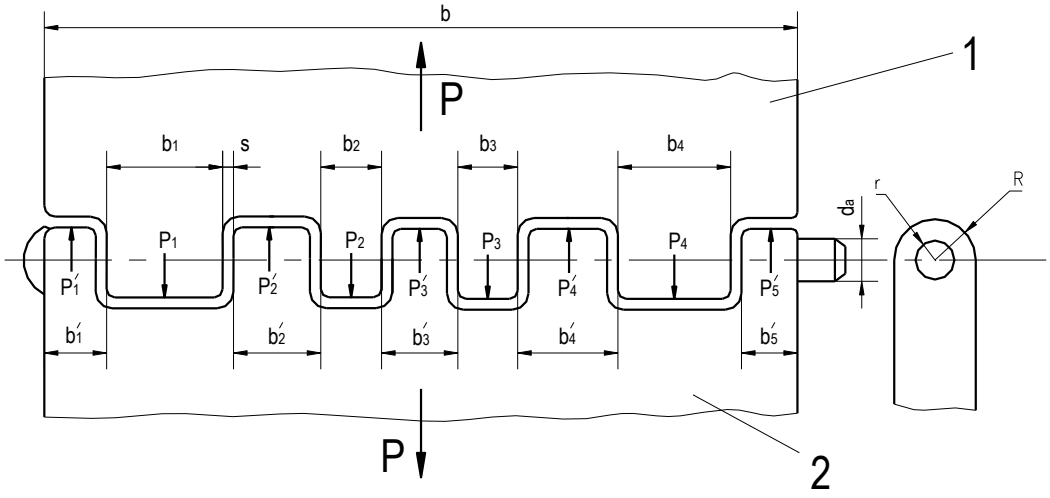
$$W_u = \frac{\pi.(D^4 - d^4)}{32.D}$$

Mặt cắt III-III có dạng hình vành khăn, có đường kính ngoài D = 120 mm, có đường kính trong d = 67 mm. Thay số thu được: $\sigma = 366 < [\sigma] = 500$ (MPa)

Từ kết quả tính toán cho thấy trục cân bằng đảm bảo độ bền cho phép, đảm bảo làm việc tin cậy.

4. Tính toán kiểm bền mắt xích xe tăng T - 54B cải tiến

Độ bền của tai xích xe T - 54B cải tiến được tính toán tương tự như xích có khớp kim loại hở (KLH) có chốt lắp kiểu bơi. Tuy vậy ở xích T - 54B cải tiến sử dụng khớp kim loai- cao su (KL-CS) do không gây mòn chốt và lỗ tai xích nên ứng suất cho phép với độ bền tai xích lớn hơn ở xích khớp KLH nhiều. Ứng suất cho phép [σ] khi kiểm tra khả năng không bị đứt tai xích đạt tới 100 MPa. Khi tính toán, lực kéo trong vòng xích được lấy bằng P=0,65G. Sơ đồ tính toán kiểm tra bền nêu trên hình 4.



Hình 4. Sơ đồ tính toán kiểm tra bền xích xe tăng T - 54B cải tiến

Việc tính toán các ứng suất như trên yêu cầu phải xác định giá trị các lực $P_1 \ldots P_i \ldots P_n$, trên các tai xích của mắt xích bị bao 1 và $P'_1 \ldots P'_{1+1}$ trên các tai xích của mắt xích bao 2. Đây là bài toán siêu tĩnh, để đơn giản có thể giả thiết rằng áp suất trên bề mặt tiếp xúc của chốt và lỗ xích như nhau trong tất cả các tai xích.

Ứng suất kéo gây đứt tai xích:

Với mắt xích bị bao [5]:

$$\sigma = \frac{P}{2(R-r)\sum_{1}^{n} b_i} \tag{21}$$

Với mắt xích bao [5]:

$$\sigma' = \frac{P}{2(R-r)\sum_{1}^{n+1} b'_i} \tag{22}$$

Trong đó: b_i , b'_i- Chiều dài của các tai xích; R, r- Bán kính ngoài và trong của tai xích.

Với của mắt xích xe tăng T - 54B cải tiến, ta có b_1 = 84 mm; b_2 = 74 mm; b_3 = 84 mm; b'_1 = 81 mm; b'_2 = 75 mm; b'_3 = 75 mm; b'_4 = 81mm; R = 27,5 mm; r = 19 mm.

Thay các thông số kết cấu của tai xích T - 54B cải tiến vào các công thức trên ta tính được ứng suất kéo gây đứt tai xích trên mắt xích bị bao và mắt xích bao:

Với mắt xích bị bao: σ = 52 MPa

Với mắt xích bao: σ' = 41 MPa

So sánh ứng suất kéo gây đứt tai xích trên mắt xích bị bao và mắt xích bao với ứng suất cho phép đối với loại vật liệu Г13Л - [б] = 100 Mpa, cho thấy mắt xích đảm bảo độ bền.

5. Kết luận

Bài báo này đã tiến hành kiểm bền các cụm chi tiết chính trong phần vận hành xe tăng T - 54B cải tiến. Nội dung cụ thể gồm tính toán kiểm bền trục xoắn và trục cân bằng trong hệ thống treo và tính toán kiểm bền xích KL - CS trong cơ cấu dẫn tiến xích. Kết quả cho thấy rằng mặc dù khối lượng của xe lên thêm 2,2 tấn, các chi tiết chính trong phận vận hành vẫn đảm bảo độ bền cho phép. Việc đánh giá độ bền của các chi tiết chính trong phận vận hành xe

tăng T - 54B cải tiến một lần nữa khẳng định rằng các bộ phận quan trọng trong hệ thống vận hành vẫn có khả năng chịu tải tốt và duy trì độ bền trong quá trình hoạt động.

Tài liệu tham khảo

1. Tài liệu tập huấn sử dụng xe tăng T - 54B cải tiến, Tổng cục Kỹ thuật, 2020
2. Tài liệu tập huấn bảo trì cấp độ O/I xe tăng T - 54B cải tiến, Tổng cục Kỹ thuật, 2020
3. Cấu tạo và hướng dẫn sử dụng xe tăng T - 54B cải tiến, Tổng cục Kỹ thuật, 2024
4. Lê Trung Dũng, Nguyễn Minh Tân, Cù Xuân Phong. (2023). *Lý thuyết xe xích quân sự*, NXB Quân đội nhân dân.
5. Lê Kỳ Nam, Nguyễn Văn Luận. (1997). *Kết cấu và tính toán xe tăng - thiết giáp*, Học viện KTQS.
6. Võ Văn Trung. (2006). *Hướng dẫn đồ án môn học, Tập 3 - Hệ thống treo*, Học viện KTQS.

Assessment of the Durability of Key Components in the Upgraded T-54B Tank Operation System

Abstract: *This paper focuses on evaluating the durability of components in the operational system of the improved T - 54B tank. The T - 54B is an upgraded version of the original T - 54B tank, with modifications to the operational system, specifically replacing the open metal track links with metal-rubber track links and replacing the drive wheel sprocket to match the new track system. The contents include calculations to check the durability of the balance shaft and torsion shaft in the suspension system, as well as the durability of the metal-rubber track links and the drive wheel in the track drive system. The calculation results show that, despite the improved T - 54B tank having an increased weight of 2.2 tons compared to the original T - 54B, the components in the operational system still meet the requirements for durability, reliability, and service life.*

Keywords: Improved T - 54B; suspension; track; torsion bar

❑

Nghiên cứu thiết kế bố trí chung xe thiết giáp bánh lốp có công thức bánh xe 8 × 8

Khuất Mạnh Hùng[1], Tô Viết Thành[2]

[1]*Hệ Quản lý học viên Sau đại học;* [2]*Viện Cơ khí động lực/ Học viện KTQS*

Email: khuathungmta@gmail.com, Số điện thoại: 0827437866

Tóm tắt

Bài báo này tập trung phân tích, đánh giá và lựa chọn phương án bố trí chung xe thiết giáp bánh lốp chở quân có công thức bánh xe 8 × 8, đồng thời trình bày các kết quả tính toán về thân, vỏ xe theo phương án đã chọn. Kết quả tính toán chỉ ra rằng bố trí khoang động lực phía trước bên phải của xe giúp có thể bố trí cửa mở cho bộ binh phía sau, đảm bảo an toàn cho bộ binh khi đổ bộ lên xuống. Sử dụng động cơ và hộp số mới có công suất lớn hơn, kích thước nhỏ gọn hơn nên giảm được không gian của khoang động lực, tăng không gian cho khoang bộ binh, tăng khả năng cơ động đặc biệt tăng khả năng bơi nước của xe, có không gian để bố trí lắp đặt hệ thống bơi nước tiên tiến giúp tăng tốc độ bơi của xe. Đồng thời qua kết quả nghiên cứu và thử nghiệm về khả năng chống đạn của các loại vỏ thép chế tạo xe thiết giáp theo tiêu chuẩn STANAG 4569 của NATO, tác giả đưa ra lựa chọn vật liệu chế tạo vỏ giáp xe thiết giáp bánh xích là thép XAR 500 PREMIUM.

Từ khóa: Xe thiết giáp; bố trí chung; thân vỏ xe thiết giáp.

1. Đặt vấn đề

Trong quá trình nghiên cứu thiết kế mẫu xe thiết giáp chở quân bánh lốp 4 × 4 (XTC - 02), một số hạn chế đã được chỉ ra, như khả năng vượt địa hình kém, ổn định thấp khi di chuyển trên địa hình phức tạp và khả năng tải trọng hạn chế để lắp đặt vũ khí, khí tài và các hệ thống chuyên dụng khác. Các vấn đề này có thể khắc phục khi thiết kế xe thiết giáp bánh lốp 8x8, sử dụng hệ thống treo độc lập, diện tích tiếp xúc của bánh xe lớn hơn và phân bố khối lượng hợp lý, tăng khả năng bám đường, cơ động và ổn định khi di chuyển trên địa hình phức tạp. Xe cũng có tải trọng lớn hơn, dễ dàng lắp đặt vũ khí, khí tài theo yêu cầu nhiệm vụ. Thiết kế bố trí chung là yếu tố quyết định, ảnh hưởng trực tiếp đến toàn bộ quá trình thiết kế xe. Bố trí chung xe thiết giáp bánh lốp là việc sắp xếp vị trí các thành viên, vũ khí, các cụm hệ thống trên xe đảm bảo các chỉ tiêu tính năng chiến kỹ thuật cao nhất của xe. Bố trí chung xe phải đáp ứng các yêu cầu cơ bản: Sức mạnh hỏa lực; Khả năng cơ động; Khả năng bảo vệ; Thuận tiện cho hoạt động của kíp xe; Thuận tiện trong bảo dưỡng sửa chữa. Cơ sở để tính toán thiết kế bố trí chung là các tính năng chiến kỹ thuật của xe được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Tính năng chiến kỹ thuật của xe thiết giáp bánh lốp 8×8

STT	Thông số xe	Tính năng
1	Trọng lượng chiến đấu (tấn)	16
2	Thành viên kíp xe	11
3	Công suất riêng (KW/tấn)	15-21
4	Kích thước (DxRxC m)	7.580x2.985x2.8
5	Khoảng sáng gầm xe khi đủ tải (mm)	475
6	Tốc độ lớn nhất (km/h)	80
7	Vượt dốc lớn nhất (độ)	31
8	Vượt hào rộng (m)	2.0
9	Vượt tường (m)	0.7
10	Vượt vách đứng lớn nhất (m)	0.5
11	Vận tốc lớn nhất khi bơi tiến (km/h)	9-10

2. Tổng quan về bố trí chung

Bố trí chung xe thiết giáp là sự sắp sếp vị trí các thành viên, vũ khí, các tổng thành, các cụm hệ thống trên xe tăng. Yêu cầu chủ yếu của bố trí chung là đảm bảo các chỉ tiêu tính năng kỹ, chiến thuật cao nhất. Các yêu cầu kỹ, chiến thuật thường mâu thuẫn với nhau, ví dụ để đảm bảo hỏa lực mạnh cần đảm bảo pháo có cỡ nòng lớn, cơ số đạn nhiều. Khả năng bảo vệ tốt cần tăng cường chiều dày vỏ giáp ... các yếu tố này làm tăng trọng lượng của xe dẫn tới làm giảm công suất riêng (giảm tính năng cơ động của xe) [2].

Để đạt được tính năng kỹ, chiến thuật tốt, một mặt các tổng thành các hệ thống được sử dụng trên xe thiết giáp (vũ khí, động cơ, hệ thống truyền lực ...) phải đáp ứng được yêu cầu đạt tính năng tốt nhất với kích thước và trọng lượng nhỏ nhất; song chủ yếu phải đảm bảo có phương án bố trí chung hợp lý, sao cho giảm được kích thước của vỏ giáp, thân xe và tháp pháo.

* Cấu tạo chung xe tăng thiết giáp gồm:

+ Thân xe, tháp pháo

+ Hệ thống truyền lực

+ Phần vận hành

+ Các hệ thống thiết bị đặc biệt

- Hệ thống bảo vệ chống vũ khí nguyên tử
- Hệ thống chống cháy
- Hệ thống xả khói mù
- Cơ cấu bơi

* Bố trí chung bên trong xe tăng thiết giáp:

Xu hướng phổ biến khi thực hiện bố trí chung là phân thể tích bên trong vỏ giáp thành các khoang theo chức năng của các thành viên trên xe.

Bên trong xe thiết giáp bánh xích chia làm các khoang:

- Khoang điều khiển
- Khoang động truyền lực
- Khoang chiến đấu
- Khoang chở bộ binh

+ Khoang điều khiển

Trong khoang điều khiển là nới bố trí vị trí cho lái xe và toàn bộ các cơ cấu điều khiển xe như:

- Các cần lái, cần số
- Bàn đạp ly hợp
- Bàn đạp phanh
- Bàn đạp cung cấp nhiên liệu
- Các thiết bị quan sát
- Các thiết bị kiểm đo (các bảng đồng hồ báo nhiệt độ nước, dầu, đồng hồ vôn – ampe).

+ Khoang chiến đấu

Trong khoang chiến đấu bố trí là nơi bố trí các vị trí trưởng xe, pháo thủ và nạp đạn; hệ thống hỏa lực trên xe (pháo, súng máy đồng trục, có thể có thêm súng máy phòng không, phần lớn cơ số đạn,…); hệ thống quan sát và điều khiển hỏa lực, thiết bị thông tin và nhiều trang thiết bị quan trọng khác.

+ Khoang động - truyền lực

Trong khoang động truyền lực có bố trí: động cơ đốt trong, các cụm, các hệ thống đảm bảo cho động cơ làm việc, ly hợp chính, hộp số, cơ cấu quay vòng, truyền động cạnh…

+ Khoang chở bộ binh

Căn cứ vào yêu cầu kỹ, chiến thuật của xe thiết giáp bánh xích mà có thể bố trí bên trong xe thêm một khoang để chở bộ binh; trong đó, bộ binh có thể quan sát và sử dụng hỏa lực trực tiếp chiến đấu từ bên trong xe (thông qua các lỗ châu mai bố trí ở thành xe).

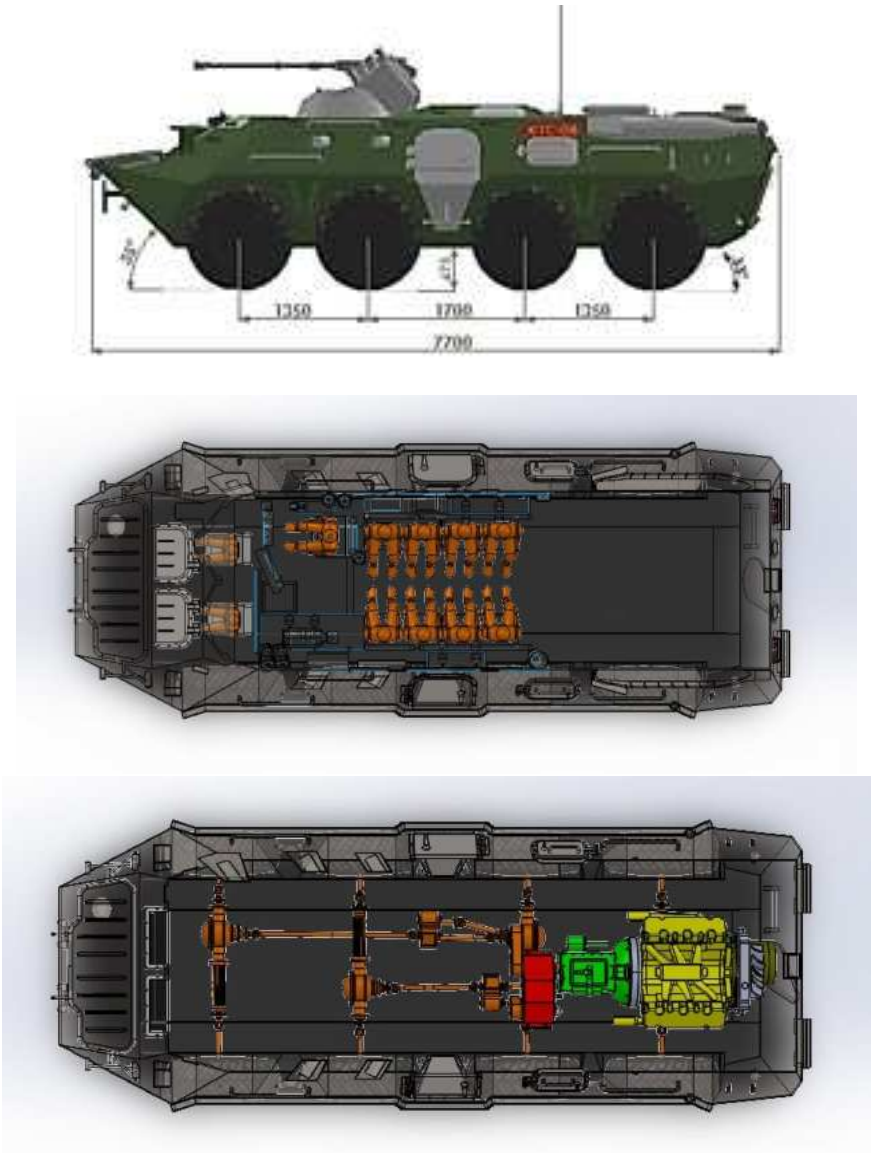
Bên ngoài, xe có thể bố trí các thùng nhiên liệu; thùng dầu nhờn phụ; hệ thống đèn chiếu sáng (các đèn pha, đèn hồng ngoại, đèn kích thước); còi; thùng để dụng cụ, phụ tùng dự trữ; vị trí cố định gỗ tự cứu, mắt xích dự phòng [1].

3. Phân tích, lựa chọn phương án bố trí chung

3.1. Các phương án bố trí chung

3.1.1. Phương án 1:Thiết kế theo nguyên mẫu BTR – 80A

- Khoang động lực bố trí phía sau xe
- Sử dụng động cơ Kamaz – 7403



Hình 1. Phương án bố trí chung 1

- Giữ nguyên động cơ, ly hợp, hộp số

- Giữ nguyên cụm hộp số phân phối; truyền động các đăng và cầu xe

Tuy nhiên mẫu xe BTR - 80A cũng bộc lộ một số hạn chế như:

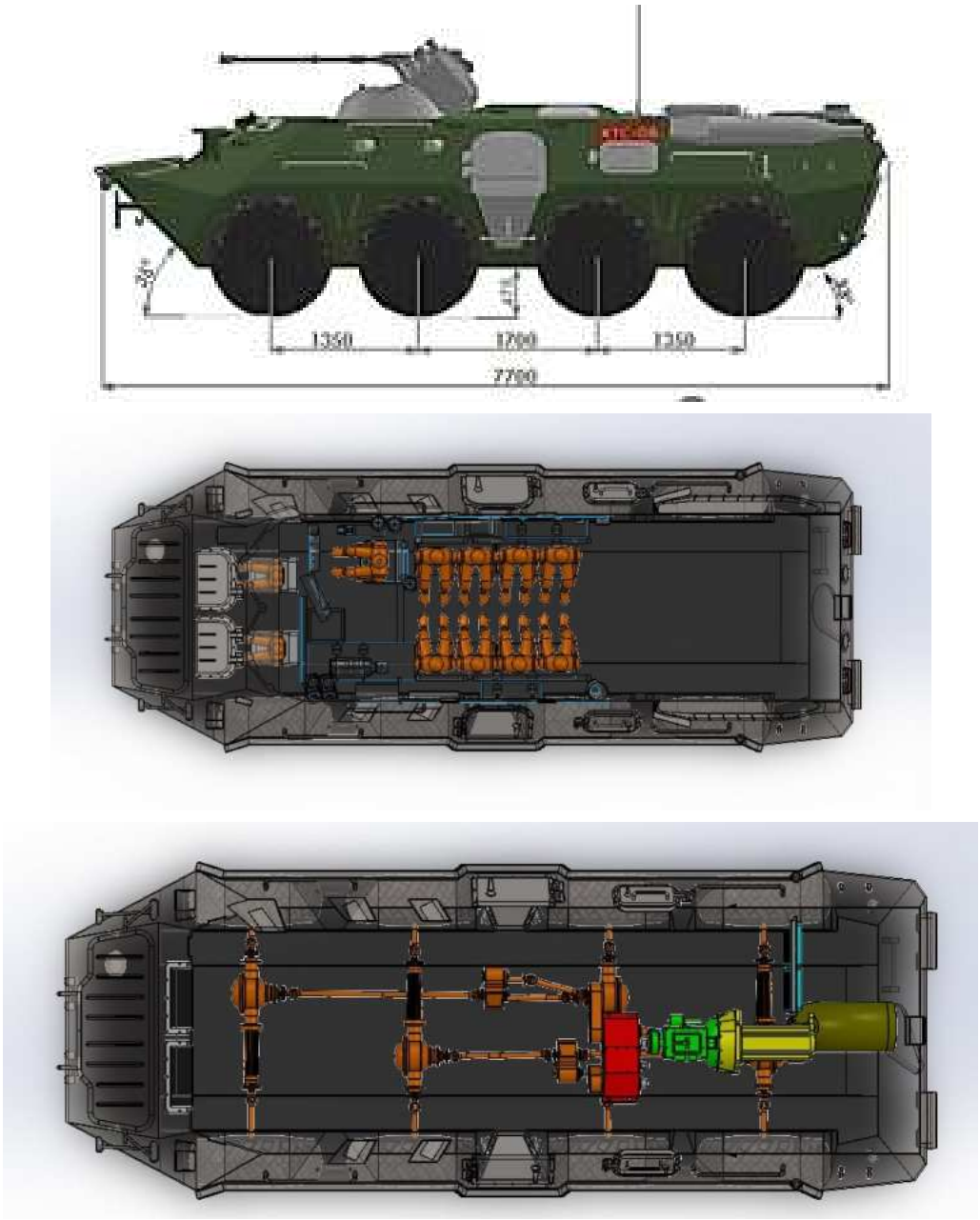
+ Khoang động lực bố trí phía sau xe nên buộc phải mở cửa bên để bộ binh cơ động lên xuống dẫn đến khả năng bảo vệ bộ binh khi đổ bộ hạn chế;

+ Xe sử dụng động cơ KamaZ - 7403 cùng với các hệ thống bổ trợ chiếm không gian lớn ảnh hưởng đến bố trí khoang bộ binh và khoang chiến đấu, công suất 300 mã lực dẫn đến khả năng cơ động chưa tốt đặc biệt khi vượt chướng ngại vật nước và gặp khó khăn khi muốn tích hợp thêm các hệ thống bổ trợ khác theo yêu cầu nhiệm vụ.

3.1.2. Phương án 2: Thiết kế theo nguyên mẫu BTR – 80A

- Khoang động lực bố trí phia sau xe

- Sử dụng động cơ MTU -6R106 và hộp số ZF 6HP 602C



Hình 2. Phương án bố trí chung 2

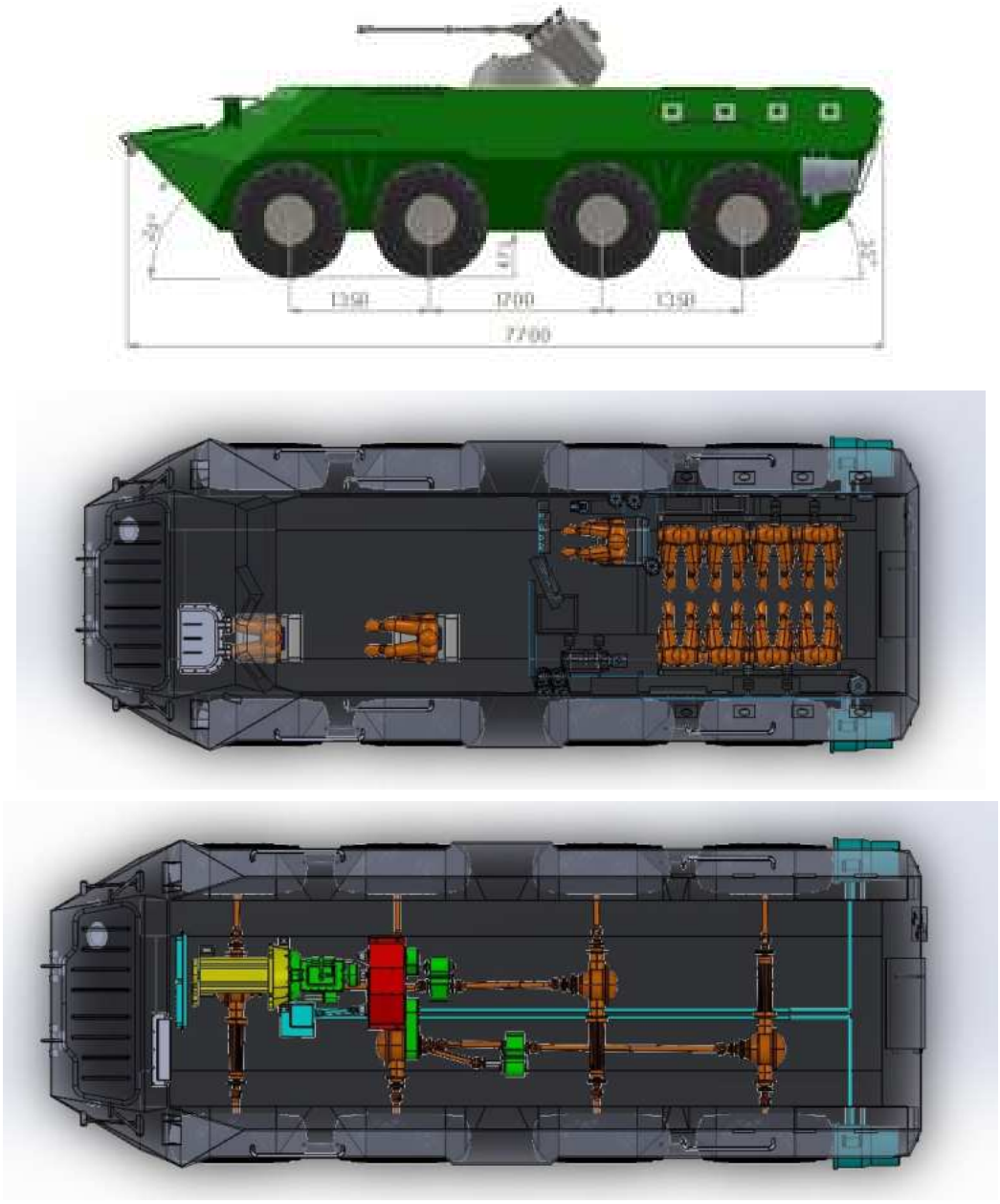
Tuy nhiên mẫu xe BTR-80A cũng bộc lộ một số hạn chế như:

+ Khoang động lực bố trí phía sau xe nên buộc phải mở cửa bên để bộ binh cơ động lên xuống dẫn đến khả năng bảo vệ bộ binh khi đổ bộ hạn chế.

+ Xe bố trí động cơ cùng với các hệ thống bổ trợ phía sau chiếm không gian lớn ảnh hưởng đến bố trí khoang bộ binh và khoang chiến đấu.

3.1.3. Phương án 3: Thiết kế mới phần vỏ và bố trí chung

- Khoang động lực bố trí phía trước xe.
- Sử dụng động cơ MTU-6R106 và hộp số ZF 6HP 602C.



Hình 3. Phương án bố trí chung 3

- Mua động cơ MTU; ly hợp, hộp số ZF
- Thiết kế, chế tạo cụm hộp số phân phối; truyền động các đăng và cơ cầu bơi nước.
- Thân xe cần được thiết kế phía dưới có dạng hình chữ V.

- Lựa chọn đầu và gầm thân xe dạng phương tiện bơi với mũi vát và các góc chuyển tiếp làm giảm lực cản của nước khi xe bơi.

- Lựa chọn phần trên thân xe, đặc biệt phần bảo vệ thân trên các chiến sỹ là dạng giáp nghiêng góc 56,7 độ.

- Lựa chọn bố trí thùng dầu, bộ nguồn thủy lực và hòm đạn 12,7 mm ở 2 bên sườn xe

- Các hòm đạn 7,62 mm bố trí phía trên vòm lốp phía sau.

- Súng và cửa nóc bố trí phù hợp với các vị trí ngồi của chiến sỹ.

- Giá lốp dự phòng bố trí sau cánh cửa phía sau và có cơ cấu bản lề độc lập với cánh cửa, liên kết trượt với cánh cửa khi mở bằng cơ cấu tay trượt.

- Khoang động lực phía trước tạo không gian bố trí khoang.

3.2. Yêu cầu đặt ra khi thiết kế xe thiết giáp bánh lốp 8 × 8

+ Có sự kế thừa những kết quả đạt được trong thiết kế, chế tạo xe thiết giáp bánh xích, bánh lốp do TC CNQP chủ trì.

+ Bố trí chung hợp lý và phù hợp về mặt kết cấu, tính năng, nhiệm vụ tác chiến đảm bảo sự tiện lợi cho kíp xe và bộ binh trên xe.

+ Đảm bảo các chỉ tiêu về khả năng cơ động và tính năng thông qua của xe.

+ Đảm bảo các chỉ tiêu về độ êm dịu chuyển động và ổn định chuyển động của xe để nâng cao độ bền kết cấu xe và tốt cho sức khỏe kíp xe và bộ binh.

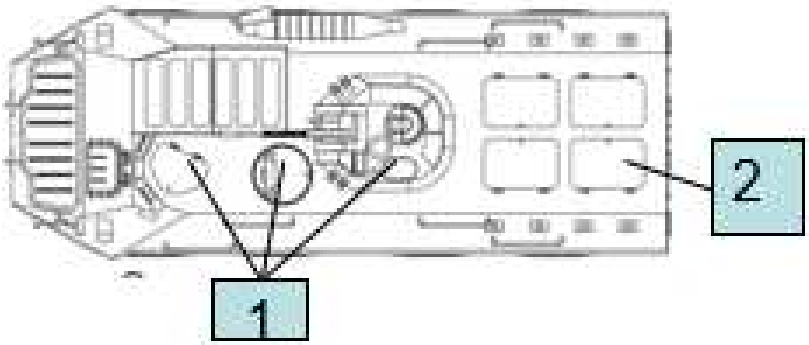
+ Thiết kế thân vỏ đảm bảo độ cứng vững và khả năng bảo vệ theo yêu cầu.

+ Thiết kế hệ thống động truyền lực có kết cấu nhỏ gọn, hiệu suất cao.

3.3. Lựa chọn phương án bố trí chung

Trên cơ sở phân tích thực trạng khai thác sử dụng xe thiết giáp bánh lốp của quân đội ta, xu hướng phát triển các dòng xe thiết giáp bánh lốp của quân đội các nước trên thế giới, kinh nghiệm và năng lực nghiên cứu sản xuất chế tạo dòng xe thiết giáp của ngành công nghiệp quốc phòng, yêu cầu nhiệm vụ tác chiến trong tình hình mới, nhận thấy phương án thiết kế xe thiết giáp chở quân chiến đấu XTC - 08 có cấu hình, tính năng chiến - kỹ thuật tương đương xe thiết giáp chở quân BTR - 82A do Liên bang Nga chế tạo là phù hợp về mặt công nghệ, chức năng, nhiệm vụ của xe trong tác chiến, đảm bảo tính kế thừa và đáp ứng các tiêu chí quan trọng của xe như: khả năng bảo vệ, sức mạnh hỏa lực, khả năng cơ động và tính năng thông qua, đồng thời có cải tiến hệ thống động truyền lực phù hợp với yêu cầu mở cửa phía sau đảm bảo an toàn cho bộ binh khi đổ bộ lên xuống xe (cải tiến bằng cách thay thế động cơ, hộp số có công suất lớn hơn, kích thước nhỏ gọn hơn, làm việc tin cậy hơn và bố trí phía trước bên phải của xe).

Trong phạm vi chương trình thiết kế, chế tạo xe thiết giáp chở quân bánh lốp 8x8 do Tổng cục CNQP đề xuất và qua phân tích các phương án bố trí chung, nhóm thiết kế đề xuất phương án thiết kế bố trí chung để giải quyết những hạn chế đã nêu ở trên với phương châm hạn chế tối đa thay đổi so với xe nguyên mẫu BTR - 80A. Căn cứ tính năng chiến kỹ thuật của xe thiết kế đã được xây dựng và qua khảo sát phương án bố trí chung trên các xe chiến đấu bộ binh thông dụng của các nước hiện nay. Nhóm tác giả đề xuất sử dụng phương án bố trí chung như trên hình 4.



Hình 4. Sơ đồ bố trí chung xe thiết kế
1. Kíp lái 2. Khoang bộ binh

Xe được chia thành các khoang: Khoang động truyền lực; Khoang điều khiển; Khoang chiến đấu; Khoang bộ binh. Phương án này đảm bảo khả năng cơ động, đặc biệt khả năng bơi nước, khả năng bảo vệ cho kíp xe, khả năng tác chiến của bộ binh.



Hình 5. Mô phỏng 3D tổng thể xe thiết kế

*** Ưu điểm:**

+ Bố trí khoang động lực phía trước bên phải của xe giúp có thể bố trí cửa mở cho bộ binh phía sau, đảm bảo an toàn cho bộ binh khi đổ bộ lên xuống.

+ Sử dụng động cơ và hộp số mới có công suất lớn hơn, kích thước nhỏ gọn hơn nên giảm được không gian của khoang động lực, tăng không gian cho khoang bộ binh, tăng khả năng cơ động đặc biệt tăng khả năng bơi nước của xe.

+ Có không gian để bố trí lắp đặt hệ thống bơi nước tiên tiến giúp tăng tốc độ bơi của xe.

*** Nhược điểm:**

+ Bố trí khoang động lực phía trước bên phải dẫn đến tính toán bố trí chung đảm bảo cân bằng của xe đặc biệt là cân bằng khi bơi nước gặp nhiều khó khăn, đòi hỏi phải nghiên cứu tính toán cẩn trọng.

+ Bố trí khoang động lực phía trước là phương án thay đổi nhiều nhất về mặt kết cấu so với xe nguyên bản, đặc biệt là phải thay đổi một phần kết cấu hệ thống truyền lực của xe (phần dẫn động từ hộp số chính đến hộp phân phối).

Bảng 2.Cấu hình cơ bản được lựa chọn cho xe thiết kế thể hiện trên

STT	Tên chỉ tiêu	Mức độ, giá trị
1	Kiểu xe	Xe thiết giáp chở quân bánh lốp, bơi nước, vỏ giáp chống đạn
2	Thiết bị động lực: Động cơ MTU 6R 106	+Công suất lớn nhất: 326 Kw. Tốc độ : 2200 rpm
3	Hệ thống truyền lực	Cơ khí
	- Hộp số chính: - Hộp số: Tự động, 7 số tiến, 1 số lùi	- ZF 6HP 602S -Tỷ số truyền 7,82; 4,03; 2,50; 1,53; 1,0; lùi=7,38
5	Vận tốc lớn nhất trên đường nhựa	**≥ 80 km/h**
6	Dự trữ hành trình (trên đường nhựa)	**≥ 600** km
7	Khả năng chống đạn	Mức độ 2 theo tiêu chuẩn STANAG 4569 (đạn 5,56 mm NATO, 7,62mm K56 lõi thép cứng ở cự ly trên 30 m)
8	Tốc độ cao nhất khi bơi tiến	≥ 7 km/h
9	Tốc độ cao nhất khi bơi lùi	≥ 2 km/h

Để đảm bảo yêu cầu chiến kỹ thuật sau khi lựa chọn phương án bố trí chung cần tiến hành thiết kế tuyến hình và chiều dày vỏ giáp tại các vị trí.

4. Tính toán thiết kế bố trí chung

4.1. Thiết kế vỏ giáp

***Thiết kế vỏ giáp thân xe**

Vỏ giáp thân xe có công dụng bảo vệ người và trang bị được an toàn trước các loại vũ khí sát thương đồng thời để lắp đặt các cụm hệ thống và tháp pháo của xe. Kết cấu vỏ giáp thân xe cần phải có độ cứng lớn, độ bền tốt. Độ cứng tạo ra sức cản lớn đối với sự xuyên của viên đạn vào vỏ giáp, sức cản đó có thể gây ra sự phá hủy của viên đạn hoặc làm cho viên đạn bị trượt đi (hiện tượng thía lia của viên đạn). Độ bền bảo đảm vỏ giáp chịu được tải trọng va đập lớn, không bị phá hủy, rạn nứt từ bên trong các tấm thép của vỏ giáp. Ba yếu tố quyết định đến vấn đề này là vật liệu làm vỏ giáp, chiều dày chống đạn và kết cấu của vỏ giáp.

4.1.1. Cơ sở lựa chọn vật liệu thiết kế vỏ giáp xe thiết giáp quân 8 × 8

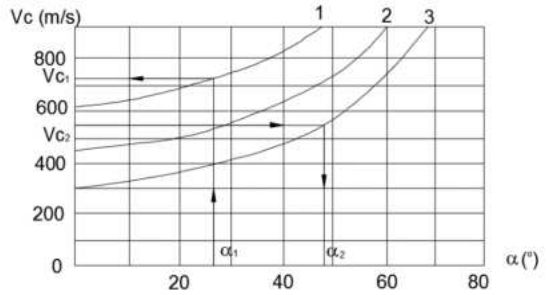
Vật liệu thiết kế vỏ giáp có các đặc tính cơ học càng tốt thì khả năng bảo vệ càng cao và giảm được khối lượng của vỏ giáp. Để chống lại sự phá hủy các loại vũ khí hủy diệt xe thiết giáp, vật liệu để chế tạo vỏ giáp phải có độ cứng lớn, độ bền tốt. Độ cứng tạo ra sức cản lớn đối với sự xuyên của viên đạn vào vỏ giáp, sức cản đó có thể gây ra sự phá hủy của đạn hoặc làm cho đạn bị trượt đi (hiện tượng thía lia của viên đạn). Độ bền bảo đảm vỏ giáp chịu được tải trọng va đập lớn, không bị phá hủy, rạn nứt từ bên trong các ấm thép của vỏ giáp. Muốn vỏ giáp có được các tính chất trên cần phải đưa vào thành phần của thép làm vỏ giáp những nguyên tố hợp kim thích hợp [6].

Thông qua việc nghiên cứu khảo sát các loại vật liệu chế tạo thân xe, tháp pháo xe thiết giáp lốp và để phù hợp với khả năng công nghệ chế tạo trong nước, nhóm tác giả lựa chọn loại vật liệu làm vỏ giáp xe thiết giáp chở quân 8x8 là thép chống mòn Hardox 500 với các thông số: chiều dày 4÷32 mm, độ cứng 470 ÷ 530 HBW, giới hạn chảy σ_{ch} = 1400 Mpa [7].

4.1.2. Cơ sở xác định chiều dày của vỏ giáp

Khi thiết kế vỏ giáp bảo vệ xe thiết giáp, trước hết ta tính toán khả năng chống đạn của thân xe đối với các loại đạn xuyên giáp động năng phổ biến. Nó được đánh giá theo đồ thị thực nghiệm khả năng chống đạn hay được xác định gần đúng bằng tính toán giải tích [5,6].

Xác định khả năng chống đạn của vỏ giáp theo đồ thị thực nghiệm là phương pháp tin cậy hơn cả. Đồ thị biểu diễn quan hệ giữa vận tốc chạm an toàn của đầu đạn v_c với góc chạm α và độ dày vỏ giáp b, được xây dựng cho loại vỏ giáp thép cán độ cứng trung bình phổ biến nhất, riêng cho từng kiểu và cỡ đạn (Hình 6).



Hình 6. Đồ thị thực nghiệm khả năng chống đạn của vỏ giáp
1. b_1 = 150 mm; 2. b_2 = 100mm; 3. b_3 = 50 mm

Tấm giáp được bắn phá bằng các viên đạn cùng loại dưới các góc khác nhau tăng dần và vận tốc chạm tăng dần. Vận tốc chạm của đạn khi chưa gây thương tổn nguy hiểm (xuyên thủng, nứt thông, văng mảnh) gọi là vận tốc giới hạn thương tổn nguy hiểm V_{gh}, vận tốc chạm $V_c = 0{,}97V_{gh}$ được coi là vận tốc chạm an toàn lớn nhất [6].

Khả năng xuyên giáp của đầu đạn được đánh giá qua biểu thức Giacốp-Đơ-Mart với giả thiết động năng đầu đạn dùng hết vào tác dụng xuyên, vận tốc chuyển động của đầu đạn khi xuyên thay đổi từ v_c đến 0 và chiều dày bản thép bị phá huỷ từ 0 đến b

$$v_c = k_{kc}\frac{{d_d}^{0,75}.{b_{bt}}^{0,75}}{{m_d}^{0,5}.\sin\theta_c} \quad (1)$$

Hoặc:

$$v_c = k_{kc}\frac{{d_d}^{0,75}.{b_{bt}}^{0,7}}{{m_d}^{0,5}.\cos\alpha_c} \quad (2)$$

Trong đó: m_d - Khối lượng đầu đạn (kg); v_c - Vận tốc chạm của đầu đạn (m/s); d_d - Đường kính đầu đạn (dm); b_{bt} - Chiều dày bản thép bị phá huỷ (dm); θ_c- Góc giữa véc tơ vận tốc đầu đạn với bề mặt mục tiêu; α_c- Góc chạm của đầu đạn với bản thép (góc giữa véc tơ vận tốc đầu đạn với pháp tuyến bề mặt mục tiêu) phụ thuộc vào góc nghiêng các tấm thép của vỏ giáp; k_{kc} - Hệ số đặc trưng cho đặc tính phá hủy của đầu đạn, với vỏ thép k_{kc} được lấy theo

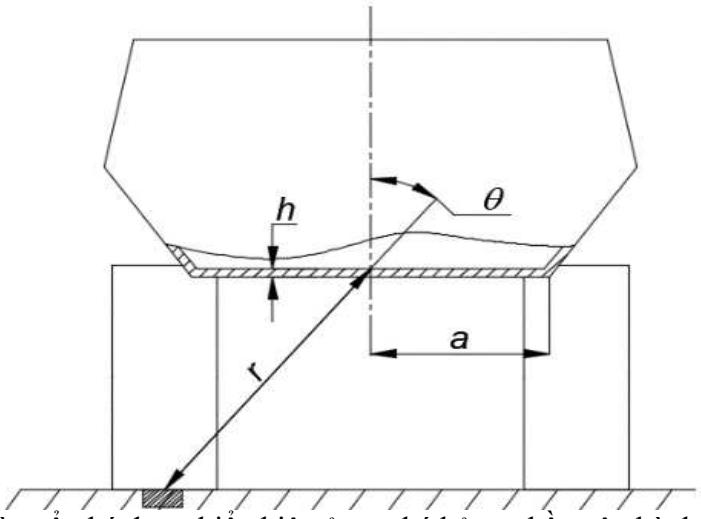
Bảng 3 [6]

Bảng 3. Hệ số đặc trưng k_{kc} của các kiểu đạn

TT	***k_{kc}***	***Kiểu đạn***
1	2000	Đạn có chóp gió và mũ đệm
2	2200	Đạn đầu nhọn
3	2500	Đạn đầu tù
4	1800÷2500	Đạn bằng cỡ và bản thép dày 1-1,5d

Đối với xe thiết giáp chở quân 8 × 8 ta chọn k_{kc} = 2200 với đạn đầu nhọn.

Chiều dày phía dưới đáy xe thường được xác định theo điều kiện chống mìn. Tác dụng



hủy diệt của các loại mìn nổ phá được biểu hiện ở sự phá hỏng phần vận hành, hệ thống truyền lực, phần đáy xe và phá hủy các mối liên kết với thân xe.

Hình 7. Sơ đồ tính toán xác định khả năng chống mìn của đáy xe

Khi mìn nổ, áp suất tác dụng lên đáy xe có thể sử dụng công thức gần đúng [5]:

$$\rho = 60\Psi \frac{{m_n}^{0.87}}{r^{2.6}}(1 + cos\,\theta) \quad (3)$$

Trong đó: m_n- Khối lượng chất nổ; r - Khoảng cách đến tâm nổ, θ- Góc tới của sóng nổ đối với đáy xe; Ψ - Hệ số tính đến độ sâu mặt nền (Ψ≈ 0,5).

Coi đáy xe như một tấm phẳng, ta xác định được ứng suất ở đáy xe:

$$\sigma = 423\sqrt[3]{E\rho^2\left(\frac{a}{h}\right)^2} \le [\sigma_{ch}] \quad (4)$$

Trong đó: E - Mô đun đàn hồi loại 1 (đối với thép $E = 2.10^{11}$ Pa); h - Độ dày vỏ giáp đáy xe; a - Bán kính phần tấm phẳng nằm trong giới hạn thành xe lấy bằng một nửa chiều rộng thân xe.

Kết quả và thảo luận

Nhận xét: kết quả tính toán cho thấy các tấm giáp ở những vị trí quan trọng là phần mũi xe, sườn phía trước, tháp pháo phía trước có độ nghiêng lớn hơn (450 ÷ 640) và độ dày lớn hơn (9 mm) so với các vị trí khác (7 mm) là hoàn toàn hợp lý dựa trên điều kiện về xác suất bị phá hủy, vì đây là các vị trí dễ bị tấn công nhất.

Chiều dày vỏ giáp, góc nghiêng tại các vị trí để chống đạn đạt được theo tiêu chuẩn cấp 4 và cấp 5 STANAG 4569 [8] được đưa đối với thép Hardox 500.

Bảng 4. Phân bố xác suất hư hỏng các phần của vỏ giáp

TT	Vị trí	Xác suất	TT	Vị trí	Xác suất
1	Đầu xe	35%	4	Sườn sau phía trên	4%
2	Sườn trước phía trên	23%	5	Sườn sau phía dưới	3%
3	Sườn trước phía dưới	18%	6	Đuôi xe	2%

Bảng 5. Các thông số chiều dày, góc nghiêng của vỏ giáp đối với phần thân xe

Vị trí	Loại đạn	θ_c	M_d , kg	d_d ,dm	V_c , m/s	Chiều dày b, mm
Tấm mũi xe phía trên	14.5mm	64^0	0.0634	0.1488	911	9
Tấm mũi xe phía dưới	14.5mm	45^0	0.0634	0.1488	911	9
Sườn trước phía trên	14.5mm	30^0	0.0634	0.1488	911	9
Sườn trước phía dưới	14.5mm	15^0	0.0634	0.1488	911	9
Sườn sau phía trên	7.62 mm	30^0	0.0084	0.0785	930	7
Sườn sau phía dưới	7.62 mm	15^0	0.0084	0.0785	930	7
Đuôi xe	7.62 mm	0^0	0.0084	0.0785	930	7
Đáy xe						7

Bảng 6. Các thông số chiều dày, góc nghiêng của vỏ giáp đối với phần tháp pháo

Vị trí	Loại đạn	θ_c	M_d , kg	d_d ,dm	V_c , m/s	Chiều dày b, mm
Tấm trước	14.5mm	45^0	0.0634	0.1488	911	9
Các tấm bên phía trước	14.5mm	45^0	0.0634	0.1488	911	9
Các tấm bên phía sau	7.62 mm	30^0	0.0084	0.0785	930	7
Tấm sau	7.62 mm	30^0	0.0084	0.0785	930	7

Lựa chọn vật liệu vỏ giáp: Kết quả nghiên cứu và thử nghiệm về khả năng chống đạn của các loại vỏ thép chế tạo xe thiết giáp theo tiêu chuẩn STANAG 4569 của NATO. Nhóm tác giả đã đưa ra lựa chọn vật liệu chế tạo vỏ giáp xe thiết giáp bánh xích là thép XAR 500 PREMIUM

Xác định chiều dày chống đạn: Độ dày của vỏ giáp thiết kế phụ thuộc vào vật liệu và yêu cầu cấp độ khả năng bảo vệ, việc lựa chọn độ dày các khu vực của vỏ giáp dựa trên khả năng xác suất khu vực bị phá hủy của vỏ giáp như trên Bảng 4.

Bảng 7. Phân bố xác suất phá hủy của vỏ giáp

TT	Vị trí	Tỷ lệ
1	Mũi xe	35%
2	Hai bên sườn xe	23%
3	Đuôi xe	2%

Riêng phần đáy xe lựa chọn theo yêu cầu chống các loại mìn chống tăng phổ biến. Từ đó xác định độ dày vỏ giáp ở các vị trí trên thân xe như trong bảng 5.

Hình dáng vỏ giáp thân xe: Qua các phân tích ở trên, tác giả thiết kế kết cấu vỏ giáp hoàn thiện như trên Hình 7. Trong đó kết cấu thân xe tháp pháo được chế tạo bằng phương pháp hàn các tấm thép với nhau. Kết cấu vỏ giáp thiết kế ngoài việc đảm bảo các yêu cầu đã nêu còn nâng cao tính năng thông qua của xe, đặc biệt khi xe thực hiện chuyển động bơi nước như tăng khả năng cơ động lên bờ xuống bến, tăng khả năng nổi của xe.

Bảng 8. Độ dày của vỏ giáp xe thiết kế

TT	Vị trí vỏ giáp	Chiều dày (mm)
1	Mũi xe cả nửa trên và nửa dưới	16
2	Hai bên sườn xe: thân trên và thân dưới	16
3	Mặt trên thân xe	5
4	Đáy xe	5



Hình 8. Kết cấu 3D thân xe. Tháp pháo

- Mặt trước thân trên: 9 mm, góc nghiêng 64 độ; Mặt trước thân dưới: 9 mm, 45 độ.
- Thành thân trên: 9 mm, 30 độ ; Thành thân dưới: 9 mm, 15 độ
- Nóc xe: 7 mm; Đuôi xe: 7 mm, thẳng đứng; Đáy xe: 7mm

5. Kết luận

Bài báo đã xây dựng tính năng chiến kỹ thuật của xe thiết kế, phân tích lựa chọn phương án bố trí chung, lựa chọn cấu hình xe, thiết kế 3D tuyến hình thân xe, vỏ giáp của xe. Kết quả tính toán khẳng định bản thiết kế bố trí chung đáp ứng được các thông số theo yêu cầu.

Hướng phát triển tiếp theo là tiếp tục tính toán thết kế từng cụm hệ thống cơ bản của xe, thực nghiệm kiểm chứng các nội dung thiết kế, tính toán khả năng bơi nước của xe.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Văn Luận, Nguyễn Văn Tần, Lê Trung Dũng. (1990). *Lý thuyết xe tăng*, Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.
2. Lê Thanh Tuấn. (2020). *Nghiên cứu thiết kế bố trí chung xe thiết giáp chở quân trên cơ sở ô tô quân sự,* Luận án tiến sĩ, HVKTQS, Hà Nội.
3. Nguyễn Anh Vượng, Tô Viết Thành. (2021). *Xây dựng bộ hồ sơ thiết kế, chế tạo xe thiết giáp bánh xích*, Đề tài cấp Tổng cục CNQP.
4. Đặng Xuân Lâm. (2013). *Cải tiến xe thiết giáp V-100*, Nhiệm vụ kỹ thuật cấp Bộ Quốc phòng, Viện Kỹ thuật cơ giới quân sự, Hà Nội.
5. Bùi Văn Tưởng. (2013). *Nghiên cứu, thiết kế xe bọc thép bánh lốp đa năng hạng trung 4x4*, Viện Kỹ thuật cơ giới quân sự, Hà Nội.
6. G.A. Anhilin và các cộng sự. (2007). Bản dịch, *Cơ sở thiết kế đạn bộ binh*, HVKTQS

7. Trần Văn Địch**,** Ngô Trí Phúc. (2006). *Sổ tay thép thế giới,* NXB Khoa học và Kỹ thuật.
8. Bernard Kempinski, Christopher Murphy. (2012). *Technical Challenges of the Army's*

9. Dương Tiến Minh. (2009). *Nghiên cứu, tính toán, thiết kế xe chiến đấu lục quân hạng nhẹ ICV-44*, Viện Kỹ thuật cơ giới quân sự, Hà Nội.

The research designs the overall layout of a wheeled armored vehicle with an 8 × 8 wheel configuration

Abstract: *This paper focuses on analyzing, evaluating, and selecting the overall layout design for an 8x8 wheeled armored personnel carrier. It also presents structural calculations for the hull and body based on the selected configuration. The analysis indicates that positioning the power compartment at the front right of the vehicle allows for the integration of a rear infantry access door, enhancing troop safety during embarkation and disembarkation. The adoption of a new high-power, compact engine and transmission system reduces the volume of the power compartment, thereby increasing the available space for the troop compartment, improving overall mobility, and significantly enhancing amphibious performance. The additional space facilitates the installation of an advanced water propulsion system, increasing the vehicle's water speed. Furthermore, based on research and testing of ballistic protection performance for armored vehicle steel according to NATO STANAG 4569 standards, the author selects XAR 500 PREMIUM steel as the armor material for the tracked armored vehicle*.

Keywords: Armored vehicle, layout, armored vehicle hull.

❑

Nghiên cứu hoàn thiện hệ thống động lực xe XCB - 01

Vũ Tiến Duyệt[1], Võ Văn Trung[1]

[1]*Hệ Quản lý học viên Sau đại học;* [2]*Viện Cơ khí Động lực/ Học viện KTQS*

Tóm tắt

Bài báo này tập trung nghiên cứu hoàn thiện hệ thống động lực xe chiến đấu bộ binh XCB - 01. Đây là phương tiện bọc thép bánh xích đầu tiên được Việt Nam nghiên cứu và chế tạo trong nước. Xe có hình dáng bên ngoài tương đồng với xe chiến đấu bộ binh BMP - 1 của Liên Xô. Xe đã được chế tạo các cụm hệ thống chính như: thân vỏ, hệ thống vận hành và đã chạy thử nghiệm và đã đạt được một số kết quả tốt. Tuy nhiên do những điều kiện và kỹ thuật và lựa chọn nguồn động lực là động cơ Dosan DL - 08 có tính năng chưa tương đương với động cơ UTD - 20 nguyên bản nên một số tính năng của xe còn chưa đạt yêu cầu. Chính vì vậy, việc nghiên cứu hoàn thiện hệ thống động lực làm cơ sở cho các đề tài khác thiết kế, chế tạo các cụm, chi tiết thành phần dựa trên nguyên mẫu xe BMP - 1 để tạo thành một loại xe chiến đấu bộ binh phù hợp với điều kiện sử dungh trên địa hình của Việt Nam là việc làm rất cần thiết.

Từ khóa*: xe XCB - 01*; *động cơ Doosan DL - 08, động cơ UTD - 23.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay quân đội ta đang triển khai thực hiện dự án "Nghiên cứu thiết kế, chế tạo xe chiến đấu bộ binh XCB - 01" trên cơ sở những nghiên cứu trước đó được thực hiện ở cấp Tổng cục CNQP. Dự án được triển khai qua 2 giai đoạn: giai đoạn 1 gồm 08 đề tài cấp Bộ Quốc phòng đã được nghiệm thu và hoàn thành chế tạo 01 xe chiến đấu bộ binh XCB - 01, được nghiệm thu đánh giá đáp ứng đầy đủ tính năng chiến kỹ thuật được Tổng Tham mưu trưởng phê duyệt; hiện đang triển khai giai đoạn 2 là dự án sản xuất thử nghiệm 18 xe chiến đấu bộ binh XCB - 01. Mẫu xe được chế tạo đã giải mã, ứng dụng được nhiều công nghệ hiện đại của các nước trên thế giới, thể hiện mức độ tự chủ cao trong nghiên cứu và chế tạo các cụm bộ phận, tổng thành xe, tỷ trọng nội địa hóa tương đối cao, đã hoàn toàn làm chủ công nghệ chế tạo thân xe, tháp pháo, hệ thống vũ khí hiện đại gồm pháo chính, súng máy phòng không 12.7 mm có hệ thống điều khiển hỏa lực tự động bám bắt mục tiêu, hệ thống khí tài quang học hiện đại, hệ thống cảnh báo và phát hiện chiếu xạ laser, dàn phóng đạn khói ngụy trang, hệ thống chữa cháy, hệ thống chống vũ khí nguyên tử. Hiện nay chỉ còn hệ thống động truyền lực và một số cụm, chi tiết phải mua sắm, nhập khẩu. Một số thông số cụ thể của xe:

Xe có khả năng chống đạn 12,7 mm ở phía mũi xe và đạn 7,62 mm ở hai bên thành xe. Xe có khả năng vượt dốc đứng cao 0.7 m, vượt hào rộng 2.5 m, dốc nghiêng tới 30 độ. Xe đạt tốc độ khoảng 65 km/h trên đường bằng và 45 km/h trên địa hình xấu và có khả năng bơi với tốc độ 7 km/h mà không cần chuẩn bị trước.



Hình 1. Xe chiến đấu bộ binh XCB - 01

Tuy nhiên do những điều kiện và kỹ thuật và lựa chọn nguồn động lực là động cơ Dosan DL - 08 có tính năng chưa tương đương với động cơ UTD - 20 nguyên bản nên một số tính năng của xe còn chưa đạt yêu cầu. Chính vì vậy, sau thời gian nghiên cứu hiện nay xe XCB - 01 đã triển khai và nghiệm thu cấp bộ quốc phòng, tiếp tục triển khai sản xuất loạt và đang sử dụng động cơ UTD - 20, đáp ứng đầy đủ tính năng chiến kỹ thuật được Tổng tham mưu trưởng phê duyệt.

Một số vấn đề với hệ thống động truyền lực xe XCB - 01. Mặc dù đã sử dụng động cơ UTD - 20 thay thế cho động cơ Doosan DL - 08 phiên bản đầu tuy nhiên tính năng chiến kỹ thuật của xe XCB - 01 so với BMP - 1 nguyên bản có nhiều điểm chưa tương đồng.

Xe XCB - 01 dùng động cơ UTD - 20 theo nguyên mẫu của BMP - 1 nhưng khối lượng của XCB - 01 lớn hơn so với BMP - 1 (14,5 tấn của XCB - 01 so với 13,3 tấn của BMP - 01) dẫn đến lực kéo đơn vị của XCB - 01 cũng thấp hơn so với nguyên bản BMP - 1 (0,513 so với 0,56) ảnh hưởng đến khả năng vượt vật cản của xe.

Thực chất khi dùng động cơ UTD - 20 thay động cơ Doosan DL - 08 tính năng chiến kỹ thuật của xe chiến đấu bộ binh XCB - 01 đã bảo đảm hơn trước. Tuy nhiên ta vẫn có thể thay thế động cơ UTD - 20 bằng một động cơ khác với các thông số tương ứng với công suất lớn hơn.

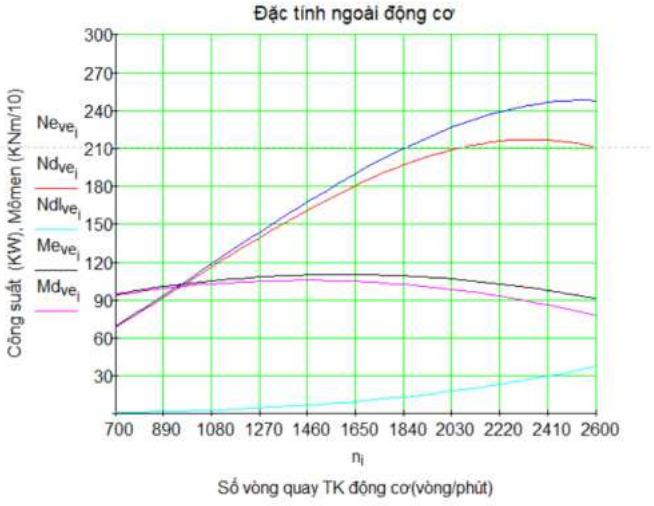
2. Kết luận nguồn động lực thay thế

Các loại động cơ dòng UTĐ của Nga được chế tạo chuyên dùng cho xe chiến đấu bộ binh nên có kích thước bao ngoài nhỏ để phù hợp với không gian của khoang động lực. Ngoài ra, dòng động cơ này có 2 nguồn khởi động là khí nén và điện. Đây chính là ưu điểm nổi bật của dòng động cơ này, nó đảm bảo yếu tố dự phòng trong chiến đấu và tăng hệ số dự trữ trong huấn luyện. Động cơ UTĐ - 23 có công suất lớn hơn động cơ UTĐ - 20, 50 mã lực do được tăng áp.

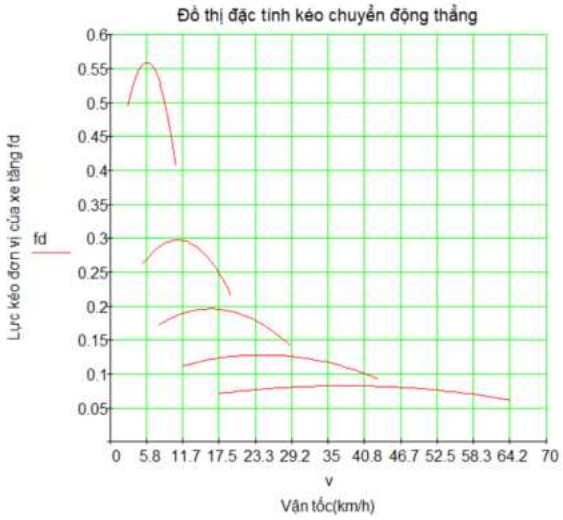
Việc lựa chọn động cơ thay thế phải phù hợp với yêu cầu thiết kế ban đầu: phải đạt được tốc độ tối đa là 65 km/h như xe nguyên bản, các tính năng thông qua phải đạt yêu cầu: vượt được dốc nghiêng 30^0, sườn nghiêng 30^0, vách đứng 0,7m, vượt hào rộng 2,5 m.

Dựa trên các kết quả tính toán sơ bộ đặc tính động lực học và so sánh các thông số kỹ thuật của một số loại động cơ trên thị trường, thấy rằng động cơ UTĐ - 23 có kết cấu và thông số tối ưu, phù hợp và đảm bảo hơn cả cho phương án hoàn thiện hệ thống động truyền lực xe XCB - 01.

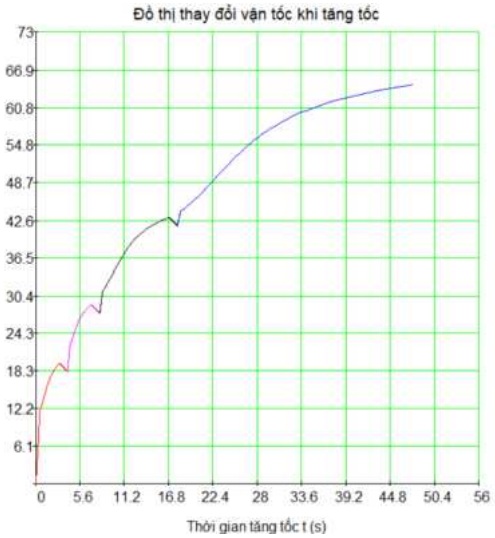
Dựa trên những thông số đó ta có thể xây dựng đặc tính ngoài động cơ, đặc tính kéo và tăng tốc của xe XCB - 01 khi thay động cơ UTD - 20 bằng UTD - 23.



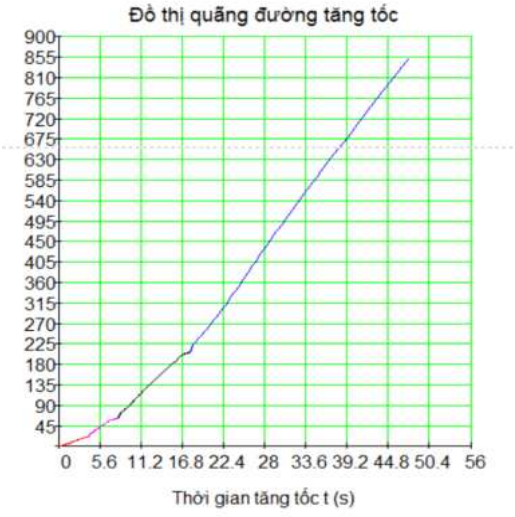
Hình 2. Đặc tính ngoài của động cơ UTD - 23



Hình 3. Đặc tính kéo chuyển động thẳng xe XCB - 01 khi lắp động cơ UTD - 23

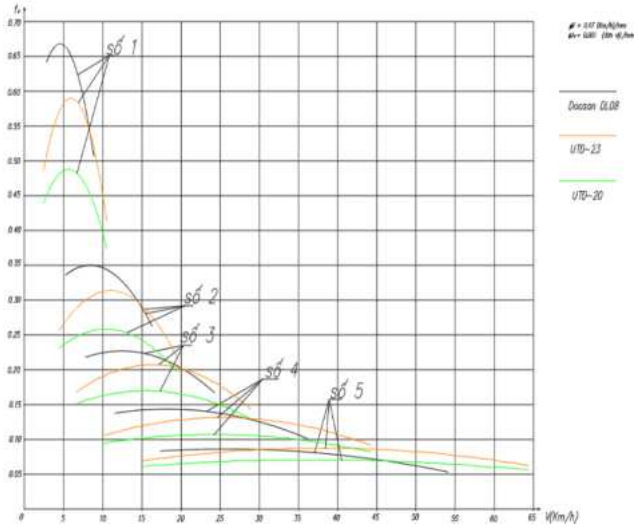


Hình 4. Đồ thị đặc tính tăng tốc xe XCB - 01 khi lắp động cơ UTD - 23

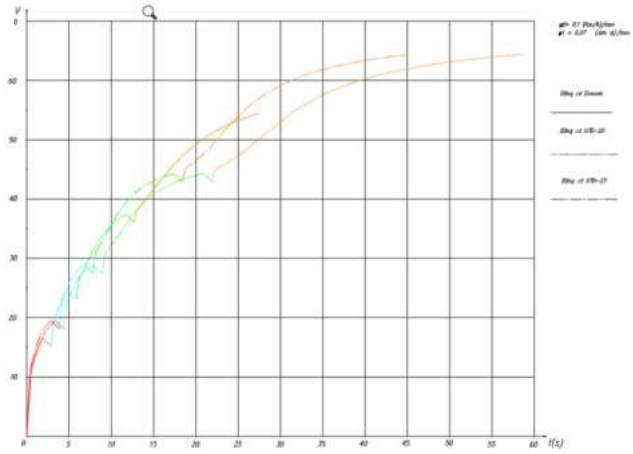


Hình 5. Đồ thị quãng đường tăng tốc

Dựa vào thông số tính toán ta xây dựng đặc tính kéo chuyển động thẳng và đặc tính tăng tốc của xe XCB - 01 khi lắp các loại động cơ khác nhau. Từ đó có thể so sánh, đánh giá chất lượng động lực học chuyển động thẳng xe XCB - 01 trong các trường hợp khác nhau:



Hình 6. Đặc tính kéo chuyển động thẳng của xe XCB - 01 khi lắp các loại động cơ khác nhau.



Hình 2.6. Đặc tính tăng tốc của xe XCB - 01 khi lắp các động cơ khác nhau

Bảng so sánh thông số trong các trường hợp khác nhau:

Thông số xe	**Doosan DL08**	**УТД – 20**	**УТД – 23**
Vận tốc lớn nhất (km/h)	54,5	64,4	64,4
Thời gian tăng tốc đến khi đạt vận tốc 50 km/h	21,3	27	23
Quãng đường tăng tốc đến khi đạt 50km/h (m)	281	319	310

Qua đánh giá xe XCB - 01 khi lắp các động cơ khác nhau, ta thấy rằng động cơ UTĐ - 23 phù hợp hơn cả để có thể thay thế Doosan DL08 cụ thể như sau:

- Lực kéo đơn vị lớn nhất trên bánh sao chủ động là 0,58 (lớn hơn so với động cơ UTĐ - 20 là 0,48 và nhỏ hơn so với động cơ Doosan là 0,67);

- Vận tốc lớn nhất đạt được là 64,4(km/h) sau 45 giây, bằng động cơ UTĐ - 20 là sau 58 giây lớn hơn so với động cơ Doosan là 55km/h.

Có thể thấy rằng động cơ UTĐ - 23 đảm bảo được cả lực kéo đơn vị cũng như vận tốc lớn nhất từ đó có thể thấy nếu xe XCB - 01 sử dụng động cơ UTD - 23 thì xe có khả năng tăng tính năng thông qua cũng như tính cơ động trong chiến đấu. Hơn nữa vì xe XCB - 01 sử dụng hệ thống truyền lực của xe BMP - 1 nguyên bản cho nên việc lắp đặt, điều chỉnh và đồng bộ các hệ thống trong quá trình thay thế động cơ trở nên dễ dàng hơn rất nhiều.

Chính vì thế động cơ UTĐ - 23 hoàn toàn có thể thay thế động cơ Doosan DL08 và động cơ UTD - 20 trong quá trình sử dụng lâu dài mà vẫn đảm bảo độ tin cậy và tính năng chiến - kỹ thuật của xe.

3. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã sử dụng phần mềm Mathcad để khảo sát động lực học chuyển động thẳng xe XCB - 01 khi lắp các loại động cơ khác nhau. Kết quả thu được cho thấy động cơ UTD - 23 có nhiều ưu điểm nổi bật so với động cơ Doosan DL - 08, động cơ UTD - 20 vừa đảm bảo kích thước vừa đảm bảo được tính năng chiến kỹ thuật cho xe XCB - 01. Đồng thời với kết quả này có thể khẳng định xe chiến đấu bộ binh XCB - 01 do Việt Nam sản xuất hoàn toàn có thể hoàn thiện thêm một số bộ phận để bảo đảm quá trình tác chiến trong điều kiện địa hình Việt Nam. Đây là cơ sở cho việc nghiên cứu hoàn thiện xe xích chiến đấu hiện đang có trong biên chế của quân đội ta.

Tài liệu tham khảo

1. Lê Trung Dũng, Nguyễn Minh Tân, Cù Xuân Phong. (2023). *Lý thuyết xe xích quân sự*, NXB QĐ.
2. Vũ Quốc Bảo. (2003). *Cấu tạo xe tăng Tập 4 Xe chiến đấu bộ binh BMP - 1,* NXB QĐ.
3. Nguyễn Huy Trưởng, *Nghiên cứu hoàn thiện thiết kế hệ thống cho xe chiến đấu bộ binh XCB - 01*, Bộ Quốc phòng.
4. Dương Thành Công, Cù Xuân Phong, Tô Viết Thành, Nguyễn Anh Vượng, Vũ Mạnh Tấn. (2021). *Nghiên cứu thay thế động cơ trên xe thiết giáp xích.* Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng Hải.

Research on improving the power system of the xcb-01 vehicle

Abstract: *This article focuses on the research and improvement of the power system for the XCB-01 infantry fighting vehicle. This is the first tracked armored vehicle researched and manufactured domestically in Vietnam. The vehicle's exterior design is similar to the Soviet BMP-1 infantry fighting vehicle. It has been developed with key system components such as the hull and operational system, and it has undergone trial runs with some positive results. However, due to technical conditions and the selection of the Dosan DL-08 engine, which does not fully match the performance of the original UTD-20 engine, some of the vehicle's capabilities have not met the required standards. Therefore, research to refine the power system is essential as a foundation for other projects to design and manufacture components and subsystems based on the BMP-1 prototype, ultimately developing an infantry fighting vehicle suited to Vietnam's terrain conditions.*

Keywords: XCB-01 vehicle; Doosan DL-08 engine, UTD-23 engine.

❑

Xây dựng thuật toán xử lý ảnh xác định chiều dài phân rã tia phun trong ống hóa hơi của động cơ tuabin khí cỡ nhỏ

Nguyễn Hữu Hà[1,*], Phạm Xuân Phương[1] , Nguyễn Quốc Quân[1]

[1]Viện Cơ khí động lực, Học viện kỹ thuật quân sự

[*]Email: huuha84@lqdtu.edu.vn, Contact number: 0961675649

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày việc phát triển một thuật toán xử lý ảnh và xây dựng mô hình thực nghiệm để xác định chiều dài phân rã tia phun trong ống hóa hơi của động cơ tuabin khí cỡ nhỏ. Mục tiêu chính của nghiên cứu là xác định chính xác chiều dài phân rã của tia phun trong các điều kiện làm việc khác nhau. Thuật toán được phát triển dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp nhị phân hóa bằng ngưỡng thích ứng và kỹ thuật phát hiện biên bằng toán tử Sobel, giúp xác định rõ ràng và tách biệt hình ảnh tia phun khỏi nền ảnh. Độ chính xác của thuật toán được kiểm chứng thông qua các thí nghiệm, đồng thời các kết quả thử nghiệm cũng chỉ ra sự ảnh hưởng của các điều kiện làm việc, như áp suất phun đến chiều dài phân rã của tia phun. Kết quả cho thấy chiều dài phân rã trung bình tăng từ 3.2 mm đến 6.5 mm khi áp suất phun tăng trong phạm vi 1.38 đến 4.14 bar. Nghiên cứu đã xây dựng thành công một bộ công cụ hiệu quả để xác định chính xác chiều dài phân rã của tia phun, hỗ trợ nghiên cứu về ống hóa hơi trong động cơ tuabin khí cỡ nhỏ.

Từ khóa: *Ống hóa hơi; động cơ tuabin khí cỡ nhỏ; xử lý ảnh; chiều dài phân rã; OpenCV*

1. Mở đầu

Động cơ tuabin khí cỡ nhỏ (MGT) ban đầu được phát triển cho máy bay mô hình, nhưng ngày nay đóng vai trò quan trọng trong các hệ thống UAV nhờ tỷ lệ công suất/trọng lượng cao và độ tin cậy [1, 2]. Tuy nhiên, công nghệ này vẫn gặp phải các vấn đề như hiệu suất nhiệt thấp, tiêu thụ nhiên liệu cao và chi phí chế tạo đắt đỏ [3]. Những yếu tố này làm giảm thời gian hoạt động của UAV và hạn chế ứng dụng thực tế. Vì vậy, nghiên cứu tối ưu hóa hiệu suất, cải tiến công nghệ chế tạo và giảm chi phí là rất cần thiết để mở rộng ứng dụng MGT.

Buồng đốt trong động cơ tuabin khí cỡ nhỏ gặp khó khăn do kích thước hạn chế, khiến các hệ thống phun nhiên liệu thông thường không khả thi [4]. Thay vào đó, các buồng đốt nhỏ gọn sử dụng ống hóa hơi để hỗ trợ quá trình bay hơi và trộn nhiên liệu với không khí. Ống hóa hơi giúp tạo ra hỗn hợp nhiên liệu-không khí đồng nhất và đưa vào vùng cháy chính ổn định, tối ưu hóa hiệu suất cháy [5]. Nghiên cứu và cải tiến thiết kế ống hóa hơi là yếu tố quan trọng để nâng cao hiệu quả hoạt động của buồng đốt cỡ nhỏ.

Quá trình phân rã tia phun nhiên liệu trong ống hóa hơi ảnh hưởng trực tiếp đến sự hình thành hỗn hợp nhiên liệu-không khí và hiệu suất cháy. Quá trình này bị chi phối bởi nhiều yếu tố như dòng khí đồng trục, tính chất nhiên liệu và điều kiện nhiệt động lực học. Các đặc trưng như tần số dao động, hình thái tia phá vỡ và kích thước giọt nhiên liệu quan trọng trong khả năng hóa hơi. Mặc dù các nghiên cứu đã làm rõ cơ chế phân rã, nhưng thiếu thông tin định lượng về giai đoạn chuyển tiếp và điều kiện vận tốc dòng thấp, cùng sự mất ổn định bề mặt tia làm tăng sự ngẫu nhiên trong phân rã. Giải quyết vấn đề này sẽ tối ưu hóa thiết kế ống hóa hơi và nâng cao hiệu suất buồng đốt.

Trong nghiên cứu chiều dài phân rã tia phun nhiên liệu, các phương pháp như quan sát trực tiếp, đầu dò điện trở [6], laser nhuộm [7], tia X [8] và shadowgraph thường được sử dụng. Tuy nhiên, những phương pháp này gặp phải hạn chế như yêu cầu thiết bị phức tạp, chi phí cao

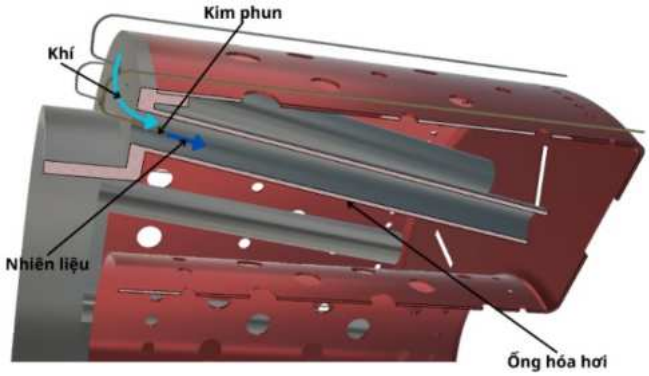
hoặc khó áp dụng trong môi trường thực nghiệm. Phương pháp shadowgraph, với ưu điểm chi phí thấp và dễ triển khai, đã được sử dụng để nghiên cứu cấu trúc tia phun. Khi kết hợp với các thuật toán xử lý ảnh hiện đại như phân tích hình ảnh và nhận dạng đối tượng, phương pháp này giúp quan sát và phân tích quá trình phân rã tia phun một cách hiệu quả, nâng cao độ chính xác và giảm thiểu ảnh hưởng của yếu tố nhiễu.

Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp tự động xác định chiều dài phân rã từ một số lượng lớn hình ảnh, kết hợp với việc phát triển một hệ thống thí nghiệm để ghi lại quá trình phân rã tia phun bên trong ống hóa hơi dưới các điều kiện hoạt động khác nhau. Bài báo được cấu trúc thành ba phần chính: Phần 2 giới thiệu nền tảng lý thuyết và thiết kế mô hình thực nghiệm; Phần 3 trình bày chi tiết phương pháp xử lý hình ảnh; và Phần 4 tập trung vào các kết quả thu được và phân tích ảnh hưởng của tham số hoạt động đến chiều dài phân rã.

2. Cơ sở lý thuyết và thực nghiệm

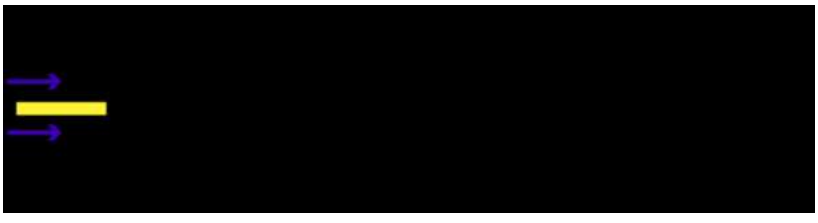
2.1. Quá trình phân rã tia phun trong ống hóa hơi

Động cơ tuabin khí cỡ nhỏ thường sử dụng buồng đốt hình khuyên, với các kim phun nhiên liệu đặt tại cửa vào của các ống hóa hơi. Tại đây, tia nhiên liệu phun đồng trục với dòng khí, trải qua các quá trình phân rã, hóa hơi và hòa trộn trước khi vào vùng cháy chính để duy trì quá trình đốt. Chi tiết bố trí và đặc điểm hình học của các ống hóa hơi và kim phun trong buồng đốt được mô tả trong Hình 1.



Hình 1. Vị trí ống hóa hơi và kim phun trong buồng đốt

Quá trình phân rã tia nhiên liệu bằng không khí đồng trục là hiện tượng phức tạp, nhằm tạo ra các giọt nhiên liệu nhỏ giúp bay hơi hoàn toàn và cải thiện sự pha trộn giữa nhiên liệu và khí, từ đó tối ưu hóa hiệu quả đốt cháy. Quá trình này gồm hai giai đoạn chính: phân rã sơ cấp, nơi lực cắt tại bề mặt tiếp xúc khí–lỏng phá vỡ tia nhiên liệu thành các giọt và sợi chất lỏng, và phân rã thứ cấp, nơi các giọt tiếp tục bị biến dạng và phá vỡ, như mô tả trong Hình 2 [9]. Đặc tính phân rã phụ thuộc vào vận tốc chất lỏng và khí, hình dạng vòi phun, cùng các tính chất vật lý của hai chất lưu.



Hình 2. Quá trình phân rã tia phun trong ống hóa hơi

Chiều dài phân rã tia phun chất lỏng là khoảng cách từ vòi phun đến điểm tia chuyển từ dòng liên tục sang các giọt và sợi, đánh dấu kết thúc phân rã sơ cấp [10-12]. Thông số này ảnh hưởng đến kích thước giọt nhiên liệu, khả năng bay hơi và sự đồng nhất của hỗn hợp nhiên liệu-không khí. Chiều dài phân rã lớn tạo ra giọt to, giảm khả năng bay hơi, trong khi chiều dài ngắn hơn tạo giọt nhỏ, cải thiện quá trình bay hơi và hiệu quả cháy. Các yếu tố như vận tốc dòng khí, dòng chất lỏng, tỷ lệ khí/lỏng, hình dạng vòi phun và đặc tính nhiên liệu ảnh hưởng mạnh đến thông số này [13-16]. Hình 3 thể hiện sự thay đổi chiều dài phân rã theo vận tốc tia phun, phản ánh mối quan hệ giữa phân rã sơ cấp và điều kiện động lực học dòng chảy.



Hình 3. Đường cong ổn định của tia phun [17]

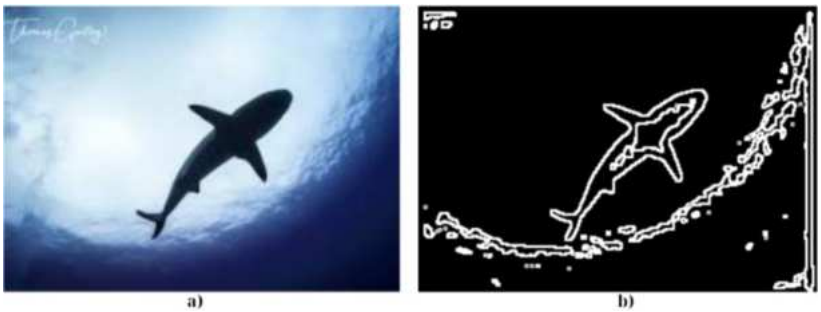
Các phương pháp phổ biến để đo chiều dài phân rã bao gồm đầu dò vật lý [6], chụp ảnh shadowgraph, huỳnh quang kích thích bằng laser (LIF) [7], và hấp thụ tia X [8]… Trong đó, chụp ảnh shadowgraph là phương pháp không xâm lấn nhưng bị nhiễu do sự xuất hiện của giọt, sợi nhiên liệu, làm mờ ranh giới giữa lõi liên tục và vùng phân rã, gây khó khăn trong việc xác định chính xác chiều dài phân rã. Điều này nhấn mạnh nhu cầu phát triển các kỹ thuật xử lý ảnh tiên tiến để giảm nhiễu và cải thiện độ chính xác.

2.2. Xử lý ảnh trong nghiên cứu phân rã tia phun trong ống hóa hơi

Trong xử lý ảnh kỹ thuật, đặc biệt là nghiên cứu dòng chảy hoặc tia phun, quy trình thường gồm ba bước: tiền xử lý, xử lý chính và hậu xử lý [18]. Tiền xử lý cải thiện chất lượng ảnh thô bằng các kỹ thuật như cân bằng histogram và lọc nhiễu. Xử lý chính thực hiện ngưỡng hóa hoặc phát hiện biên để phân đoạn và trích xuất đặc trưng từ ảnh. Hậu xử lý tinh chỉnh kết quả bằng cách kết nối biên, làm mịn hoặc đánh dấu đối tượng. Các phần mềm như ImageJ, MATLAB và OpenCV hỗ trợ hiệu quả các bước này [19].

Xử lý ảnh dòng chảy trong ống thạch anh gặp nhiều thách thức do ánh sáng bị ảnh hưởng bởi khúc xạ và tán xạ khi đi qua thành ống, dẫn đến suy giảm chất lượng hình ảnh. Những hiện tượng này làm giảm độ tương phản và tạo hiện tượng mờ, gây khó khăn trong việc phân biệt ranh giới và cấu trúc bên trong [20]. Để khắc phục, các kỹ thuật nâng cao như kéo dài độ tương phản (Contrast Stretching) được sử dụng để phục hồi chi tiết và cải thiện độ rõ nét. Các kỹ thuật phát hiện biên như ngưỡng thích ứng (Adaptive Thresholding) và toán tử Sobel (Sobel Operator) giúp xác định rõ các ranh giới và cấu trúc bên trong [21, 22]. Kết quả minh họa trong Hình 4 cho thấy việc kết hợp các kỹ thuật này giúp phát hiện chính xác biên đối tượng trong

ảnh, ngay cả khi ánh sáng bị khúc xạ và hấp thụ mạnh, cải thiện chất lượng hình ảnh và hỗ trợ phân tích dòng chảy.

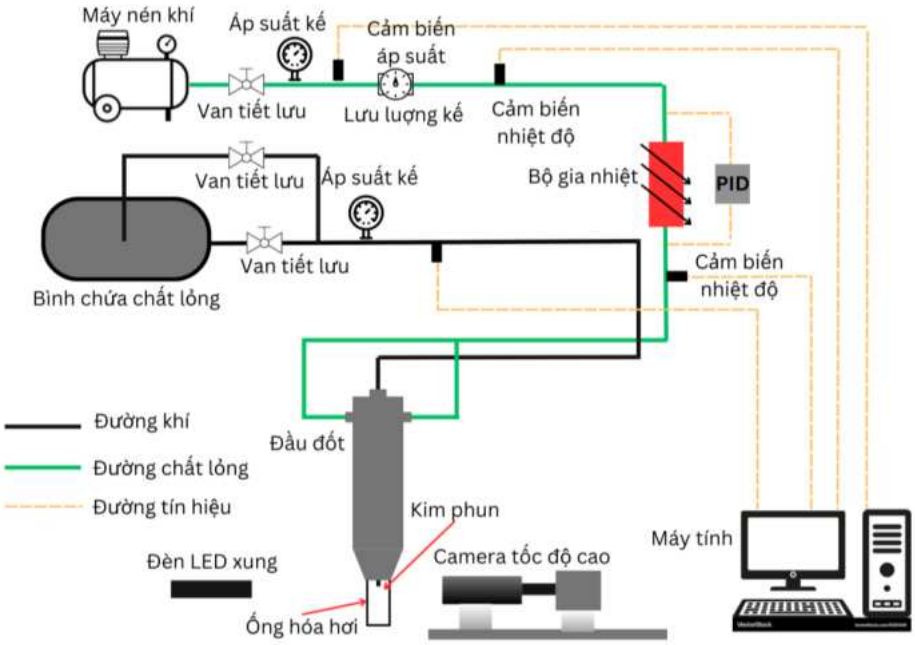


Hình 4. Hiệu quả của phương pháp kết hợp ngưỡng thích ứng và toán tử Sobel [22]
a) Ảnh gốc b) Ảnh sau xử lý phát hiện cạnh

OpenCV là thư viện mạnh mẽ và phổ biến trong xử lý ảnh, cung cấp các hàm tiện ích như lọc ảnh, phát hiện cạnh và biến đổi hình học [23]. Với khả năng hỗ trợ nhiều ngôn ngữ lập trình và hiệu suất tối ưu, OpenCV đã trở thành công cụ chính trong nghiên cứu này để thực hiện các tác vụ xử lý ảnh và áp dụng các thuật toán mới.

2.3. Thiết lập thí nghiệm

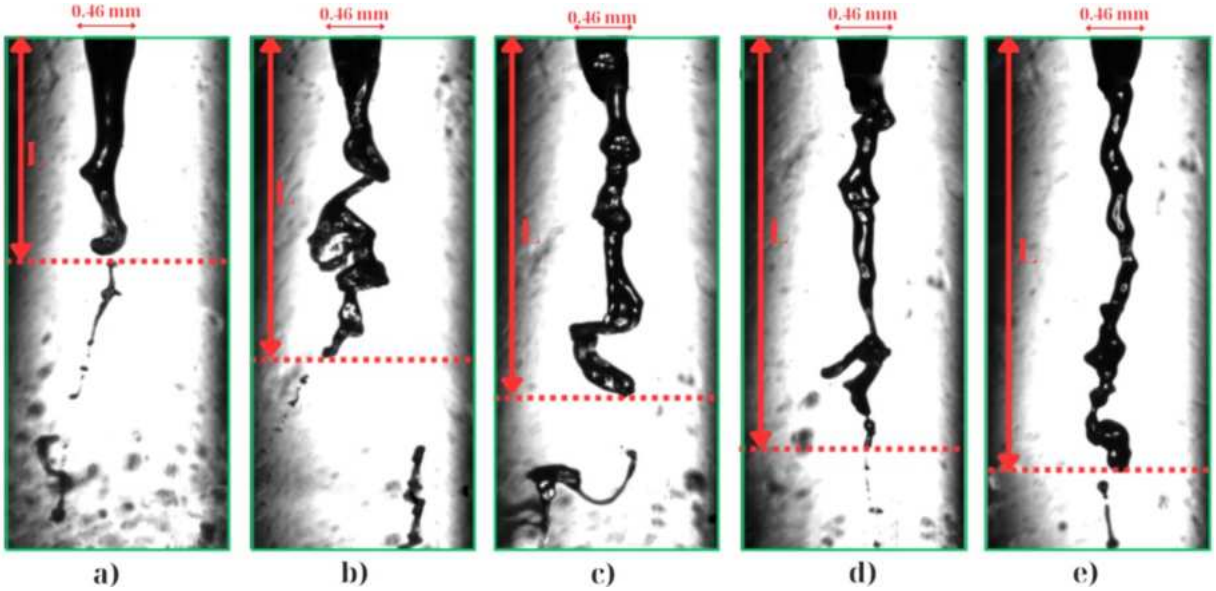
Hệ thống thí nghiệm trong Hình 5 được thiết kế để nghiên cứu quá trình phân rã tia phun nhiên liệu với độ chính xác và ổn định cao. Máy nén khí và cảm biến áp suất của hãng Sensys giám sát áp suất, trong khi cảm biến lưu lượng của SMC điều chỉnh lưu lượng khí. Bộ gia nhiệt PID điều khiển nhiệt độ khí, sử dụng cảm biến Omron để phản hồi dữ liệu về máy tính. Nhiên liệu từ bình chứa được dẫn qua kim phun vào ống hóa hơi, nơi quá trình phân rã tia phun diễn ra dưới dòng khí tốc độ cao. Camera tốc độ cao và LED xung "đóng băng" tia phun, ghi lại chi tiết sự hình thành và phân rã nhiên liệu. Dữ liệu từ các cảm biến được thu thập và xử lý qua các bộ NI DAQ, cung cấp cơ sở khoa học cho nghiên cứu cơ chế phân rã.



Hình 5. Sơ đồ thí nghiệm nghiên cứu phân rã tia phun trong ống hóa hơi

Quá trình phân rã tia phun đồng trục trợ khí bao gồm các yếu tố như mất ổn định, tần số mất ổn định, chiều dài phân rã, hình thái phân rã và phân bố giọt nhiên liệu. Nghiên cứu này tập trung phát triển quy trình xử lý ảnh để xác định chiều dài phân rã, tham số quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả phun. Nước được sử dụng thay thế nhiên liệu hàng không trong giai đoạn đầu thí nghiệm nhờ tính an toàn, chi phí thấp và dễ kiểm soát, nhưng sự khác biệt về độ nhớt và sức căng mặt ngoài giữa nước và nhiên liệu có thể ảnh hưởng đến kết quả, cần kiểm chứng bổ sung.

Hệ thống thí nghiệm sử dụng ống thạch anh đường kính 5 mm và kim phun đường kính 0,22 mm để tạo tia phun có đặc tính tương tự hệ thống phun nhiên liệu trong động cơ thực tế. Các tham số vận hành được thiết lập theo chế độ làm việc của động cơ Jetcat P130RX, với tốc độ dòng khí từ 70 đến 300 L/ph và áp suất bơm dòng lỏng từ 1,34 đến 4,14 bar. Hệ thống tái hiện các điều kiện vận hành thực tế, hỗ trợ thu thập dữ liệu hình ảnh chi tiết và phân tích động lực học phân rã. Hình 6 minh họa quá trình phân rã tia phun trong ống hóa hơi ở các điều kiện vận hành khác nhau. Nghiên cứu kết hợp mô hình thực nghiệm và thuật toán xử lý ảnh để xác định chiều dài phân rã, giúp tối ưu hóa hiệu quả hệ thống phun nhiên liệu.



Hình 6. Hình ảnh tia phun ở các chế độ vận hành khác nhau với lưu lượng khí Q_g=89 L/ph
a) p_l=1,34 bar; b) p_l=2,06 bar; c) p_l=2,76 bar; d) p_l=3,45 bar; e) p_l=4,14 bar

3. Phương pháp và tiến trình nghiên cứu

3.1. Xây dựng thuật toán xử lý ảnh

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một phương pháp sử dụng ngưỡng thích ứng trước khi áp dụng toán tử phát hiện cạnh để tăng cường các cạnh của đối tượng, từ đó phát hiện phần biên của lõi tia phun trong hình ảnh. Cách tiếp cận này bao gồm ba bước chính, như minh họa trong hình 7:



Hình 7. Sơ đồ khối thuật toán xử lý ảnh

Bước 1: Tăng cường hình ảnh

Hình ảnh của tia phun bên trong ống thạch anh thường bị ảnh hưởng bất lợi bởi hiện tượng khúc xạ và tán xạ từ thành ống, dẫn đến tình trạng mờ đục của hình ảnh. Vì vậy, tiền xử lý hình ảnh là bước cần thiết trước khi thực hiện bất kỳ thao tác nào khác. Trong bài viết này, để mở rộng dải động của hình ảnh – khoảng cách giữa giá trị cường độ tối đa và tối thiểu – kỹ thuật kéo giãn độ tương phản được áp dụng. Về mặt toán học, kỹ thuật này được định nghĩa bởi công thức sau [19]:

$$I'(x,y) = \frac{I(x,y)-I_{min}}{I_{max}-I_{min}}.dr + I_0 \quad (1)$$

Trong đó, $I'(x,y)$ là hình ảnh với dải động mới, $I(x,y)$ là hình ảnh đầu vào, I_{max} là giá trị cường độ tối đa của hình ảnh đầu vào, I_{min} là giá trị cường độ tối thiểu của hình ảnh đầu vào, *dr* là giá trị dải động mới, I_0 là điểm khởi đầu của dải động mới cho hình ảnh đầu vào $I(x,y)$. Quá trình biến đổi này giúp tăng cường độ tương phản hiệu quả cho hình ảnh gốc trong nghiên cứu này.

Bước 2: Ngưỡng thích ứng

Phân đoạn ảnh là quá trình chia hình ảnh thành các vùng để đơn giản hóa việc phân tích và xác định ranh giới, đối tượng trong ảnh. Trong bài viết này, phân đoạn được thực hiện bằng phương pháp ngưỡng hóa, trong đó các điểm ảnh có cường độ lớn hơn ngưỡng được gán giá trị tiền cảnh, còn lại là hậu cảnh, giúp chuyển đổi ảnh xám sang nhị phân. Ngưỡng hóa có thể sử dụng ngưỡng toàn cục hoặc ngưỡng thích ứng. Với ngưỡng thích ứng, giá trị ngưỡng tại mỗi điểm ảnh $Th(x,y)$ được xác định bằng cách tính trung bình có trọng số $Av(x,y)$ trong vùng $b \times b$ xung quanh điểm ảnh, sau đó trừ đi tham số cố định p, theo công thức sau [19]:

$$Th(x,y) = Av(x,y) - p \quad (2)$$

Bước 3: Phát hiện cạnh bằng toán tử Sobel

Phát hiện biên là kỹ thuật xử lý ảnh dùng để xác định ranh giới của các đối tượng trong hình, bằng cách tìm các điểm nơi độ sáng thay đổi đột ngột và tổ chức chúng thành các đường cong gọi là biên. Trong bài viết này, hình ảnh từ bước trước được sử dụng để phát hiện ranh giới đối tượng trong ảnh gốc bằng toán tử Sobel, giúp tạo ra các đường biên rõ ràng. Toán tử Sobel bao gồm hai kernel 3x3 (H_1, H_2), được thiết kế riêng cho trục X và trục Y, trong đó kernel trục Y là phép quay 90° của kernel trục X. Bằng cách áp dụng phép tích chập 2D giữa kernel Sobel và hình ảnh, các cạnh của đối tượng trên cả hai trục được làm nổi bật, xác định rõ ràng ranh giới trong ảnh.

$$H_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{và} \quad H_2 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Các kernel ngang và dọc được kết hợp để tính độ lớn tuyệt đối của gradient, |G|, tại từng điểm, theo công thức sau [19]:

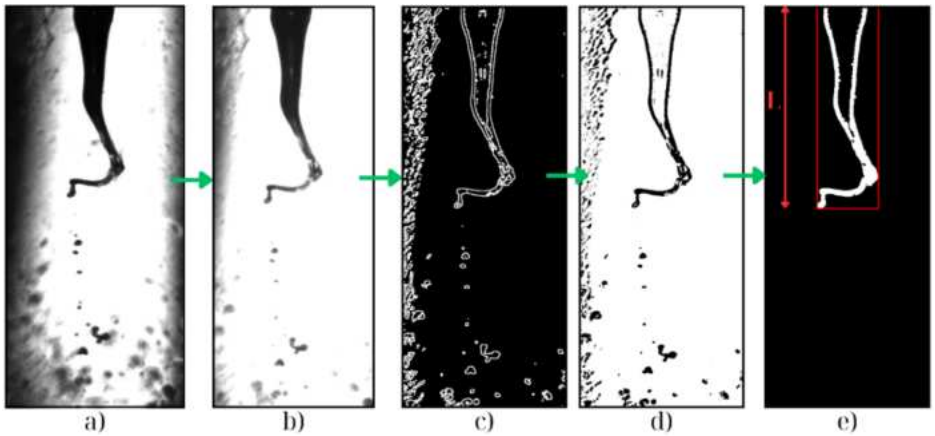
$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4)$$

Trong đó: G_x, G_y là gradient theo trục X và Y.

3.2. Phân tích dữ liệu

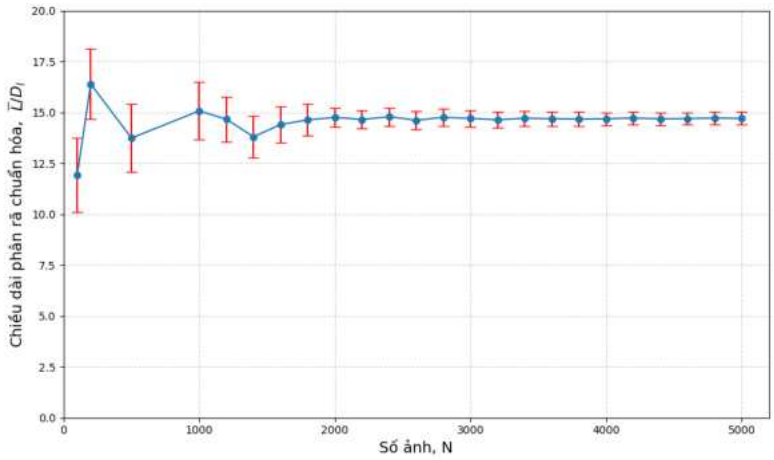
Quy trình xử lý bước đầu được thực hiện với 1 bức ảnh mẫu, kết quả thu được như được thể hiện ở Hình 8. Các biên của lõi chất lỏng được nhận diện rõ ràng, không có sự mất nét do

ảnh hưởng của nhiễu. Sau khi thuật toán xử lý với một lượng ảnh mẫu đạt, tiến hành tự động quy trình xử lý, đo và ghi dữ liệu ra tệp CSV, chuẩn bị dữ liệu cho xử lý đánh giá.



Hình 8. Tiến trình xử lý ảnh với ảnh mẫu a) Ảnh gốc b) Ảnh sau tăng cường c) Ảnh sau nhị phân hóa d) Ảnh sau phát hiện cạnh e) Ảnh sau lọc nhiễu

Để đánh giá độ tin cậy của thuật toán trong việc định lượng chiều dài phân rã chuẩn hóa, phương pháp phân tích số lượng hình ảnh tăng dần đã được thực hiện. Biểu đồ sai số tiêu chuẩn (Hình 9) cho thấy sai số giảm khi số lượng hình ảnh tăng: từ ±0,025 mm với 2000 hình ảnh xuống ±0,018 mm với 3000 hình ảnh và đạt ±0,01 mm với 4000 hình ảnh trở lên. Tuy nhiên, khi số lượng hình ảnh đạt ngưỡng nhất định, sự cải thiện không đáng kể. Vì vậy, số lượng hình ảnh được chọn cho nghiên cứu là 4000 ảnh, đảm bảo độ tin cậy và độ chính xác cao.

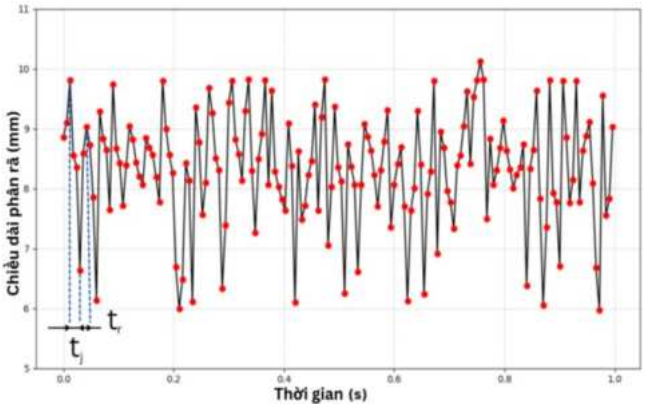


Hình 9. Đồ thị biểu diễn chiều dài phân rã chuẩn hóa ($\overline{L}/D_j$) theo số ảnh mẫu

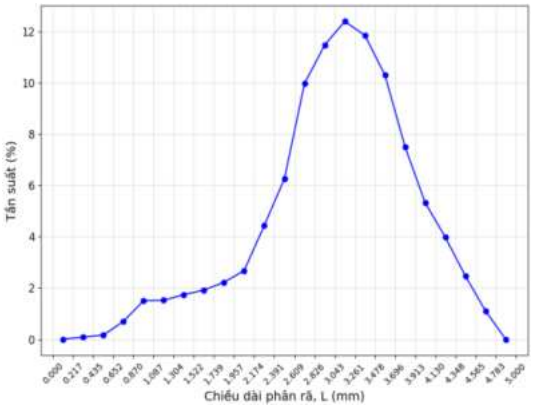
4. Kết quả và thảo luận

Hình 10 thể hiện biến động chiều dài phân rã theo thời gian, thông thường chiều dài phân rã tăng theo chiều về phía hạ lưu cho đến khi xảy ra sự phá vỡ khiến lõi chất lỏng phân rã thành các mảnh, sợi và giọt chất lỏng. Sự kiện này gọi là thời điểm phân rã cục bộ, ký hiệu là t_j, như thể hiện trong hình 10. Sau sự kiện phân rã, lõi chất lỏng nhanh chóng co lại đến một vị trí mới, thời gian co rút được ký hiệu là t_r, như thể hiện trên hình 10. Các quá trình phát triển và co rút này sau đó được lặp lại. Chu kỳ phát triển và co rút này là đặc trưng quan trọng cho vùng phân rã của tia phun. Mặc dù vị trí và thời điểm phân rã là ngẫu nhiên, nhưng hầu như chiều dài phân rã chỉ nằm trong phạm vi hẹp quanh giá trị trung bình ($\overline{L}$), điều này có thể thấy

từ phân bố chiều dài phân rã, thể hiện trên hình 11. Điều này cũng đồng nghĩa với việc có thể sử dụng chiều dài phân rã trung bình thay cho các giá trị chiều dài phân rã tức thời.

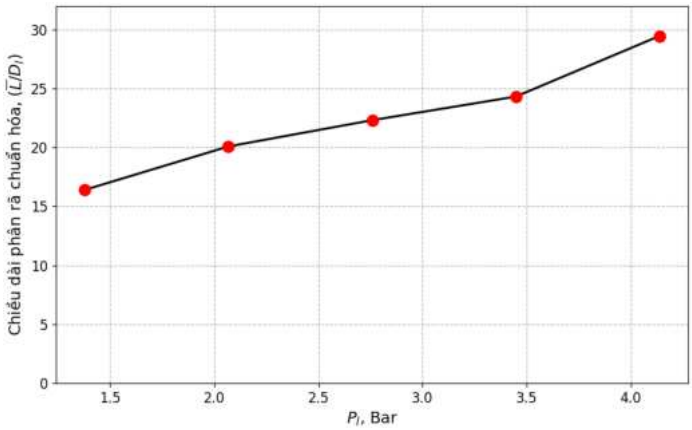


Hình 10. Diễn biến chiều dài phân ra theo thời gian



Hình 11. Phân bố chiều dài phân rã

Trong thí nghiệm, áp suất phun chất lỏng được điều chỉnh tăng từ 1,38 bar đến 4,14 bar để đo chiều dài phân rã trong từng trường hợp và so sánh tương quan giữa các điều kiện. Kết quả được trình bày trong hình 12, cho thấy mối tương quan rõ rệt giữa áp suất phun chất lỏng và chiều dài phân rã. Cụ thể, chiều dài phân rã tăng lên khi áp suất phun tăng, phản ánh sự thay đổi đặc tính dòng chảy. Xu hướng này phù hợp với các kết quả trước đó được trình bày trong hình 3, đặc biệt trong vùng dòng chảy tầng, nơi mà sự gia tăng áp suất thường kéo theo sự kéo dài của vùng phân rã. Những quan sát này cung cấp thêm dữ liệu để hiểu rõ hơn về đặc tính động lực học của chất lỏng trong điều kiện thí nghiệm.



Hình 12. Sự thay đổi của chiều dài phân rã chuẩn hóa $(\overline{L}/D_l)$ theo áp suất phun

Kết quả phân tích cho thấy chiều dài phân rã thay đổi theo thời gian và có sự liên quan chặt chẽ với áp suất phun chất lỏng. Khi áp suất phun tăng, chiều dài phân rã cũng tăng, phản ánh sự thay đổi trong đặc tính dòng chảy. Mặc dù thời điểm và vị trí phân rã có tính ngẫu nhiên, chiều dài phân rã luôn nằm trong phạm vi hẹp quanh giá trị trung bình, cho thấy sự ổn định. Những quan sát này giúp hiểu động lực học chất lỏng và cung cấp cơ sở dữ liệu để tối ưu hóa thiết kế vòi phun, cải thiện hiệu suất hệ thống phun nhiên liệu.

5. Kết luận

Bài báo trình bày hệ thống thử nghiệm và thuật toán xử lý hình ảnh sử dụng thư viện OpenCV để định lượng chiều dài phân rã tia phun trong ống hóa hơi của động cơ tuabin khí cỡ nhỏ. Phương pháp xử lý hình ảnh tự động hóa giúp phân tích lượng lớn hình ảnh và xử lý hiệu

quả các nhiễu do khúc xạ và tán xạ, mang lại độ chính xác cao. Hệ thống thử nghiệm mô phỏng quá trình phân rã tia phun trong điều kiện tương đương thực tế, với nước thay thế nhiên liệu để tránh phức tạp khi sử dụng nhiên liệu thực tế. Kết quả cho thấy chiều dài phân rã trung bình tăng từ 3,7 mm đến 6,5 mm khi áp suất phun tăng trong phạm vi 1,38 đến 4,14 bar, tuy nhiên giá trị này nhỏ hơn khi sử dụng nhiên liệu thực tế do sự khác biệt về độ nhớt và sức căng bề mặt. Độ chính xác đạt mức chấp nhận được khi phân tích ít nhất 3000 hình ảnh, và để đảm bảo độ tin cậy cao cho các nghiên cứu yêu cầu độ không chắc chắn thấp hơn, cần phân tích từ 4000 hình ảnh trở lên. Trong tương lai, việc tích hợp học máy vào quy trình xử lý ảnh sẽ giúp nâng cao độ chính xác, khả năng tự động hóa và cải thiện nhận diện hình thái phá vỡ sơ cấp của tia phun cũng như hình dạng tức thời của sợi chất lỏng.

Tài liệu tham khảo

1. Anfossi, J., (2024). Innovation in micro gas turbines for aeronautical applications, University of London.
2. Large, J. and A. Pesyridis, (2019). Investigation of micro gas turbine systems for high speed long loiter tactical unmanned air systems. *Aerospace*, 6(5): pp. 55. https://doi.org/10.3390/aerospace6050055
3. Weerakoon, A.S., M. Assadi, and M. X, (2023). Trends and advances in micro gas turbine technology for sustainable energy solutions: A detailed review. *Energy Conversion*: pp. 100483. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.100483
4. Waitz, I.A., G. Gauba, and Y.-S. Tzeng. (1996). Combustors for Micro-Gas Turbine Engines. in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/1.2819633
5. Velidi, G. and C.S. Yoo, (2023). A Review on Flame Stabilization Technologies for UAV Engine Micro-Meso Scale Combustors: Progress and Challenges. *Energies*, 16(9): pp. 3968. https://doi.org/10.3390/en16093968
6. Yule, A.J. and D. Salters, (1994). A conductivity probe technique for investigating the breakup of diesel sprays. *Atomization sprays*, 4(1). https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v4.i1.20
7. Charalampous, G., Y. Hardalupas, and A. Taylor, (2009). Novel technique for measurements of continuous liquid jet core in an atomizer. *AIAA journal*, 47(11): pp. 2605-2615. https://doi.org/10.2514/1.40038
8. Cai, W., et al., (2003). Quantitative analysis of highly transient fuel sprays by time-resolved x-radiography. *Applied Physics Letters*, 83(8): pp. 1671-1673. https://doi.org/10.1063/1.1604161
9. Fansler, T.D., S.E. Parrish, and Technology, (2014). Spray measurement technology: a review. *Measurement Science*, 26(1): pp. 012002. https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/1/012002
10. Chehroudi, B., et al., (1985). On the intact core of full-cone sprays. *SAE transactions*: pp. 764-773. https://doi.org/10.4271/850126
11. Eroglu, H., N. Chigier, and Z. Farago, (1991). Coaxial atomizer liquid intact lengths. *Physics of Fluids*, 3(2): pp. 303-308. https://doi.org/10.1063/1.858139
12. Woodward, R., et al. 1994. Correlation of intact-liquid-core length for coaxial injectors. in *ICLASS 94 Proceedings of the Sixth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Begell House. https://doi.org/10.1615/ICLASS-94.1450

13. Faeth, G.M., L.-P. Hsiang, and P.-K. Wu, (1995). Structure and breakup properties of sprays. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(Supplement): pp. 99-127. https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00002-2
14. Kumar, A., S. Sahu, and I. Processing, (2018). Optical visualization and measurement of liquid jet core in a coaxial atomizer with annular swirling air. *Journal of Flow Visualization*, 25(3-4). https://doi.org/10.1615/JFlowVisImageProc.2018027766
15. Moreira, A., A. Moita, and M. Panao, (2010). Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful? *Progress in energy and combustion science*, 36(5): pp. 554-580. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.002
16. Sommerfeld, M. and H. Qiu, (1998). Experimental studies of spray evaporation in turbulent flow. *International journal of heat fluid flow*, 19(1): pp. 10-22. https://doi.org/10.1016/S0142-727X(98)00002-4
17. Lefebvre, A.H. and V.G. McDonell, (2017). Atomization and sprays. CRC press.
18. Haralick, R.M. and L.G. Shapiro, (1985). Image segmentation techniques. *Computer vision, graphics, image processing*, 29(1): pp. 100-132. https:/doi.org/10.1016/S0734-189X(85)90153-7
19. Acharya, T., (2005). Image Processing-Principles and Applications. Wiley-Interscience.
20. Xiaoheng, D., et al. (2018). Edge detection operator for underwater target image. in *2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICIVC.2018.8492749
21. Roy, P., et al. (2014). Adaptive thresholding: A comparative study. in *2014 International conference on control, Instrumentation, communication and Computational Technologies (ICCICCT)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCICCT.2014.6993140
22. Saini, A. and M. Biswas. (2019). Object detection in underwater image by detecting edges using adaptive thresholding. in *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICOEI.2019.8862794
23. García, G.B., et al., (2015). Learning image processing with OpenCV. Packt Publishing Birmingham (UK).

Developing an image processing algorithm to determine the breakup length of spray jets in the vaporizer of a microturbine

Abstract: *This study focuses on developing an image processing algorithm and constructing an experimental model to determine the spray breakup length in the vaporization tube of a small-scale gas turbine engine. The main objective is to accurately identify the breakup length under various operating conditions. The algorithm integrates adaptive thresholding and edge detection techniques using the Sobel operator, enabling precise identification and separation of the spray image from the background. Its accuracy was verified through experiments, which also revealed the influence of operating conditions, such as injection pressure, on the breakup length. The results showed that the average breakup length increased from 3.2 mm to 6.5 mm as the injection pressure rose within the range of 1.38–4.14 bar. This research successfully developed an effective tool for accurately determining the spray breakup length, providing valuable support for studies on vaporization tubes in small-scale gas turbine engines.*

Keyword: Vaporizer, image processing, breakup length, image processing, Sobel operation, OpenCV.

❑

Xác định tải trọng động tác dụng lên hộp số xe tăng T - 54B cải tiến

Lê Xuân Hải[1], Nguyễn Minh Tân[2]

[1]*Học viện Kỹ thuật Quân sự*

* Email: xuanhaiktqs@gmail.com; Contact number: 0967492294

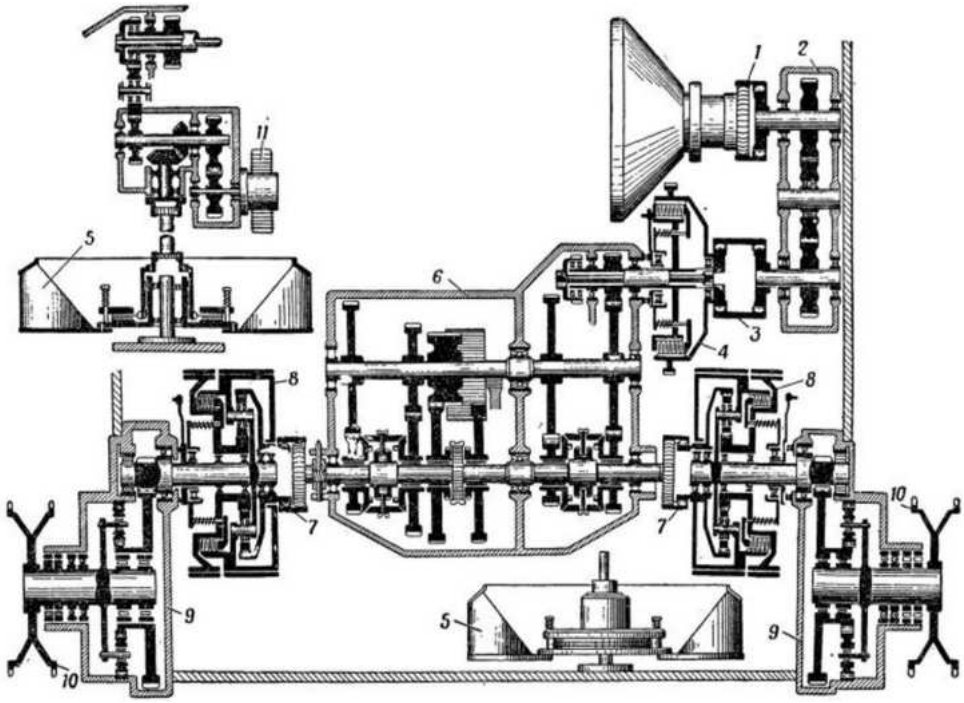
Tóm tắt:

Xe tăng T - 54B cải tiến là một trong những dòng xe chiến đấu chủ lực của Quân đội, được cải tiến từ xe tăng T - 54B nguyên bản để nâng cao sức mạnh hỏa lực, khả năng bảo vệ và tính năng cơ động. Sau khi cải tiến trọng lượng xe tăng thêm 2.3 tấn và động cơ được tăng áp thêm 30 mã lực. Điều này dẫn đến chế độ làm việc của các cụm chi tiết trong hệ thống truyền lực, trong đó có hộp số sẽ nặng nề hơn, do đó cần có những nghiên cứu nhằm đánh giá độ bền của chúng. Bài báo này trình bày cơ sở xây dựng mô hình tính toán, phương pháp xác định tải trọng động tác dụng lên hộp số xe tăng T - 54B cải tiến, từ đó làm cơ sở cho việc tính toán bền các chi tiết trong hộp số.

Từ khóa: *Xe tăng T - 54B cải tiến; tải trọng động; hộp số; độ bền mỏi.*

1. Giới thiệu

Xe tăng T - 54B cải tiến là một trong những phương tiện chiến đấu chủ lực của Quân đội, được nâng cấp từ phiên bản T - 54B nguyên bản nhằm tăng cường khả năng bảo vệ, hỏa lực và cơ động. Các cải tiến bao gồm việc lắp thêm giáp phản ứng nổ, nâng cấp hệ thống điều khiển hỏa lực, thay thế xích và bánh sao chủ động, đồng thời tăng công suất động cơ từ 520 lên 550 mã lực [1]. Những thay đổi này đã làm tăng trọng lượng xe thêm 2,3 tấn, dẫn đến sự gia tăng đáng kể tải trọng tác động lên các bộ phận trong hệ thống truyền lực, đặc biệt là hộp số [2].



Hình 1. Sơ đồ động học của hệ thống truyền lực

1,3, 7. Khớp răng; 2. Ghi ta; 4. Ly hợp chính; 5. Quạt gió; 6. Hộp số; 8. Cơ cấu quay vòng và phanh dừng; 9. Truyền lực cạnh; 10. Bánh chủ động; 11. Máy nén khí.

Hộp số đóng vai trò quan trọng trong hệ thống truyền lực của xe tăng, có nhiệm vụ truyền và biến đổi mômen xoắn từ động cơ đến bánh sao chủ động, giúp xe di chuyển linh hoạt trong các điều kiện địa hình phức tạp và chiến đấu khắc nghiệt [3]. Trong hệ thống động truyền lực của xe tăng T - 54B cải tiến, hộp số được bố trí giữa khoang động truyền lực, nằm giữa ly hợp chính và cơ cấu quay vòng. Cụ thể, trục chủ động của hộp số được nối trực tiếp với ly hợp chính, trong khi trục bị động được nối với cơ cấu quay vòng hai bên. Hộp số chịu tác động trực tiếp của mômen xoắn từ động cơ sau khi truyền qua hộp truyền lực ghi ta và ly hợp chính, cũng như các lực quán tính và va đập, rung động phát sinh trong quá trình vận hành [4].

Các yếu tố này tác động không đều và thay đổi theo thời gian, có thể gây ra các hư hỏng hoặc mài mòn các chi tiết trong hộp số, ảnh hưởng đến tuổi thọ và hiệu suất hoạt động của hộp số [3, 4]. Do đó, việc nghiên cứu và xác định chính xác các tải trọng động là cơ sở để tính toán bền mỏi cho các chi tiết trong hộp số xe tăng T - 54B cải tiến. Điều này không chỉ giúp đánh giá khả năng hoạt động bền bỉ của hộp số trong suốt vòng đời của xe, mà còn đóng góp vào việc tối ưu quá trình cải tiến xe tăng.

2. Cơ sở lý thuyết

Tải trọng tác dụng lên hộp số xe tăng T - 54B cải tiến gồm hai dạng là: tải trọng tĩnh và tải trọng động [2, 5]. Tải trọng tĩnh do tự trọng của các chi tiết và hệ thống lắp đặt trên hộp số gây ra. Tải trọng động bao gồm: mômen xoắn của động cơ thay đổi theo chu kỳ truyền tới, tải trọng thẳng đứng khi xe chuyển động trên đường gồ ghề (tải trọng do cản), tải trọng gây ra khi tăng tốc, chuyển số, khi phanh...

Trong các tải trọng này, mômen xoắn của động cơ truyền tới hộp số là dạng tải trọng động cơ bản nhất, là thành phần chủ yếu gây ra ứng suất biến đổi theo chu kỳ trong kết cấu của hộp số làm xuất hiện những hư hỏng do mỏi đối với các chi tiết của hộp số. Do đó trong giới hạn của bài báo ta chủ yếu xét tới tải trọng này.

Khi làm việc lực và mômen tác dụng lên cơ cấu trục khuỷu thanh truyền bao gồm: Lực quán tính chuyển động tịnh tiến, lực quán tính ly tâm, lực khí thể, lực ma sát, phản lực khí thể. Trong các lực này thì lực quán tính và lực khí thể có ảnh hưởng lớn hơn cả. Vì vậy trong quá trình tính toán động lực học ta có thể bỏ qua ảnh hưởng của các lực khác mà chỉ xét lực khí thể và lực quán tính [3].

2.1. Xác định lực khí thể tác dụng lên cơ cấu trục khuỷu thanh truyền

Lực khí thể được tạo bởi sự chênh áp suất giữa mặt trên và mặt dưới đỉnh pít tông. Coi lực khí thể P_k tập trung thành một vectơ tác dụng dọc theo phương đường tâm xi lanh và cắt đường tâm chốt piston [4]:

$$P_k = \left(p - p_0\right)\frac{\pi.D^2}{4} \quad [MN] \tag{1}$$

Trong đó: p - là áp suất của môi chất công tác trong xi lanh; p_0 - là áp suất môi trường; D - là đường kính xi lanh.

Như vậy, để xác định được lực khí thể tác dụng lên cơ cấu trục khuỷu thanh truyền, chúng ta phải xây dựng đồ thị công chỉ thị của chu trình công tác p - v, sau đó triển khai đồ thị p - v thành đồ thị lực khí thể P_k tác dụng lên pít tông theo góc quay α.

Đồ thị công chỉ thị của chu trình công tác p - v sẽ được xây dựng thông qua việc xác định nhiệt độ, áp suất cuối quá trình nạp, quá trình nén, quá trình cháy, quá trình dãn nở.

Tính toán quá trình nạp:

Hệ số khí sót được tính theo biểu thức sau [4]:

$$\gamma_r = \frac{p_r T_0}{(\varepsilon - 1) p_0 T_r \eta_v} \tag{2}$$

Trong đó: p_r - là áp suất cuối quá trình thải cưỡng bức; T_0 - là nhiệt độ môi trường; ε - là tỷ số nén; p_0 - là áp suất môi trường; T_r - là nhiệt độ cuối quá trình thải; η_v - là hệ số nạp.

Nhiệt độ cuối quá trình nạp được tính theo biểu thức:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \qquad [^0K] \tag{3}$$

Trong đó: ΔT - là độ sấy nóng khí nạp

Áp suất cuối quá trình nạp được tính theo biểu thức:

$$p_a = \frac{(\varepsilon - 1)(1 + \gamma_r)\eta_v T_0}{\varepsilon T_0} \quad [MPa] \tag{4}$$

Tính toán quá trình nén:

Áp suất cuối quá trình nén được tính như sau [4]:

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} \quad [MPa] \tag{5}$$

Với n_1 là chỉ số nén đa biến trung bình

Nhiệt độ cuối quá trình nén được xác định theo biểu thức:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1} \quad \left[^0 K\right] \tag{6}$$

Tính toán quá trình cháy:

Tỷ số dãn nở sớm được tính theo biểu thức:

$$\rho = \frac{\theta T_z}{\lambda_p T_c} \tag{7}$$

Với: θ - là hệ số thay đổi phân tử thực tế; λ_p - là tỷ số tăng áp

Tính toán quá trình dãn nở:

Áp suất cuối quá trình dãn nở:

$$p_b = \frac{p_z}{\left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^{n_2}} \qquad [MPa] \tag{8}$$

Với: p_z - là áp suất cuối quá trình cháy; n_2 - là chỉ số dãn nở đa biến trung bình

Nhiệt độ cuối quá trình dãn nở:

$$T_b = \frac{T_z}{\left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^{n_2-1}} \left[{}^0K\right] \quad (9)$$

Dựng đồ thị công chỉ thị của chu trình công tác:

Thống kê giá trị của các thông số đã tính ở các quá trình như áp suất khí thể ở các điểm đặc trưng p_a, p_c, p_z, p_b, chỉ số nén đa biến trung bình n_1, chỉ số dãn nở đa biến trung bình n_2, tỷ số nén ε, thể tích công tác V_h, thể tích buồng cháy V_c và tỷ số dãn nở sớm ρ. Từ đó ta xây dựng được đồ thị công chỉ thị của động cơ xe T - 54B cải tiến. Triển khai đồ thị p - v sẽ được đồ thị lực khí thể P_k tác dụng lên pít tông theo góc quay α (P_k - α) đối với dãy chính. Do hành trình của pít tông xi lanh chính gần bằng xi lanh phụ nên ta coi đồ thị P_k - α của xi lanh chính cũng là đồ thị P_k - α của xi lanh phụ nhưng ở góc quay khác tương ứng với thứ tự làm việc của động cơ ta được đồ thị lực khí thể P_k tác dụng lên pít tông.

2.2. Xác định lực quán tính tác dụng lên cơ cấu trục khuỷu thanh truyền

Lực quán tính khối lượng chuyển động tịnh tiến dãy xi lanh chính là [3]:

$$P_{jc} = -m_{jc}R\omega^2(cos\alpha + cos2\alpha) \quad [\text{N}] \quad (10)$$

Trong đó: m_{jc} - là khối lượng chuyển động tịnh tiến ở dãy xi lanh chính; R - là bán kính quay của khuỷu trục; ω - là vận tốc góc trục khuỷu; λ - là hệ số kết cấu của động cơ; α - là góc quay trục khủy của động cơ.

Lực quán tính của khối lượng chuyển động tịnh tiến dãy xi lanh phụ:

$$P_{jp} = -m_{jp}.J_p \qquad [\text{N}] \quad (11)$$

Với gia tốc của pít tông xi lanh dãy phụ được tính theo biểu thức sau [3]:

$$J_p = R\omega^2 \left\{ \begin{array}{l} \cos\alpha_1 - \sin\alpha_1.\tan\beta_1 + \dfrac{R\left[\cos\alpha_1 - \dfrac{r_1\cos\alpha.\cos\xi}{L\cos\beta}\right]^2}{l_1\cos^3\beta_1} + \dfrac{r_1\lambda\cos^2\alpha}{L\cos^2\beta.\cos\zeta} - \\ \dfrac{r_1\sin(\xi-\beta)}{L\cos\beta\cos\beta_1}.\dfrac{\sin\alpha + \lambda\cos^2\alpha.\sin(\xi-\beta)}{\cos^2\beta.\cos\xi} \end{array} \right\} \quad (12)$$

Trong đó: β - là góc lắc giữa thanh truyền chính xung quanh chốt piston so với đường tâm xi lanh dãy chính: $\beta = \arcsin(\lambda\sin\alpha)$; ξ - là góc giữa đường tâm xi lanh dãy phụ và bán kính phụ r_1: $\xi = \beta + \gamma - \gamma_1$; γ - là góc nhị diện; γ_1 - là góc kết cấu; α_1 - là góc quay của bán kính R của khủy chung tương đối so với đường tâm xi lanh dãy phục: $\alpha_1 = \alpha - \gamma$; β_1 - là góc lắc của thanh truyền phụ xung quanh chốt piston so với đường tâm xi lanh dãy phụ: $\beta_1 = \arcsin\left(\frac{R}{l_1}\sin\alpha_1 - \frac{r_1}{l_1}\sin\xi\right)$

2.3. Xác định mômen xoắn của động cơ

Lực tác dụng lên chốt pít tông P_Σ là tổng lực khí thể và lực quán tính chuyển động tịnh tiến [4]:

$$P_{\Sigma} = P_k + P_j = P_{\Sigma c} + P_{\Sigma p} \quad [N] \tag{13}$$

Với: $P_{\Sigma c}$ - là tổng lực của xi lanh chính: $P_{\Sigma c} = P_{kc} + P_{jc}$;

$P_{\Sigma p}$ - là tổng lực của xi lanh phụ: $P_{\Sigma p} = P_{kp} + P_{jp}$.

Lực tiếp tuyến T_{Σ} của một cặp xi lanh được xác định như sau:

$$T_{\Sigma} = T_c + T_p \quad [N] \tag{14}$$

Lực tiếp tuyến của xi lanh chính được xác định theo biểu thức:

$$T_c = P_{\Sigma c}.\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta} \quad [N] \tag{15}$$

Lực tiếp tuyến của xi lanh phụ:

$$T_p = \frac{P_{\Sigma p}}{\cos\beta_1}\sin(\alpha_1+\beta_1) \quad [N] \tag{16}$$

Lực tiếp tuyến tổng của động cơ T_{Σ} sẽ được xác định từ việc tổng hợp các lực tiếp tuyến thành phần. Động cơ B - 54B trên xe tăng T - 54B cải tiến là động cơ 4 kỳ 12 xi lanh kiểu chữ V, góc nhị diện $\gamma = 60^0$. Góc lệch pha công tác là: $\delta = \frac{180^0.\tau}{i} = 60^0$ (trong đó τ - số kỳ, i- số xi lanh). Các xi lanh được đánh số thứ tự theo dãy bằng chỉ số (t - trái, p - phải). Thứ tự công tác, góc quay của trục khuỷu tương ứng như sau:

1t →	6p →	5t →	2p →	3t →	4p →	6t →	1p →	2t →	5p →	4t →	3p →
0^0	660^0	600^0	540^0	480^0	420^0	360^0	300^0	240^0	180^0	120^0	60^0

Từ đó suy ra rằng: Khi lực T_{1t} của xi lanh 1 bên trái biến thiên từ 0^0 đến 60^0 (góc quay trục khuỷu) thì lực T_{6p} của xi lanh 6 bên trái biến thiên từ 600^0 đến 720^0, lực T_{5t} từ 600^0 đến 660^0, tương tự với các lực ứng với các xi lanh. Các thành phần lực T_{1t}, T_{6p}, T_{5t},....., T_{3p} coi như có cùng quy luật biến thiên như nhau và trị số được lấy từ bảng lực T đã lập trước. Khi đó :

$$T_{\Sigma} = T_{1t} + T_{6p} + T_{5t} + T_{2p} + T_{3t} + T_{4p} + T_{6t} + T_{1p} + T_{2t} + T_{5p} + T_{4t} + T_{3p} \quad [N] \tag{17}$$

Mômen xoắn của động cơ được xác định như sau [4]:

$$M_e = M_i\eta_{co} = T_{\Sigma}R\eta_{co} \quad \text{[N.m]} \tag{18}$$

Mômen xoắn truyền đến trục chủ động của hộp số được xác định theo công thức:

$$M_{hs} = M_e.i_{gt} \tag{19}$$

Trong đó i_{gt} là tỷ số truyền của hộp truyền lực ghi ta (i_{gt}= 0,7)

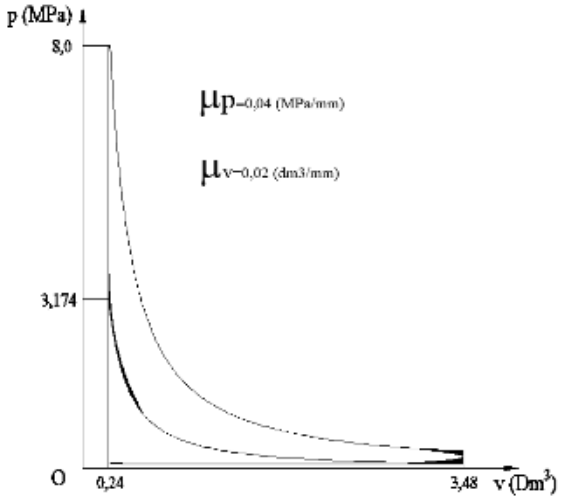
3. Kết quả và thảo luận

Các thống số đầu vào của bài toán xác định tải trọng động tác dụng lên hộp số chính là các thông số của động cơ xe tăng T - 54B cải tiến:

TT	Tên chi tiết	Thông số kỹ thuật	Đơn vị
1	Động cơ B - 54B	Diesel 4 kì, phun nhiên liệu trực tiếp, buồng cháy thống nhất	
2	Số xi lanh	i=12	
3	Kiểu bố trí xi lanh	Hai hàng chữ V	
4	Góc nhị diện	γ=60	Độ
5	Đường kính xi lanh	D = 0,15	m
6	Hành trình pít tông - Dãy trái - Dãy phải	S 180 186,7	 mm mm
7	Thể tích công tác của toàn bộ xi lanh	38,88	dm^3
8	Tỷ số nén	ε =14,5	
9	Vận tốc trung bình của pít tông	C_{TB} =12,42	m/s
10	Thứ tự làm việc của xi lanh	1^T-6^P-5^T-2^P-3^T-4^P-6^T-1^P-2^T-5^P-4^T-3^P	
11	Chiều quay trục khuỷu	Thuận chiều kim đồng hồ (nhìn từ phía đầu động cơ)	
12	Công suất định mức (ở vòng quay 2000 v/ph)	N_{emax} = 550	Mã lực
13	Tốc độ quay của trục khuỷu - Với công suất định mức - Ứng với mômen lớn nhất - Ổn định nhỏ nhất	n_{emax}=2000 n_{eM} = 1200 ÷ 1300 n_{emin} = 500 ÷ 600	v/ph
14	Suất tiêu hao nhiên liệu	190 ± 5	g/mlh
15	Chiều dài thanh truyền chính	L = 0,32	m
16	Chiều dài thanh truyền phụ	l = 0,2	m
17	Bán kính quay của trục khủy	R = 0,09	m
18	Bán kính phụ	r_1 = 0,08	m
19	Góc kết cấu	γ_1 = 67	Độ
20	Góc phun sớm nhiên liệu	30-32	Độ
21	Góc mở sớm xupap nạp	20 ± 3	Độ
22	Góc đóng muộn xupap thải	48 ± 3	Độ
23	Nhiệt độ môi trường	T_0 = 297	^{0}K
24	Áp suất môi trường	p_0 = 0,103	MPa
25	Hệ số nạp	η_v = 0,8	
26	Áp suất cuối quá trình thải cưỡng bức	p_r = 0,110	MPa
27	Nhiệt độ cuối quá trình thải	T_r = 800	^0K
28	Độ sấy nóng khí nạp	ΔT = 15	^0K

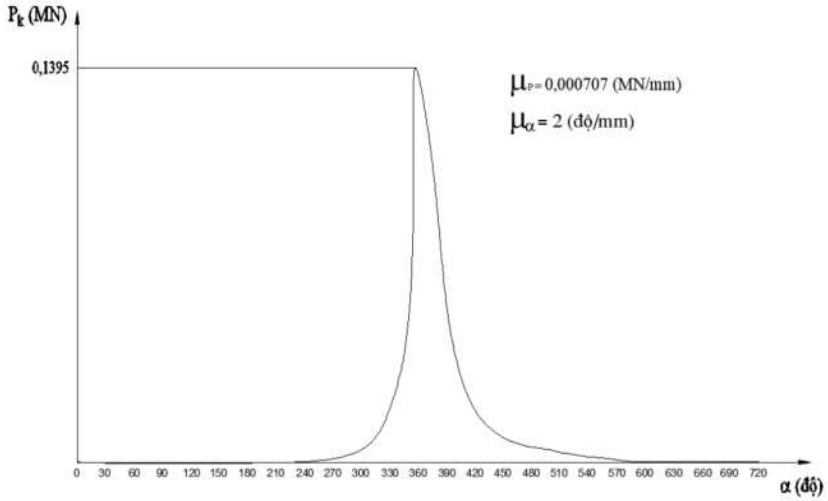
TT	Tên chi tiết	Thông số kỹ thuật	Đơn vị
29	Chỉ số nén đa biến trung bình	$n_1 = 1,34$	
30	Áp suất cuối quá trình cháy	$p_z = 8$	MPa
31	Chỉ số dãn nở đa biến trung bình	$n_2 = 1,22$	
32	Hệ số kết cấu	$\lambda = 0.28125$	
33	Thể tích công tác của xi lanh	$V_h = 3,24$	dm^3
34	Thể tích buồng cháy	$V_c = 0,24$	dm^3
35	Khối lượng chuyển động tịnh tiến ở dãy xi lanh chính	$m_{jc} = 4,957$	Kg
36	Khối lượng chuyển động tịnh tiến ở dãy xi lanh phụ	$m_{jp} = 4,971$	Kg

Dựa trên các công thức trong phần 2 và sử dụng phần mềm Mathcad 15.0 để tính toán, ta xây dựng được đồ thị công chỉ thị của động cơ xe T - 54B cải tiến như hình 2.



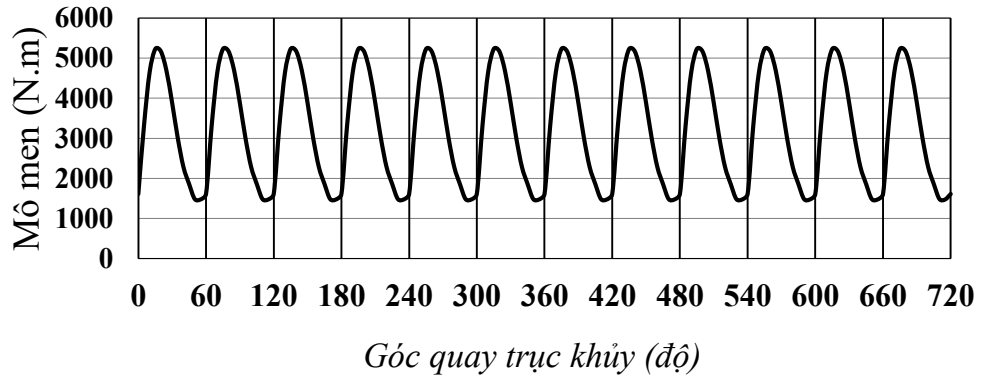
Hình 2. Đồ thị chỉ thị công của động cơ xe tăng T - 54B cải tiến

Triển khai đồ thị p - v thành đồ thị lực khí thể P_k tác dụng lên pít tông theo góc quay α, ta được đồ thị như hình 3.



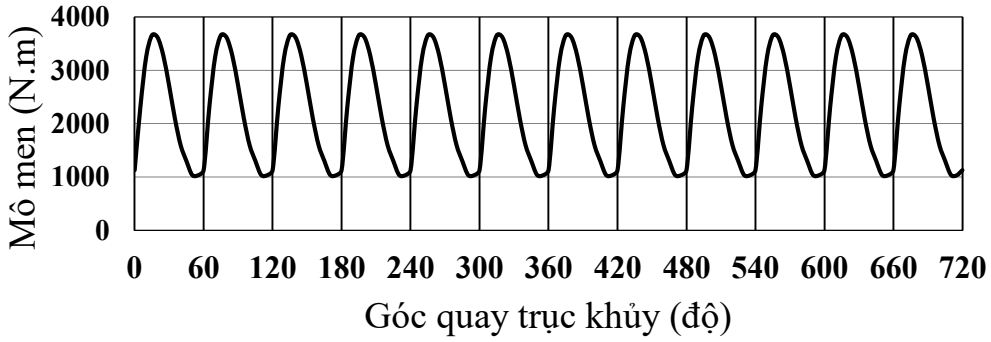
Hình 3. Đồ thị lực khí thể theo góc quay α của trục khuỷu

Từ đó xây dựng được đồ thị mômen xoắn động cơ theo góc quay trục khuỷu như hình 4.



Hình 4. Đồ thị mômen xoắn của động cơ theo góc quay trục khuỷu

Đồ thị mômen xoắn động cơ truyền đến trục chủ động hộp số theo góc quay trục khuỷu được thể hiện như hình 5.



Hình 5. Đồ thị mômen xoắn động cơ truyền đến trục chủ động hộp số

Do quy luật biến thiên của mômen này là đường cong phức tạp phụ thuộc vào số kỳ, khối lượng các chi tiết, tốc độ trục khuỷu... nên để phục vụ cho bài toán tính bền mỏi ta phải *phân tích điều hòa mômen xoắn tác dụng lên trục chủ động hộp số* thành tập hợp các đường cong điều hòa (phân tích Fourier).

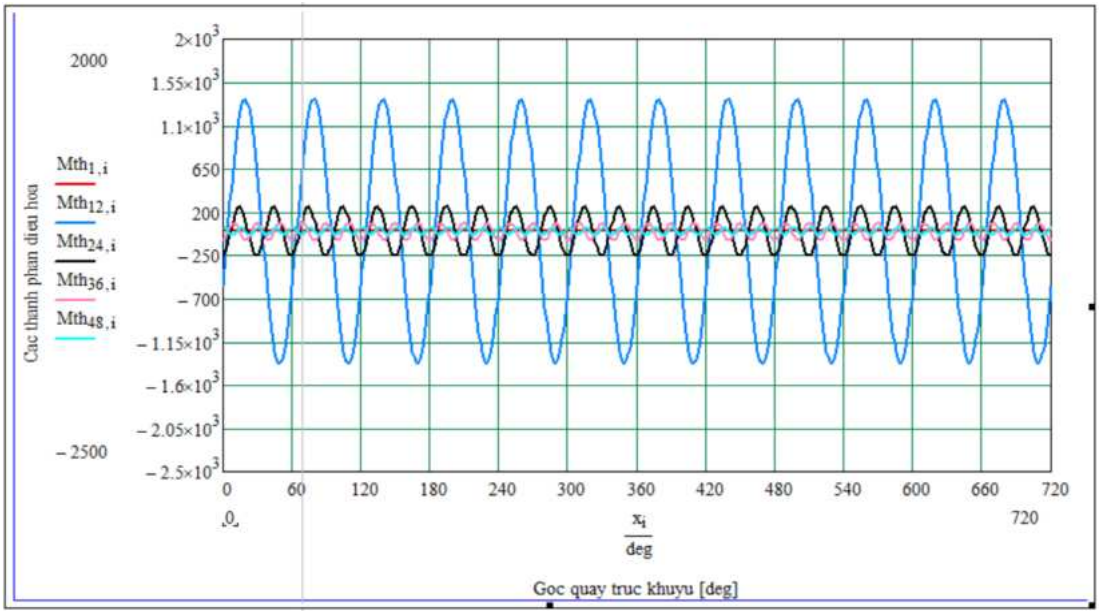
Một hàm tuần hoàn có chu kỳ T, luôn có thể được phân tích thành hai thành phần: thành phần cố định và thành phần điều hòa [6, 7]:

$$M_{cđ} = M_0 + \sum_{k=1}^{n} M_k \sin(k\omega_k t + \alpha_k) = M_0 + \left[\sum_{k=1}^{n}\left(a_k.\cos\left(\frac{k}{2}x_i\right) + b_k.\sin\left(\frac{k}{2}x_i\right)\right)\right] \quad (20)$$

Trong đó: M_0 - mômen xoắn trung bình = const; M_k - biên độ của thành phần điều hòa thứ k; ω_k - tần số góc cơ sở; α_k - pha ban đầu của thành phần điều hòa thứ k; a_k, b_k - các hệ số Fourier.

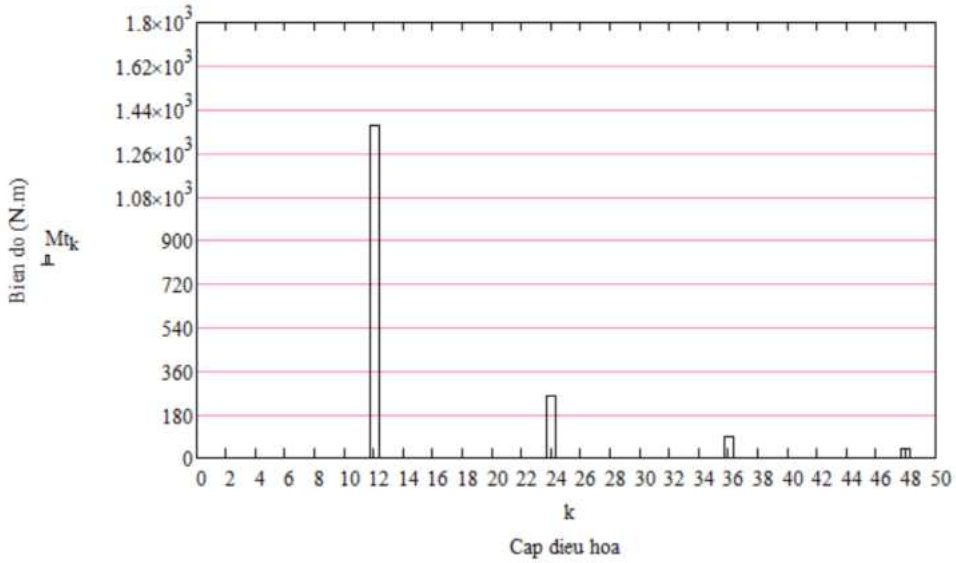
Về mặt lý thuyết, số lượng các thành phần điều hòa có thể là vô cùng và được giới hạn bởi dải tốc độ làm việc của động cơ. Trên thực tế ta chỉ cần xét 48 cấp điều hòa là đủ, bởi các cấp điều hòa cao hơn thì biên độ dao động của nó là quá nhỏ có thể bỏ qua [8].

Chương trình tính toán, phân tích điều hòa mômen xoắn tác dụng lên hộp số xe T - 54B cải tiến được thực hiện bằng phần mềm MathCad 15, cho ta kết quả như trên Hình 6.



Hình 6. Kết quả phân tích điều hòa mômen xoắn tác dụng lên hộp số

Để thấy rõ được biên độ của mômen điều hòa các cấp, ta biểu diễn mômen này trên đồ biên độ - tần số (được thể hiện qua cấp điều hòa).

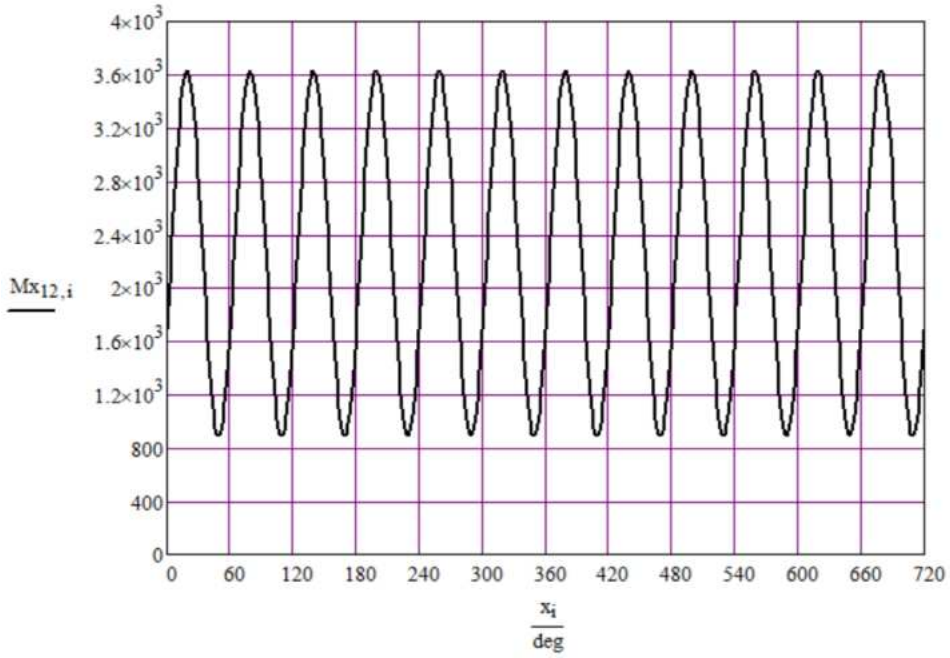


Hình 7. Phổ mômen xoắn của động cơ truyền đến hộp số

Dựa vào đồ thị hình 7 ta nhận thấy: Tại các cấp điều hòa k = 12, 24, 36, 48 biên độ của mômen xoắn là tương đối lớn, còn tại các cấp khác biên độ mômen xoắn coi như bằng 0 nên có thể bỏ qua. Khi tính toán mỏi hộp số ta chủ yếu xét ở các trạng thái này. Biên độ mômen xoắn tại các cấp điều hòa như sau:

Cấp điều hòa	12	24	36	48
Biên độ M_k (N.m)	1372	258	88	38

Trong đó tại cấp điều hòa k=12, biên độ là lớn nhất M_k= 1372 (N.m). Với M_0= 2258 (N.m) ta nhận được đồ thị mômen của động cơ ở cấp điều hòa k=12 như trên hình 8 (Đây chính là tải trọng đầu vào cho bài toán tính bền mỏi hộp số).



Hình 8. Mômen xoắn của động cơ ở cấp điều hòa biên độ lớn nhất

4. Kết luận

Xác định tải trọng động tác dụng lên hộp số xe tăng T - 54B cải tiến là bước quan trọng trong việc đánh giá độ bền và tuổi thọ của các chi tiết trong hệ thống truyền lực nói chung và trong hộp số nói riêng. Trong các dạng tải trọng động tác dụng lên hộp số thì mômen xoắn từ động cơ truyền đến trục chủ động hộp số là tải trọng động chủ yếu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, mômen xoắn này có sự biến đổi lớn theo góc quay của trục khuỷu, đặc biệt là tại các cấp điều hòa có biên độ lớn. Tại cấp cấp điều hòa k = 12, biên độ mômen xoắn trên trục chủ động của hộp số ở có giá trị cao nhất (1372 N.m), điều này cần được chú ý khi tính toán độ bền mỏi của hộp số.

Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp các thông số cần thiết cho tính toán bền mỏi mà còn có thể là cơ sở để cải tiến hay thiết kế mới hộp số, tối ưu hóa khả năng vận hành và bảo vệ xe trong các điều kiện chiến đấu khắc nghiệt.

Tài liệu tham khảo

1. Cục Xe- Máy/Tổng cục Kỹ thuật. (2024). *Cấu tạo và hướng dẫn sử dụng xe tăng T - 54B cải tiến*, NXB QĐND.
2. Nguyễn Văn Luận, Lê Kỳ Nam. (1999). *Kết cấu và tính toán xe TTG phần hai: Hệ thống truyền lực,* Học viện KTQS.
3. Lương Đình Thi. (2017). *Kết cấu tính toán động cơ đốt trong*, NXB QĐND.

4. Vi Hữu Thành, Vũ Anh Tuấn. (2003). *Hướng dẫn đồ án môn học động cơ đốt trong*, Học viện KTQS.
5. Trịnh Chất, Lê Văn Uyển. (2020). *Tính toán thiết kế hệ dẫn động cơ khí tập một, tập hai*; NXB Giáo Dục.
6. Ngô Văn Quyết, Phạm Ngọc Phúc. (1999). *Tính toán độ bền mỏi chi tiết máy có kể tới xác suất phá hủy,* Hội nghị cơ học vật rắn biến dạng Toàn quốc.
7. Ngô Văn Quyết. (2000). *Cơ sở lý thuyết mỏi*, NXB Giáo dục.
8. Nguyễn Minh Tân. (2024). *Xác định độ bền mỏi hộp số xe xích chiến đấu T54B cải tiến bằng phương pháp phần tử hữu hạn*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số tháng 11.

Determination of Dynamic Load Acting on the Gearbox of the Upgraded T - 54B Tank

Abstract: *The improved T - 54B tank is one of the main battle tank variants of my Army, developed from the original T - 54B to enhance its firepower, protection, and mobility. After the improvement, the weight of vehicle increased by 2.3 tons and its engine has been turbocharged by an additional 30 horsepower. This resulted in a more demanding operational load on the components of the transmission system, including the gearbox, which requires further research to assess their durability. This paper presents the basis for constructing a computational model and the method for determining the dynamic load applied to the gearbox of the improved T - 54B tank, which serves as the foundation for calculating the fatigue strength of the gearbox components.*

Keywords: The improved T - 54B tank; dynamic load; gearbox; fatigue strength.

❑

Nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ cách nhiệt tới trạng thái nhiệt của piston động cơ diesel

Nguyễn Văn Dương[1]

[1]*Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự*

duongnv@lqdtu.edu.vn; Tel: 0867534435

Tóm tắt

Độ bền của vật liệu piston phụ thuộc rất lớn vào nhiệt độ, đặc biệt ở nhiệt độ cao, độ bền của vật liệu bị suy giảm nghiêm trọng. Vì vậy, giảm nhiệt độ là biện pháp hiệu quả để tăng sức bền piston. Để giảm nhiệt độ piston, thường sử dụng 2 phương pháp, hoặc là tăng khả năng thoát nhiệt từ piston sang môi trường xung quanh, hoặc là giảm nhiệt lượng hấp thụ bởi piston. Trong đó, việc giảm lượng nhiệt hấp thụ bởi piston bằng lớp phủ cách nhiệt được xem là phương pháp có hiệu quả cao. Bài báo khảo sát ảnh hưởng của lớp phủ cách nhiệt tới trạng thái nhiệt độ của piston và thông số chu trình công tác của động cơ D80. Kết quả cho thấy, lớp phủ cách nhiệt làm giảm đáng kể nhiệt độ piston và thông lượng nhiệt truyền đến bề mặt đỉnh piston. Tuy nhiên thông số chu trình công tác của động cơ thay đổi không đáng kể.

Từ khóa: *Piston, lớp phủ cách nhiệt, lớp liên kết, trạng thái nhiệt độ, D-80.*

1. Đặt vấn đề

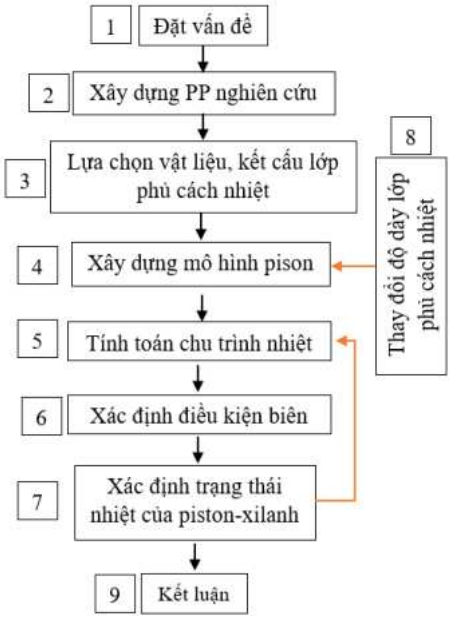
Tăng công suất lít, hiệu suất nhiên liệu và giảm phát thải động cơ luôn là các vấn đề cấp thiết đối với các nhà sản xuất động cơ, để đáp ứng nhu cầu tiêu dùng. Tuy nhiên, việc tăng công suất lít của động cơ cũng đồng nghĩa rằng các chi tiết máy phải làm việc trong điều kiện khắc nghiệt hơn, đặc biệt là piston. Trong động cơ diesel hạng nặng, áp suất khí cháy tác dụng lên đỉnh piston có thể lên tới hơn 20Mpa [1], và nhiệt độ đỉnh piston có thể lên tới hơn 800^{o}C [2]. Để đáp ứng yêu cầu cường hóa động cơ đốt trong như hiện nay thì độ bền và độ tin cậy của piston cần phải được cải thiện.

Độ bền của vật liệu piston phụ thuộc rất lớn vào nhiệt độ, nhiệt độ càng cao thì giới hạn bền của vật liệu càng giảm, đặc biệt ở trong dải nhiệt độ cao, giới hạn bền của vật liệu bị suy giảm nghiêm trọng [3]. Vì vậy, giảm nhiệt độ làm việc của piston đang là vấn đề được quan tâm hàng đầu. Để giảm nhiệt độ piston, thường sử dụng 2 phương pháp: hoặc là tăng khả năng thoát nhiệt từ piston sang môi trường xung quanh, một trong số đó là tăng cường làm mát piston [4]; hoặc là giảm nhiệt lượng hấp thụ bởi piston. Trong đó, việc giảm lượng nhiệt hấp thụ bởi piston bằng lớp phủ cách nhiệt được xem là phương pháp hiệu quả và mang lại lợi ích kinh tế cao [5 - 7]. Vật liệu làm lớp phủ cách nhiệt có hệ số dẫn nhiệt thấp hơn nhiều so với vật liệu piston, giúp giảm nhiệt lượng truyền đến piston, đồng thời, vật liệu có nhiệt độ nóng chảy cao, đáp ứng yêu cầu làm việc trong buồng đốt của động cơ đốt trong [8].

Các nghiên cứu về lớp phủ cách nhiệt thường tập trung vào các động cơ piston nhôm và các động cơ diesel với đường kính xilanh nhỏ và trung bình [5-7, 9]. Tuy nhiên, piston của động cơ diesel hạng nặng, làm từ thép hoặc gang chịu nhiệt thường có nhiệt độ làm việc cao hơn nhiều so với các loại động cơ còn lại. Ở dải nhiệt độ cao, sức bền của vật liệu bị suy giảm nhanh chóng, vì vậy, sử dụng lớp phủ cách nhiệt có thể làm giảm nhiệt độ làm việc của piston và làm tăng đáng kể sức bền của piston [3, 10]. Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ cách nhiệt tới trạng thái nhiệt độ của piston động cơ diesel hạng nặng với đường kính

xi lanh lớn. Cụ thể là động cơ diesel 4 kỳ D80 với đường kính xi lanh 260mm được sử dụng trên trên đầu máy tàu hỏa.

Khi nghiên cứu lớp phủ cách nhiệt cho piston, lựa chọn vật liệu và kết cấu lớp phủ cách nhiệt phù hợp có ý nghĩa hết sức quan trọng. Kết cấu lớp phủ cách nhiệt thường bao gồm 2 hoặc nhiều lớp, trong đó, lớp dưới cùng là lớp kết dính (lớp liên kết) để liên kết bề mặt piston với các lớp phủ cách nhiệt ở trên [9]. Đối với các chất nền bằng thép và gang, lớp phủ liên kết thường là hợp kim phun nhiệt loại MCrAlY, trong đó M là viết tắt của Fe, Ni, Co hoặc kết hợp các nguyên tố này [6]. Hiện nay, lớp phủ YSZ (Yttria stabilized zirconia) với những ưu điểm tuyệt vời đã được nhiều nhà nghiên cứu áp dụng trên động cơ diesel [9, 11] và hợp kim NiCrAlY đã được đề xuất là lớp phủ liên kết khả thi trong động cơ diesel [7]. Đối với lớp phủ YSZ, tổng độ dày lớp phủ và lớp liên kết thường được lựa chọn nhỏ hơn 0,7 mm [7]. Mặt khác, độ dày của lớp liên kết nên trong khoảng 0,1- 0,15mm [12, 13] .



Hình 1. Sơ đồ nghiên cứu

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Dựa vào các phân tích trong phần 1, phương pháp nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ cách nhiệt tới trạng thái nhiệt của piston được xác định như hình 1.

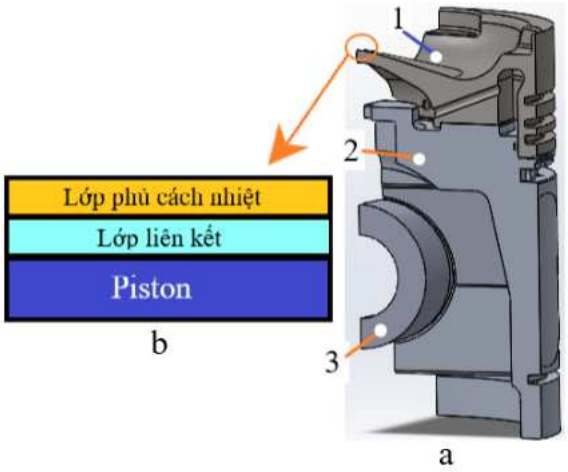
Sau khi đặt vấn đề và xây dựng phương pháp nghiên cứu, cần lựa chọn vật liệu và kết cấu lớp phủ cách nhiệt (bước 3). Kết cấu lớp phủ cách nhiệt được xem xét ở đây là độ dày của nó. Mô hình piston được xây dựng trong phần mềm Ansys workbench (bước 4). Độ dày của lớp phủ cách nhiệt được thay đổi theo các trường hợp khác nhau để phân tích trạng thái nhiệt độ piston (bước 8).

Lưu ý rằng, khi thay đổi độ dày lớp phủ cách nhiệt, nhiệt độ piston sẽ thay đổi, theo đó tính chất quá trình trao đổi nhiệt giữa piston với môi trường xung quanh (khí cháy, chất làm mát, các chi tiết…) cũng thay đổi, vì vậy cần xác định lại điều kiện biên trên các bề mặt piston (bước 6).

Bài báo khảo sát trạng thái nhiệt độ của piston đối với piston nguyên bản (**NB**) và với các giá trị khác nhau của độ dày lớp phủ cách nhiệt **TH1, TH2, TH3, TH4, TH5**, tương ứng với 5 trường hợp khảo sát. Giá trị độ dày lớp phủ cách nhiệt theo các trường hợp khảo sát được thể hiện trong bảng 3. Ngoài ra, piston được xử lý bề mặt để không làm thay đổi tỉ số nén và va chạm với xupáp khi động cơ hoạt động.

2.2. Lựa chọn vật liệu và độ dày lớp phủ cách nhiệt.

Piston động cơ D80 thuộc kiểu piston ghép, phần đầu piston động cơ D80 được làm từ thép chịu nhiệt 20Х3МВФ, phần thân được làm từ hợp kim nhôm АК - 4. Tính chất nhiệt của thép 20Х3МВФ và nhôm АК-4 như trong bảng 1. Kết cấu piston và kết cấu lớp phủ cách nhiệt như trong hình 2.



Hình 2 - cấu tạo piston (a) và kết cấu lớp phủ cách nhiệt trên bề mặt đỉnh piston (b)
1 - Đầu piston, 2 - thân piston, 3 - chốt piston

Dựa vào các phân tích trong phần 1, tác giả lựa chọn lớp phủ cách nhiệt từ vật liệu 8YSZ, lớp liên kết từ FeCrAlY với tính chất vật liệu như trong bảng 2. Độ dày lớp phủ cách nhiệt và lớp liên kết theo các trường hợp (**TH1, TH2, TH3, TH4, TH5**) được lựa chọn như trong bảng 3.

Bảng 1 - Hệ số dẫn nhiệt của thép chịu nhiệt 20Х3МВФ và nhôm АК - 4 vào nhiệt độ [3, 10]

	T, C	20	200	300	400	500	600	700
20Х3МВФ	λ, [w/m.K]	38,5	35,6	33,1	31,4	30,6	29,1	28,9
АК-4	λ, [w/m.K]	144	158	167	170	177	190	202

Trong bảng 1, 2: T - nhiệt độ, [^oC]; λ - hệ số dẫn nhiệt, [w/m.K]; C_p - nhiệt dung riêng, [J/kg.K]; α - hệ số giãn nở vì nhiệt, [1/K]; E - mô dun đàn hồi, [Mpa] ; σ_B - giới hạn bền kéo, [Mpa]; σ_T - giới hạn chảy, [Mpa]; $\sigma_{дл}$ - giới hạn bền dài, [Mpa].

Bảng 2 - Tính chất vật liệu 8YSZ và NiCrAlY [7, 8]

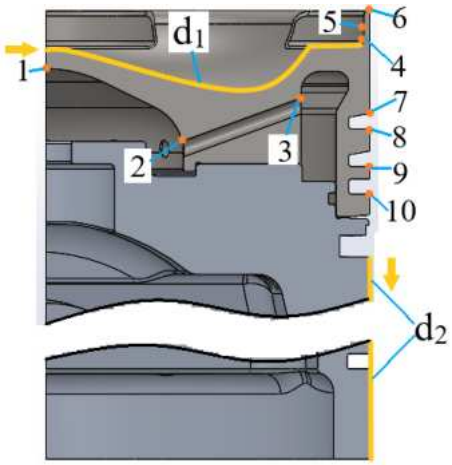
Vật liệu	**λ, [w/m.K]**	$\boldsymbol{\alpha, 10^{-6}}$ **[1/K]**	**C_p, [J/kg. K]**	**E, [GPa]**	**Hệ số Poisson**
8YSZ	0,7	10,7	460	40	0,22
NiCrAlY	23	17,5	602	156	0,36

Bảng 3 - Độ dày lớp phủ cách nhiệt và lớp liên kết theo các trường hợp khảo sát

	TH1	**TH2**	**TH3**	**TH4**	**TH5**
	[mm]				
Lớp phủ cách nhiệt	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
Lớp liên kết	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

2.3. Xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt piston

Điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt piston, xilanh được xác định theo mô hình được đề cập đến trong [14, 15]. Mô hình sử dụng kết hợp giữa Phần mềm tính toán chu trình nhiệt, Modul tính toán điều kiện biên "BCOPC" và Phần mềm mô phỏng FEM để mô hình hóa quá trình truyền nhiệt không gián đoạn giữa các thành phần trong nhóm pít tông - xi lanh. Trong đó, Phần mềm tính toán chu trình nhiệt để tính toán thông số chu trình công tác và điều kiện biên tức thời (điều kiện biên nhiệt theo từng góc quay trục khuỷu) trên bề mặt đỉnh piston, Modul "BCOPC" dùng để tính toán điều kiện biên tức thời trên các bề mặt bên của piston và các vùng bề mặt trong xilanh, sau đó dựa trên nguyên tắc bảo toàn năng lượng để tính toán điều kiện biên tương đương trên các bề mặt piston-xilanh.



Hình 3 - Các vị trí khảo sát nhiệt độ

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả trạng thái nhiệt độ của piston

Các vị trí và các đường khảo sát nhiệt độ trên piston được thể hiện trên hình 3.

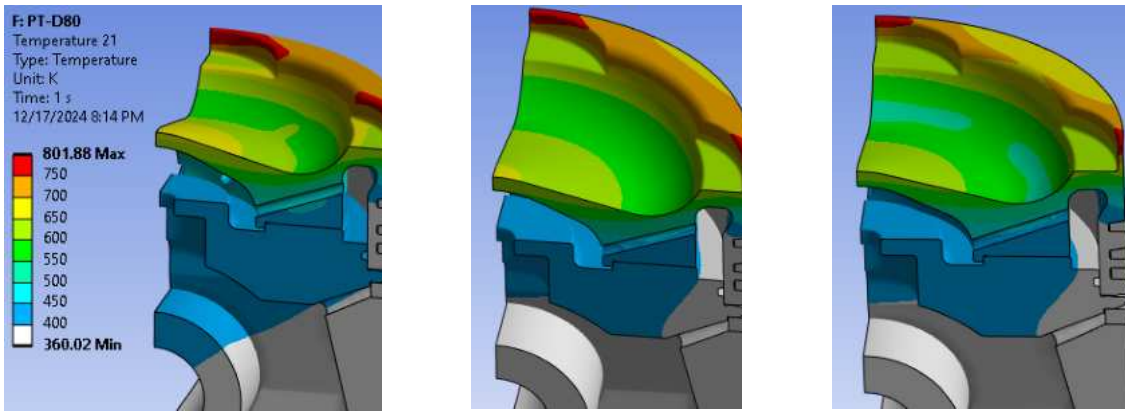
Trong các hình và bảng tiếp theo: **NB** - piston nguyên bản, **TH1** … **TH5** tương ứng với các trường hợp khảo sát, từ trường hợp 1 tới trường hợp 5 theo bảng 3.

Trạng thái nhiệt độ của piston nguyên bản và piston được phủ lớp cách nhiệt 8YSZ với độ dày 0,35mm, lớp liên kết NiCrAlY có độ dày 0,15 mm được thể hiện trên hình 4.

Biến thiên nhiệt độ trên bề mặt đỉnh piston (theo đường d_1 trên hình 3), và trên bề mặt thân piston (theo đường d_2 trên hình 3) được thể hiện trong hình 5 và hình 6.

Nhiệt độ trung bình trên bề mặt trên của lớp phủ cách nhiệt (T_d), bề mặt đỉnh piston (T_p) và thông lượng nhiệt trên bề mặt đỉnh piston (Q_p) được thể hiện trong bảng 4.

Giá trị nhiệt độ tại các điểm khảo sát trên piston được thể hiện trong bảng 5.



a b c

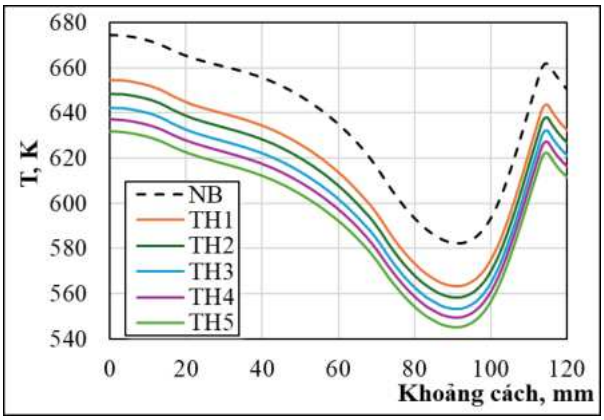
Hình 4 - Trạng thái nhiệt độ của piston nguyên bản (a), theo TH1 (b) và TH5 (c)

Kết quả khảo sát trạng thái nhiệt độ của piston nguyên bản và piston với các lớp phủ 8YSZ có độ dày khác nhau cho thấy, lớp phủ cách nhiệt với hệ số dẫn nhiệt nhỏ hơn rất nhiều so với vật liệu piston và có hiệu quả đáng kể trong việc ngăn chặn sự truyền nhiệt đến bề mặt đỉnh piston. Trên hình 4 thể hiện trạng thái nhiệt độ trên piston nguyên bản, của piston với lớp phủ cách nhiệt 8YSZ có độ dày 0,15mm (TH1) và piston với lớp phủ cách nhiệt 8YSZ có độ dày 0,35mm (TH5) với cùng 1 thang đo, thấy rõ nhiệt độ piston giảm đáng kể khi sử dụng lớp phủ cách nhiệt, đặc biệt là khu vực đỉnh piston.

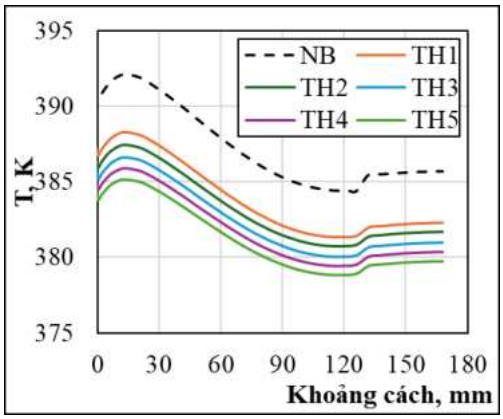
Bảng 4 - Nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh piston (T_p), bề mặt trên của lớp phủ cách nhiệt (T_d) và nhiệt lượng truyền tới bề mặt đỉnh piston (Q_p) theo các trường hợp khảo sát.

	NB	**TH1**	**TH2**	**TH3**	**TH4**	**TH5**
T_p, [K]	656	642	639	636	631	626
T_d, [K]		690	700	709	717	725
Q_p, [kW]	62	57,47	56,1	54,93	53,87	52,8

Kết quả thể hiện trong bảng 4 và hình 5 cho thấy, với lớp phủ cách nhiệt dày 0,15mm và độ dày lớp liên kết là 0,15 mm, nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh piston (T_p = 642K) giảm tới **14K** so với piston nguyên bản (T_p = 656K), trong khi nhiệt độ bề mặt trên của lớp phủ cách nhiệt (T_d = 690K) cao hơn nhiệt độ bề mặt đỉnh piston nguyên bản là **34K** (T_p = 656K). Khi tăng chiều dày lớp phủ cách nhiệt (giữ nguyên chiều dày lớp liên kết) nhiệt độ bề mặt đỉnh piston giảm xuống còn nhiệt độ bề mặt trên của lớp phủ cách nhiệt tăng lên. Chiều dày lớp phủ cách nhiệt tăng từ 0,15 mm lên 0,35 mm, nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh piston (T_p) giảm từ 642K xuống 626K, nhiệt độ trung bình bề mặt trên của lớp phủ cách nhiệt (T_d) tăng từ 690K lên 725K.



Hình 5 - Nhiệt độ bề mặt đỉnh piston theo đường d_1 (hình 3)



Hình 6 - Nhiệt độ bề mặt thân piston theo đường d_2 (hình 3)

Kết qủa khảo sát nhiệt độ tại các điểm trên piston được thể hiện trong bảng 5 và hình 6 cho thấy, khi tăng độ dày lớp phủ cách nhiệt, nhiệt độ tại các điểm khảo sát trên phần đỉnh (điểm 4, 5, 6 trong hình 3), phần đầu piston (điểm 1, 2, 3 trong hình 3), nhiệt độ phần thân piston (đường d_2 hình 3) giảm rõ rệt. Khi tăng chiều dày lớp phủ cách nhiệt từ 0,15mm (TH1) lên 0,35mm (TH5), nhiệt độ tại điểm 1 giảm 19K so với TH1 và giảm tới 34K so với piston nguyên bản. Các giá trị này tại điểm 4 là 18K và 47K, tại điểm 5 là 20K và 46K, tại điểm 3 là 10K và 22K. Trong TH5, nhiệt độ tại phần thân piston (theo đường d_2), trung bình thấp hơn tới 8K so

với piston nguyên bản và thấp hơn 3K so với TH1 (hình 6). Tuy nhiên, nhiệt độ tại các rãnh xéc măng (các điểm 7, 8, 9, 10 trong hình 3) gần như không thay đổi.

Bảng 5 - Nhiệt độ tại các điểm khảo sát trên piston theo hình 3

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}
	[K]									
NB	612	475	499	703	780	800	420	378	367	370
TH1	597	465	487	674	754	797	412	375	366	369
TH2	591	463	485	671	750	793	412	374	365	371
TH3	587	461	482	666	745	787	411	374	365	371
TH4	582	459	479	661	740	782	410	373	365	370
TH5	578	456	477	656	734	777	409	373	365	370

Trong bảng 5 - các nhiệt độ T_1... T_{10} tương ứng với nhiệt độ tại các điểm từ 1 tới 10 trong hình 3

Khi xem xét nhiệt lượng truyền tới bề mặt đỉnh piston, nhận thấy rằng, khi tăng chiều dày lớp phủ cách nhiệt, tổng nhiệt lượng hấp thụ bởi piston giảm xuống rõ rệt. Khi tăng chiều dày lớp phủ cách nhiệt từ 0,15mm lên 0,35mm, nhiệt lượng hấp thụ bởi bề mặt đỉnh piston giảm 4,67 kW và giảm tới 9,2 kW khi so sánh với piston nguyên bản.

Như vậy, lớp phủ cách nhiệt có hiệu quả cao trong cách nhiệt trên bề mặt đỉnh piston làm giảm nhiệt độ piston, đồng thời giảm nhiệt lượng truyền đến bề mặt đỉnh piston.

3.2. Kết quả thông số động cơ

Kết quả tính toán thông số chu trình công tác của động cơ được thể hiện trong bảng 6

Bảng 6 - thông số chu trình công tác động cơ D80 theo các trường hợp

	P_Z, [MPa]	T_Z, [K]	N_e, [kW]	η_e	g_e, [g/kWh]	η_v	T_C, K	Q_X, [kW]
NB	10,015	1708	502	38,52	208,1	0,9292	380	4,4
TH1	10,014	1715	500	38,57	207,8	0,9235	380,5	4,3
TH2	10,014	1717	499	38,58	207,7	0,9219	380,7	4,3
TH3	10,0138	1719	498	38,59	207,6	0,9204	380,8	4,27
TH4	10,0136	1720	497	38,6	207,5	0,9191	380,9	4,23
TH5	10,0134	1722	496	38,61	207,4	0,9178	381,1	4,2

Kết quả tính toán thông số chu trình công tác trong bảng 6 và kết quả tính toán thông lượng nhiệt truyền đến bề mặt đỉnh piston (bảng 4) cho thấy, khi tăng độ dày lớp phủ cách nhiệt lên 0,35mm, thông lượng nhiệt truyền tới bề mặt đỉnh piston giảm từ **62kW** ở piston nguyên bản xuống **52,8kW** ở trường hợp 5 (giảm **9,2 kW**). Điều này làm giảm lượng nhiệt thất thoát qua bề mặt đỉnh piston và làm tăng nhiệt độ khí cháy, nhiệt độ tối đa của khí cháy tăng từ 1708K lên 1722K. Tuy nhiên, piston D80 được làm mát bằng dầu bôi trơn, mặt khác, thành piston từ đỉnh tới các rãnh xéc măng khá mỏng, nên lượng nhiệt truyền từ đỉnh tới xéc măng rất nhỏ

(bảng 6), lượng nhiệt truyền từ khí cháy tới đỉnh piston chủ yếu được hấp thụ bởi dầu làm mát. Vì vậy, sự thay đổi lượng nhiệt truyền từ xéc măng sang xy lanh giảm không đáng kể và không có ảnh hưởng lớn tới nhiệt độ xilanh. Ngoài ra, nhiệt độ khí cháy tăng lên, làm tăng lượng nhiệt truyền đến bề mặt xilanh và nắp máy, vậy nên tổng lượng nhiệt thất thoát qua bề mặt buồng đốt giảm không đáng kể (từ 203,5 kW ở piston nguyên bản xuống 196,2 kW ở TH5). Hiệu suất có ích của động cơ tăng từ 38,52% lên 38,61%, suất tiêu hao nhiên liệu giảm từ 208,1 g/kWh xuống 207,4 g/kWh.

Tuy nhiên, nhiệt độ bề mặt trên của lớp phủ cách nhiệt tăng mạnh (bảng 4) làm tăng lượng nhiệt truyền đến khí nạp, hệ số nạp giảm từ 0,9292 xuống 0,9178 làm giảm lượng không khí nạp vào xilanh. Trong quá trình khảo sát, tỉ số không khí/nhiên liệu không thay đổi, nên công suất có ích giảm từ 502kW ở piston nguyên bản xuống 496 kW trong trường hợp 5 (TH5).

4. Kết luận

Bài báo khảo sát ảnh hưởng của lớp phủ cách nhiệt tới trạng thái nhiệt độ của piston và thông số chu trình công tác của động cơ, trong khi giữ nguyên tỉ số không khí/nhiên liệu trên piston động cơ D80, phần đầu piston làm từ thép chịu nhiệt, được làm mát bằng dầu tuần hoàn.

Kết quả khảo sát cho thấy lớp phủ cách nhiệt có hiệu quả cao trong cách nhiệt trên bề mặt đỉnh piston. Với lớp phủ cách nhiệt có độ dày 0,35mm và lớp liên kết dày 0,15mm, nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh piston giảm tới **30K** so với piston nguyên bản (từ 656K xuống 626K), tại các vị trí khác trên piston, nhiệt độ trung bình cũng giảm rõ rệt. Trong khi đó, nhiệt độ trung bình bề mặt trên của lớp phủ cách nhiệt là 725K so với 656K ở piston nguyên bản (nhiệt độ bề mặt tiếp xúc với khí cháy), làm giảm thông lượng nhiệt truyền đến bề mặt đỉnh piston, tuy nhiên nhiệt độ khí cháy tăng lên làm tăng nhiệt lượng truyền đến bề mặt xi lanh và nắp máy, nên hiệu suất nhiệt của động cơ thay đổi không đáng kể. Mặt khác, nhiệt độ bề mặt lớp phủ tăng mạnh, làm tăng nhiệt độ khí nạp và giảm hiệu suất nạp và giảm công suất động cơ.

Khảo sát nhiệt độ bề mặt ngoài phần thân piston cho thấy, khi sử dụng lớp phủ cách nhiệt trên đỉnh piston, nhiệt độ bề mặt ngoài phần thân piston giảm đáng kể, trong khi nhiệt độ bề mặt xilanh gần như không thay đổi, điều này có ảnh hưởng nhất định tới kích thước khe hở nhiệt giữa piston - xi lanh.

Nhiên cứu tiếp theo được xác định là khảo sát ảnh hưởng của lớp phủ cách nhiệt tới trạng thái ứng suất cơ - nhiệt, biến dạng của piston, xi lanh và kích thước khe hở nhiệt giữa piston - xi lanh.

Tài liệu tham khảo

1. Junker, H. and W. Issler. (2002). *Pistons for high loaded direct injection diesel engines.* MAHLE technical information.
2. Н. Д. Чайнов, et al. (2008). *Конструирование двигателей внутреннего сгорания: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Двигатели внутреннего сгорания"*, М.: Машиностроение.
3. G., G.N., *Handbook on iron casting*. (1978). M.: Mechanical engineering. Leningr. department.
4. Nasif, G., A.M. Shinneeb, and R. Balachandar. (2024). *Cooling enhancement for engine parts using jet impingement.* Frontiers in Mechanical Engineering, **10**: p. 13.
5. Rohini, A. and S. Prema (2020). *A review on thermal barrier coating for diesel engine and its characteristics studies.* Journal of Physics: Conference Series, **1473**(1).

6. Venu, H. and P. Appavu. (2019). *Analysis on a thermal barrier coated (TBC) piston in a single cylinder diesel engine powered by Jatropha biodiesel–diesel blends.* SN Applied Sciences, **1**(12).
7. Shu, Z., et al. (2022). *Thermal Analysis of Mullite Coated Piston Used in a Diesel Engine.* Coatings, **12**(9).
8. Iqbal, A. and G. Moskal. (2023). *Recent Development in Advance Ceramic Materials and Understanding the Mechanisms of Thermal Barrier Coatings Degradation.* Archives of Computational Methods in Engineering, **30**(8): p. 4855 - 4896.
9. Fei, C.- G., et al. (2021). *Numerical and Experimental Research on Thermal Insulation Performance of Marine Diesel Engine Piston Based on YSZ Thermal Barrier Coating.* Coatings, **11**(7).
10. Bukhmirov V.V., R.D.V., Sonyshkova Yu.S. (2009). *Reference materials for solving problems in the course "Heat and mass transfer"*, Иваново: GOU VPO "Ivanovo State Energy University named after. V.I. Lenin.".
11. Thakare, J.G., et al. (2021). *Thermal barrier coatings - A state of the art review.* **27**: p. 1947-1968.
12. Peng, X. (2011). *Metallic coatings for high-temperature oxidation resistance*. J. Thermal barrier coatings. 53-74.
13. Jung, S.H., et al. (2018). *Growth Behavior of Thermally Grown Oxide Layer with Bond Coat Species in Thermal Barrier Coatings.* Journal of the Korean Ceramic Society, **55**(4): p. 344-351.
14. Duong V. Nguyen and P.X. Pham. (2023). *Determining thermal equivalent boundary conditions for piston surfaces.* Transport and Communications Science Journal, (Special issue): p. 452-464.
15. Dương, N.V., P.X. Phương, and L.T. Dương. (2025). *Xây dựng mô hình xác định điều kiện biên nhiệt trên pít tông - xi lanh động cơ diesel 4 kỳ phun nhiên liệu trực tiếp.* J Journal of Science Technique, **20**(01).

Effect of the Thermal Insulating Coating on the Piston Crown on the thermal state of diesel engine piston

Abstract: *The durability of piston materials depends greatly on temperature, especially at high temperatures, the durability of the material is seriously reduced. Therefore, reducing the temperature is an effective measure to increase the durability of the piston. To reduce the piston temperature, two methods are often used, either increasing the heat dissipation capacity from the piston to the surrounding environment, or reducing the heat absorbed by the piston. In which, reducing the heat absorbed by the piston by means of an insulating coating is considered a highly effective method. This article examines the influence of the insulating coating on the temperature state of the piston and the operating cycle parameters of the D80 engine. The results show that the insulating coating significantly reduces the piston temperature and the heat flux transmitted to the piston top surface. However, the operating cycle parameters of the engine do not change significantly.*

Keywords: Piston, insulation coating, bond coat, temperature state, D-80.

❑

Nghiên cứu ảnh hưởng của khe hở đỉnh cánh tới hiệu suất tầng cánh công tác máy nén động cơ tuabin khí TV3-117 bằng Ansys CFX

Lê Tiến Dương [1], Trần Duy Khánh[2]

[1] Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2] Hệ sau Quản lý Học viên SĐH, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[*] Email: letienduongdc23@lqdtu.edu.vn, Điện thoại: 0978870069

Tóm tắt

Động cơ tuabin khí được sử dụng phổ biến do có nhiều ưu điểm như nhỏ gọn, tạo ra công suất lớn và dễ dàng lắp đặt trên các phương tiện. Trong động cơ tuabin khí, máy nén đóng vai trò cung cấp đủ lượng không khí cho động cơ, sự làm việc của máy nén quyết định tính ổn định và công suất của động cơ. Tuy nhiên do cấu tạo của máy nén động cơ tuabin khí, nên luôn tồn tại khe hở giữa rotor và stator, dòng khí chảy qua khe hở này gây ảnh hưởng tới cấu trúc dòng chảy trong máy nén, từ đó ảnh hưởng tới hiệu suất máy nén. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của khe hở hướng kính tới hiệu suất máy nén động cơ tuabin khí bằng Ansys CFX. Kết quả nghiên cứu xác định được lưu lượng khí chảy qua khe hở hướng kính và sự suy giảm hiệu suất của máy nén. Bài báo là cơ sở để tiếp tục nghiên cứu các phương pháp giảm ảnh hưởng của khe hở hướng kính tới cấu trúc dòng khí qua khe hở máy nén, giảm thiểu tổn thất dòng và tăng hiệu suất máy nén.

Từ khóa: *máy nén; cánh công tác; hiệu suất; vận tốc; áp suất; TV3-117; CFX*

1. Mở đầu

Động cơ tuabin khí (ĐCTBK) là một trong những cỗ máy hiện đại và mang nhiều hàm lượng công nghệ nhất mà con người từng chế tạo cho tới hiện nay. Nó mang trong mình các chi tiết có cấu tạo phức tạp, có công nghệ gia công hiện đại và được chế tạo bằng các vật liệu tốt nhất. Tuy nhiên ĐCTBK vẫn là một loại động cơ nhiệt, chúng được cấu thành từ các thành phần tĩnh tại (stator) và phần quay (rotor), 2 thành phần này luôn có sự chuyển động tương đối với nhau, do đó giữa chúng luôn tồn tại một khe hở hướng kính nhất định **Error! Reference source not found.**. Đây là khe hở kết cấu, nó được thiết kế để đảm bảo rotor và stator không cọ sát vào nhau trong quá trình chuyển động quay tự do của rotor. Giá trị của khe hở này được lựa chọn dựa trên việc tính toán tới sự biến dạng của chi tiết do lực khí động, các tải nhiệt động và lực quán tính chuyển động quay của các chi tiết bánh công tác **Error! Reference source not found.**4, 5].

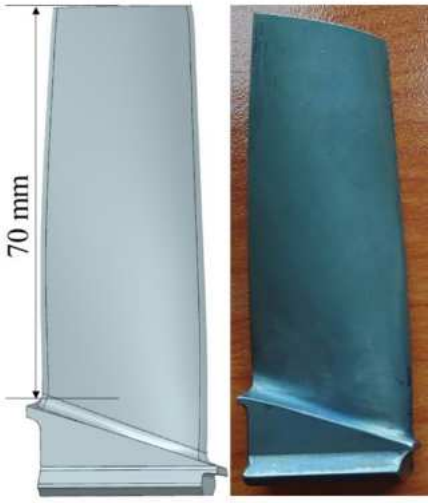
Do đặc thù hoạt động của máy nén ĐCTBK, giữa mặt bụng và mặt lưng của cùng một cánh máy nén luôn tồn tại sự chênh áp, do đó dòng khí từ bụng cánh luôn có xu hướng chảy sang lưng cánh qua khe hở **Error! Reference source not found.**. Dòng chảy này khi chảy sang lưng cánh thì sẽ tương tác với dòng khí chính chảy giữa 2 cánh, kết quả là chúng tạo nên dòng xoáy có chiều xoáy theo chiều ngược chiều quay của máy nén nếu nhìn từ phía trước động cơ [5-7]. Cùng với đó, cũng do sự chênh lệch áp suất giữa bụng cánh và lưng cánh kế tiếp, một phần dòng khí có xu hướng di chuyển từ bụng cánh tới đỉnh cánh rồi đi ở khu vực gần vỏ máy nén sang lưng cánh bên cạnh, tạo nên cặp dòng xoáy được gọi là dòng thứ cấp [8, 9]. Dòng xoáy qua khe hở này nằm gần đỉnh cánh, chúng có chiều xoáy ngược với chiều của dòng xoáy thứ cấp ở đỉnh cánh, khi tương tác với nhau chúng làm tăng cường sự rối loạn của dòng khí phía sau cánh máy nén **Error! Reference source not found.**10, 11].

Việc nghiên cứu ảnh hưởng của dòng chảy qua khe hở hướng kính là rất quan trọng, giúp cho chúng ta hiểu được diễn biến và xu hướng của dòng chảy này. Qua đó hiểu được sự tương tác giữa dòng chảy qua khe hở với dòng chảy thứ cấp và dòng chảy chính trong kênh lưu thông giữa 2 cánh công tác liền kề của máy nén. Ngoài ra nghiên cứu còn áp dụng cho đối tượng là tầng cánh công tác đầu tiên của máy nén ĐCTBK TV3-117 **Error! Reference source not found.**12, 13], đây là động cơ phổ biến được dùng trên các máy bay trực thăng, tuy nhiên các nghiên cứu cụ thể về máy nén của động cơ này hiện nay vẫn còn hạn chế, đặc biệt là tại Việt Nam.

2. Xây dựng mô hình mô phỏng số

2.1. Xây dựng mô hình hình học cánh công tác máy

Máy nén ĐCTBK TV3-117 bao gồm 12 tầng, trong đó tầng máy nén đầu tiên có 37 cánh công tác. Để thuận tiện trong tính toán mô phỏng dòng khí chảy qua tầng cánh công tác máy nén, giả thiết đặt ra là dòng không khí chảy qua tầng máy nén đồng đều theo chu vi của tiết diện mặt cắt máy nén. Do đó thay vì mô phỏng dòng khí chảy qua đầy đủ cả tầng cánh công tác với 37 cánh máy nén thì trong nghiên cứu này các tác giả chỉ mô phỏng dòng khí chảy bao quanh 01 cánh máy nén, phần không khí bao gồm phần lưu thông phía mặt bụng và mặt lưng bao quanh cánh. Việc này phù hợp với thông lệ và mục tiêu nghiên cứu dòng khí chảy tràn qua đỉnh cánh, qua khe hở giữa đỉnh cánh và vỏ máy nén.



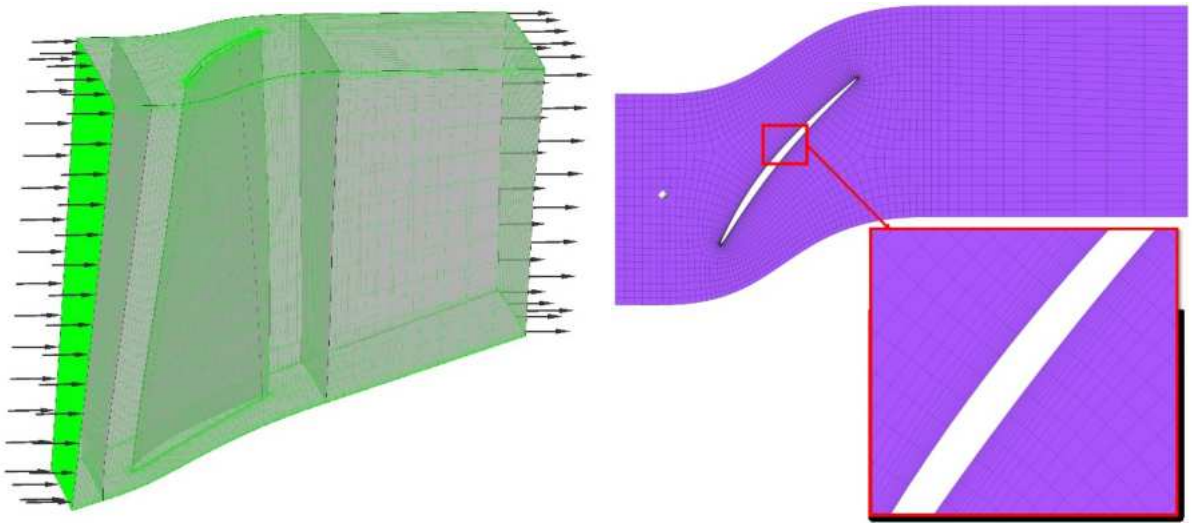
Hình 1. Cánh máy nén tầng đầu tiên ĐCTBK TV3-117

Cánh công tác máy nén ĐCTBK TV3-117 được quét từ cánh trên động cơ và được xây dựng và chỉnh sửa lại trên phần mềm NX. Hình ảnh của cánh máy nén sau khi được xây dựng (bên trái) và ảnh chụp cánh được thể hiện trên hình 1

2.2. Xây dựng mô mình mô phỏng

Các điều kiện biên được thiết lập tương ứng với các vị trí thể hiện ở 0a). Thiết lập điều kiện biên mô phỏng ở chế độ tính toán, không khí được lựa chọn cho tính toán là không khí ở điều kiện tiêu chuẩn 20°C, với áp suất toàn phần 101125 Pa, nhiệt độ toàn phần tại đầu vào 297,3 K, vận tốc quay của máy nén tương ứng với 18800 vòng/phút, có thiết lập mặt biên chuyển tiếp để đảm bảo mô phỏng 01 cánh thay cho toàn bộ phần lưu thông của bánh công tác, lưu lượng không

khí G_K = 9.7 kg/s tại đầu ra của tầng máy nén [12, 13]. Mô hình rối SST k-ε (shear stress transports) [14]. Điều kiện giải được đặt với bước thời gian tự động; điều kiện hội tụ 1.E-5 hoặc trung bình bình phương RMS = 1% (root mean square) hoặc sai số lưu lượng không khí 1%, tùy thuộc vào điều kiện nào tới trước [14].



a) b)

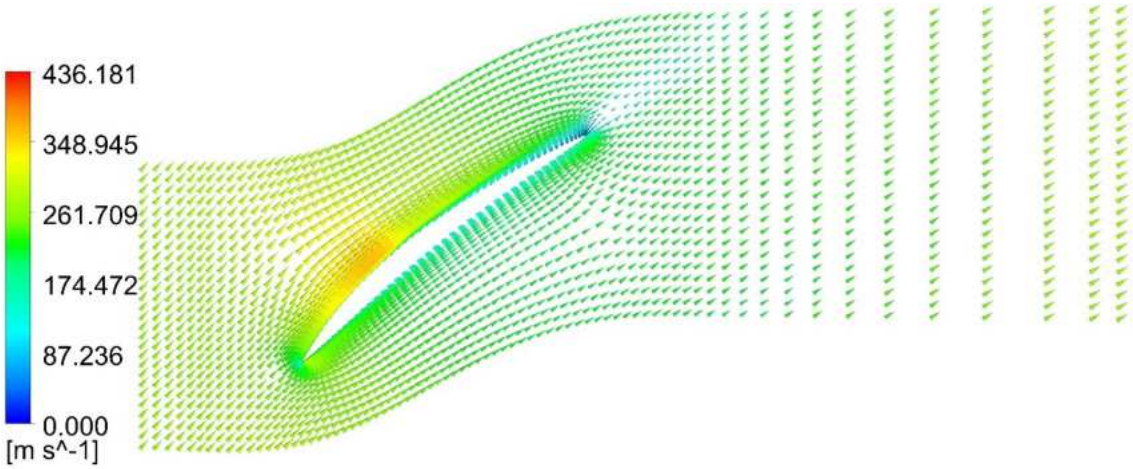
Hình 2. Điều kiện biên mô phỏng dòng khí chảy qua cánh công tác máy nén (a) và mô hình lưới của cánh (b)

Để đảm bảo kết quả mô phỏng, lưới được chia trong mô đun Turbogrid [14], lưới kết cấu với lớp biên được tạo lớp và chia nhỏ như ở trên 0b).

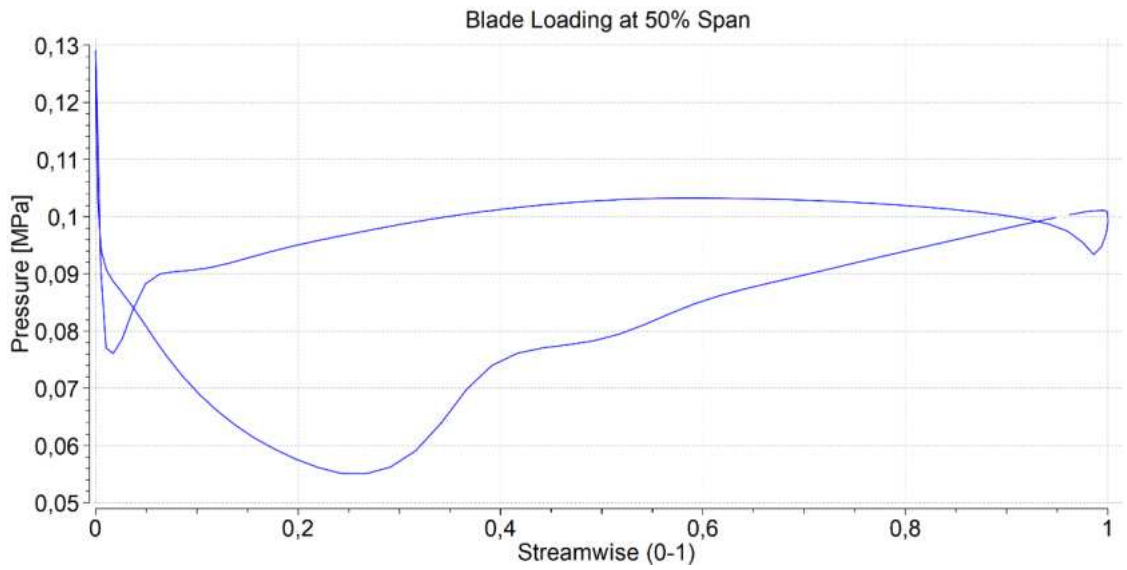
Để khảo sát ảnh hưởng của khe hở hướng kính tới các thông số và cấu trúc dòng khí chảy bao quanh cánh máy nén ĐCTBK, lựa chọn khảo sát khe hở từ 0 tới 3.5 mm, tức là trong khoảng từ 0 tới 5% độ dài ở đầu vào cánh công tác máy nén. Bước đầu tiên là tính toán mô phỏng dòng chảy qua tầng cánh công tác đầu tiên của máy nén khi không có khe hở (với khe hở hướng kính bằng 0 mm), sau đó tiến hành thay đổi các khe hở này trong khoảng khảo sát.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân bố vận tốc dòng chảy bao quanh cánh máy nén khi không có khe hở



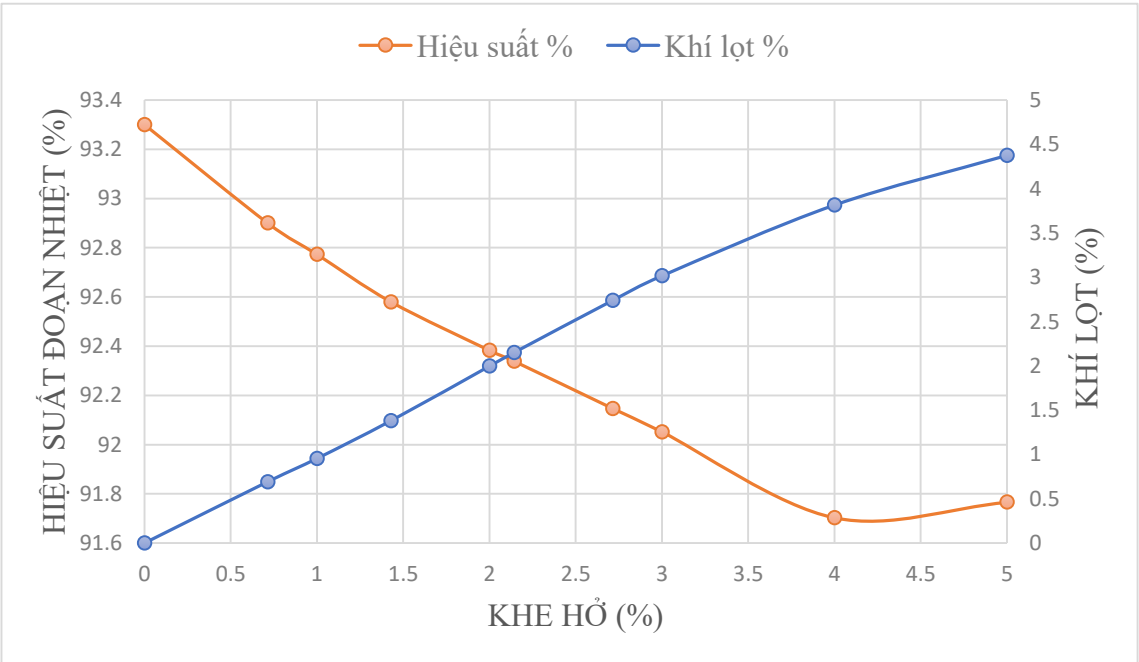
Hình 3. Véc tơ và vận tốc dòng chảy bao quanh cánh máy nén ở giữa cánh



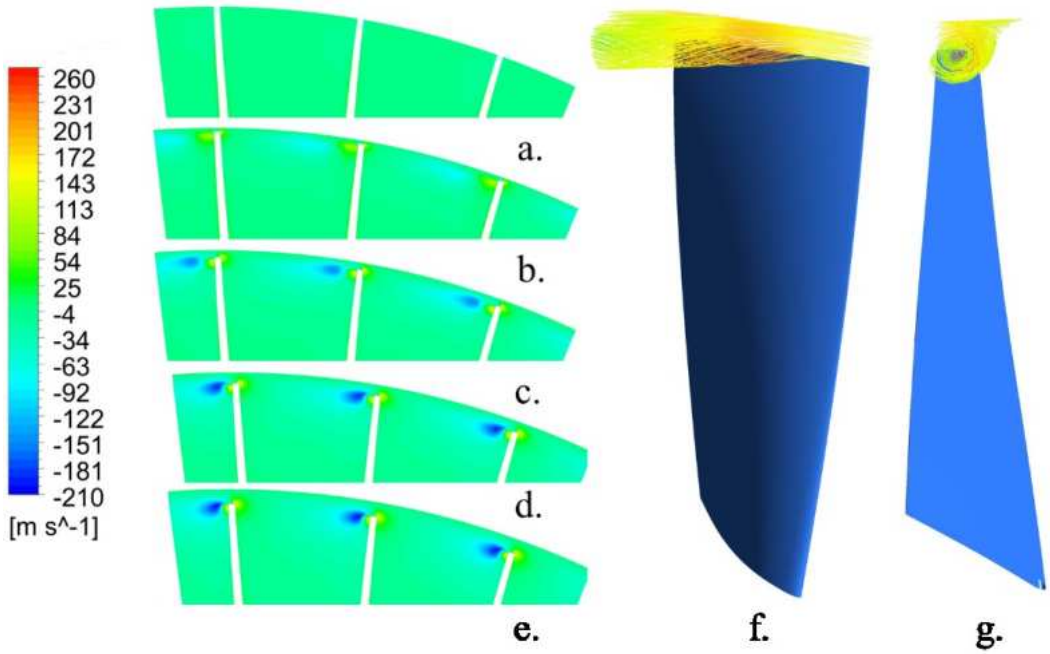
Hình 4. Phân bố áp suất dòng chảy bao quanh cánh máy nén ở giữa cánh

Trên hình 3 thể hiện dòng chảy của không khí trong máy nén chảy bao quanh biên dạng cánh ở vị trí giữa cánh. Ta thấy dòng chảy bao quanh cánh đều, không bị vỡ dòng, véc tơ vận tốc thể hiện dòng chảy ở phần bụng cánh có phần bị chậm lại, ở đây mật độ dòng không khí tăng, dẫn tới áp suất của khí tại bụng cánh lớn. Trong khi đó dòng không khí tăng tốc ở phần lưng cánh, mật độ không khí giảm làm áp suất khí tại lưng cánh thấp hơn bụng cánh, như thể hiện ở hình 4. Điều này thể hiện việc đặt điều kiện biên và điều kiện tính toán ban đầu hợp lý, đây là cơ sở để tiến hành tính toán, đánh giá ảnh hưởng của khe hở hướng kính tới dòng chảy trong tầng cánh công tác đầu tiên máy nén ĐCTBK TV3-117.

3.2. Ảnh hưởng của khe hở hướng kính tới các thông số của dòng chảy qua tầng cánh công tác máy nén



Hình 5. Ảnh hưởng của khe hở tới hiệu suất đoạn nhiệt và lượng khí lọt qua tầng cánh



Hình 6. Dòng khí rò lọt qua đỉnh cánh với các khe hở khác nhau
a, b, c, d, e: tương ứng với khe hở 0%, 1%, 2%, 3%, 4%
f, g dòng khí xoáy nhìn từ hướng lưng cánh và từ phía sau

Trên hình 5 thể hiện kết quả tính toán mô phỏng ảnh hưởng của khe hở hướng kính tới hiệu suất đoạn nhiệt của tầng cánh công tác đầu tiên máy nén và lượng khí rò lọt qua khe hở này tương ứng với các khe hở khác nhau. Ta thấy lượng khí rò lọt qua khe hở hướng kính tỷ lệ thuận với khe hở, tương ứng với khe hở 1% thì lượng khí lọt qua khe hở là 0,95%, tướng ứng với khe hở 5% thì lượng khí lọt là 4.37%. Như vậy lượng khí lọt gần như tuyến tính với khe hở hướng kính, lượng khí này không tham gia vào quá trình nén, do đó làm giảm hiệu suất của tầng cánh công tác máy nén. Cùng với đó ta thấy khi lượng khí rò lọt tăng thì hiệu suất đoạn nhiệt của tầng cánh công tác máy nén cũng giảm tương ứng, tuyến tính trong đoạn khe hở từ 0% tới 4%, tuy nhiên ta thấy khi khe hở ở mức từ 4% tới 5% thì hiệu suất có phần tăng đôi chút từ 91,7% lên 91,76%, nghĩa là ở mức chênh lệch 0,06%. Điều này có thể giải thích là do sai số tính toán, và ở đây có thể coi là ở khoảng khe hở này thì hiệu suất đoạn nhiệt gần như không thay đổi. Ngoài ra có thể giải thích việc lượng khí rò lọt tăng mà hiệu suất không giảm là do dòng khí rò lọt khi tương tác với dòng khí thứ cấp trong kênh giữa hai cánh liền kề thì làm giảm sự tổn thất do dòng thứ cấp này, nên tạo nên sự bù trừ nhỏ trong hiệu suất của cả tầng cánh công tác.

Trên hình 6 thể hiện dòng chảy tràn qua đỉnh cánh công tác máy nén, hay dòng không khí rò lọt qua khe hở hướng kính của tầng cánh. Nhận thấy rằng khi khe hở tăng thì lượng khí chảy qua đỉnh cánh tăng với cường độ lớn hơn, vận tốc khí qua khu vực này cũng tăng, dòng xoáy này cũng lớn dần và ảnh hưởng tới dòng khí chảy gần đỉnh cánh ở phía lưng cánh. Chiều xoáy của dòng khí này ngược chiều quay của động cơ, nó tương tác với dòng thứ cấp trong kênh lưu thông máy nén và ảnh hưởng tới trường vận tốc sau tầng cánh máy nén như thể hiện trên hình 6.

4. Kết luận

Khe hở hướng kính có ảnh hưởng tới lượng không khí rò lọt qua khe hở này và lượng khí lọt qua khe hở tuyến tính với khe hở, ở mức 1% khe hở thì ≈ 0,95% khí bị rò lọt. Ngoài ra hiệu suất đoạn nhiệt của tầng cánh công tác cũng giảm tương ứng khi khe hở hướng kính tăng, tuy nhiên có những khoảng giá trị khe hở mà hiệu suất đoạn nhiệt gần như không thay đổi do có sự tương tác của dòng khí qua khe hở và dòng thứ cấp trong kênh lưu thông.

Dòng không khí chảy qua khe hở có hướng xoáy ngược với hướng quay của động cơ, có sự tương tác với dòng thứ cấp, từ đó tạo nên trường vận tốc đặc trưng của dòng khí sau tầng máy nén với các khu vực xoáy và khu vực hỗn hợp. Khu vực dòng khí xoáy và hỗn hợp này ảnh hưởng lớn tới độ rối của dòng khí đầu vào của tầng cánh dẫn hướng ngay sau đó, từ đó ảnh hưởng tới độ đồng nhất của dòng khí đầu vào cánh dẫn hướng và ảnh hưởng tới hiệu suất của tầng cánh dẫn hướng nói riêng và tầng máy nén nói chung.

Tuy nhiên bài báo còn chưa nghiên cứu đầy đủ cả tầng máy nén, đây cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả.

Ngoài ra đây là cơ sở để tiếp tục nghiên cứu các phương pháp giảm ảnh hưởng của khe hở hướng kính tới cấu trúc dòng khí sau máy nén bị ảnh hưởng của khí lọt qua khe hở máy nén, giảm thiểu tổn thất dòng và tăng hiệu suất máy nén.

Tài liệu tham khảo

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. (2008). *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник для ВУЗов*. В 5 т. Т.2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. – М.: Машиностроение. – 365 с
2. Крюков А.И. (1993). *Некоторые вопросы проектирования ГТД*. – М.: МАИ. 336 с.
3. Mattingly J.D. (2006). *Elements of Propulsion Gas Turbines And Rockets*. AIAA. 867 p.
4. Meherwan P. Boyce. (2012). *Gas turbine engineering handbook*. Gulf Publishing Company. USA.
5. Storer, J. A., and Cumpsty, N. A. (1991). *Tip Leakage Flow in Axial Compressors*. ASME J. Turbomach. 113. pp. 252–259. https://doi.org/10.1115/1.2929095
6. Inoue, M., Furukawa, M., Saiki, K., & Yamada, K. (1998). *Physical Explanations of Tip Leakage Flow Field in an Axial Compressor Rotor*. Volume 1: Turbomachinery. https://doi:10.1115/98-gt-091.
7. Wu, Y., & Chu, W. (2007). *Behaviour of tip-leakage flow in an axial flow compressor rotor*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 221(1), 99–110. https://doi:10.1243/09576509jpe329.
8. Lakshminarayana, B. (1970). *Methods of Predicting the Tip Clearance Effects in Axial Flow Turbomachinery*. Journal of Basic Engineering, 92(3), 467. doi:10.1115/1.3425036
9. Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Gottschall, M., Mailach, R., & Vogeler, K. (2011). *Investigation of the Tip Clearance Flow in a Compressor Cascade Using a Novel Laser Measurement Technique With High Temporal Resolution*. Volume 7: Turbomachinery, Parts A, B, and C. https://doi:10.1115/gt2011-45176.
10. Zheng, X., & Yang, H. (2016). *Influence of Tip Clearance on the Performance and Matching of Multistage Axial Compressors*. Volume 2A: Turbomachinery. https://doi:10.1115/gt2016-56232.

11. Wisler, D. C. (1985). *Loss Reduction in Axial-Flow Compressors Through Low-Speed Model Testing*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 107(2), 354. https://doi:10.1115/1.3239730.
12. Богданов А. Д., Калинин Н. П., Кривко А. И. (2000). *Турбовальный двигатель ТВ3-117ВМ. Конструкция и техническая эксплуатация,* Москва, изд. Воздушный транспорт. 392 стр.
13. Klimov. (1986). *TV3-117 Aircraft Technical Manual*. Klimov Ins. RU.
14. Ansys. (2023). *Ansys CFX User's Guide*. Ansys Inc. USA.

Study on the influence of blade tip clearance on the performance of the first stage compressor blade of the TV3-117 gas turbine engine using Ansys CFX

Abstract: *Gas turbine engines are widely used due to their advantages, such as compact design, high power output, and ease of installation in vehicles. In these engines, the compressor plays a crucial role in supplying sufficient air for engine, directly impacting the engine's stability and performance. However, due to the structural characteristics of gas turbine compressors, there is always a tip clearance between the rotor and the stator. The airflow through this tip influences the flow dynamics within the compressor, ultimately affecting its efficiency. This article presents the results of a study on the impact of tip clearance on gas turbine compressor efficiency using ANSYS CFX. The research quantifies the airflow through the tip clearance and evaluates the resulting reduction in compressor efficiency. These findings provide a foundation for further studies on methods to minimize clearance effects, reduce flow losses, and enhance compressor performance.này.*

Keywords: compressor; blade; efficiency; speed; pressure; TV3-117; CFX.

❑

Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát đến trạng thái nhiệt của piston và xi lanh động cơ diesel tàu thủy

Phạm Văn Duy[1], Nguyễn Văn Dương[2]

[1]Hệ QLHV Sau đại học, [2]Viện Cơ khí Động lực

Email: phamduyhd8230@gmail.com, Tel: 096.230.4702

Tóm tắt

Hàng năm, một số lượng lớn piston và xi lanh động cơ diesel tàu thủy bị hư hỏng và phải thay thế. Các hư hỏng chủ yếu liên quan đến mài mòn, nhiệt độ và mỏi. Ở nhiệt độ cao, độ bền của vật liệu bị suy giảm nghiêm trọng, đồng thời sự giãn nở nhiệt và biến dạng không đều của piston và xi lanh có thể làm giảm kích thước khe hở nhiệt và đẩy nhanh quá trình mài mòn bề mặt. Bài báo trình bày kết quả xây dựng mô hình đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát đến trạng thái nhiệt của piston và xi lanh động cơ diesel tàu thủy. Mô hình tính toán sử dụng kết hợp môđun tính toán điều kiện biên BCOPC với phần mềm tính toán chu trình công tác GT - SUITE, phần mềm xác định trạng thái nhiệt ANSYS WORKBENCH để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát tới trạng thái nhiệt của piston và xi lanh. Kết quả nghiên cứu cho thấy nhiệt độ nước làm mát có ảnh hưởng đáng kể tới trạng thái nhiệt của các chi tiết trong nhóm piston - xi lanh, đồng thời kết quả tính toán cũng là dữ liệu đầu vào để khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát tới kích thước khe hở nhiệt piston - xi lanh.

Từ khóa: *Trạng thái nhiệt; nhiệt độ; piston; xi lanh; động cơ diesel.*

1. Đặt vấn đề

Piston và xi lanh là hai chi tiết đặc biệt quan trọng trong động cơ diesel tàu thủy, cùng với nắp xi lanh, các xéc măng và xupap tạo thành không gian thể tích công tác của động cơ. Trong quá trình làm việc, piston và xi lanh chịu tải cơ học lớn và tải nhiệt cao có tính chu kỳ [1]. Hư hỏng của chúng chủ yếu liên quan đến mài mòn, nhiệt độ và mỏi [2]. Tại chế độ công suất định mức của động cơ, piston và xi lanh chịu tải nhiệt cao, độ bền vật liệu bị suy giảm nghiêm trọng, đẩy nhanh quá trình mài mòn bề mặt dẫn đến hư hỏng [3]. Tăng sức bền cho piston và xi lanh là vấn đề được quan tâm nghiên cứu. Takiguchi và cộng sự đã chỉ ra rằng kích thước khe hở giữa piston - xi lanh có ảnh hưởng rất lớn đến ma sát và mài mòn bề mặt piston - xi lanh [4]. Mặt khác, sự giãn nở nhiệt của piston - xi lanh là một trong các thành phần chính làm thay đổi khe hở piston - xi lanh. Vì vậy, kiểm soát tốt nhiệt độ của piston và xi lanh có thể kiểm soát được kích thước khe hở piston - xi lanh. Một trong các yếu tố có ảnh hưởng lớn tới trạng thái nhiệt nhóm piston - xi lanh là hệ thống làm mát.

Hệ thống làm mát có vai trò đảm bảo nhiệt độ các chi tiết động cơ ở trong phạm vi cho phép. Nhiều công trình đã nghiên cứu về ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát đến tình trạng kỹ thuật của động cơ, thường tập trung phân tích ảnh hưởng tới thông số vận hành và phát thải: Jerzy Walentynowicz nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát cao đến thành phần khí thải, thông số vận hành động cơ [5]; Matthieu Gazon cùng các cộng sự đánh giá tác động của nhiệt độ nước làm mát đến đặc tính cháy, tiếng ồn cháy của động cơ diesel ở điều kiện không tải [6]; J. Adler và T. Bandhauer nghiên cứu tác động của vận hành động cơ diesel ở nhiệt độ nước làm mát cao nhằm cải thiện việc tận dụng nhiệt thải của nước làm mát [7]… Tuy nhiên, nhiệt độ nước làm mát cũng có ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái nhiệt, sự giãn nở nhiệt của piston - xi lanh. Khi thay đổi nhiệt độ nước làm mát, trạng thái nhiệt piston - xi lanh cũng thay

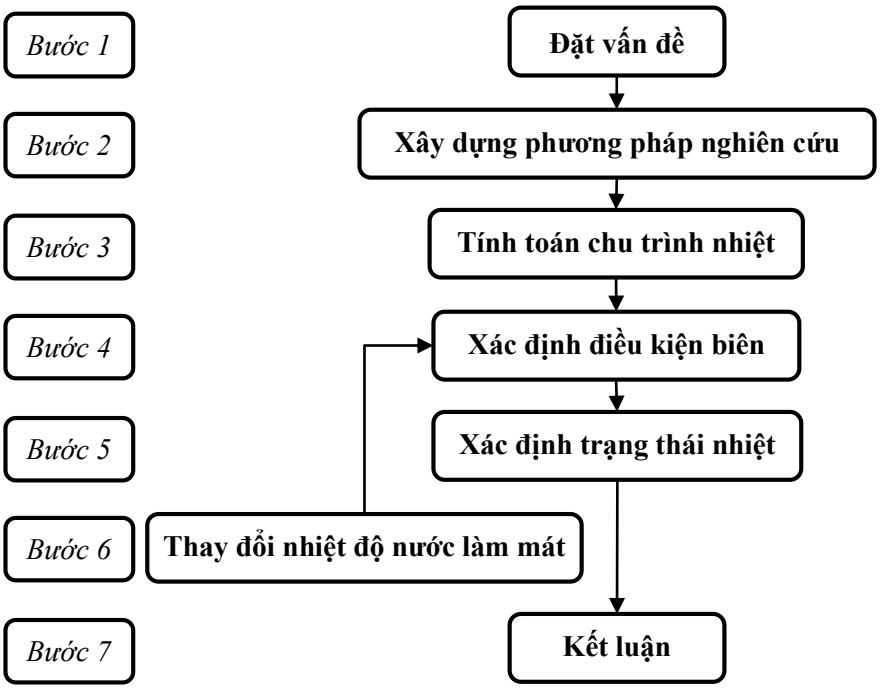
đổi làm thay đổi trạng thái giãn nở nhiệt của các chi tiết và thay đổi kích thước khe hở nhiệt giữa piston - xi lanh, điều này ảnh hưởng tới ma sát, mài mòn piston và xi lanh.

Trong bài báo này, nhóm tác giả tiến hành khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát đến trạng thái nhiệt của piston và xi lanh trên động cơ diesel tàu thủy.

2. Phương pháp và đối tượng nghiên cứu

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Để khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát đến trạng thái nhiệt của piston và xi lanh, phải xác định trạng thái nhiệt của hai chi tiết này đối với các trường hợp khác nhau nhiệt độ nước làm mát. Khi thay đổi nhiệt độ nước làm mát, cân bằng nhiệt và tính chất quá trình trao đổi nhiệt trong nhóm piston - xi lanh cũng thay đổi, vì vậy phải tính toán lại chu trình công tác và xác định lại điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt nhóm piston - xi lanh. Các bước nghiên cứu thể hiện trên sơ đồ ở Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nghiên cứu

2.2. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là động cơ diesel 4 kỳ cao tốc, 12 xi lanh bố trí hình chữ V loại 3Д12, được sử dụng làm động cơ chính trên một số tàu của Hải quân (như tàu tuần tiễu K62, tàu quét mìn sông 1258Э...). Động cơ có công suất định mức 300 mã lực (220 kW) ở tốc độ 1.500 vòng/phút; làm mát cưỡng bức bằng nước hai vòng tuần hoàn, nhiệt độ nước ra khỏi động cơ khi làm việc liên tục có tải là 75 ÷ 95ºC; piston được làm từ hợp kim nhôm AK4, xi lanh được làm từ thép chịu nhiệt 38XMIOA với hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc nhiệt độ theo Bảng 1 [8].

Bảng 1. Hệ số dẫn nhiệt vật liệu piston và xylanh động cơ 3Д12

AK4		**38XMIOA**	
T, ºC	*λ, W/m.K*	*T, ºC*	*λ, W/m.K*
20	142,4	20	33
150	148,6	100	33
200	150,7	200	32
250	155,0	300	31
300	159,0	400	20

Tiến hành khảo sát với 5 trường hợp (TH) nhiệt độ nước làm mát T_{nc} tại khu vực tiếp xúc với bề mặt ngoài xi lanh theo Bảng 2.

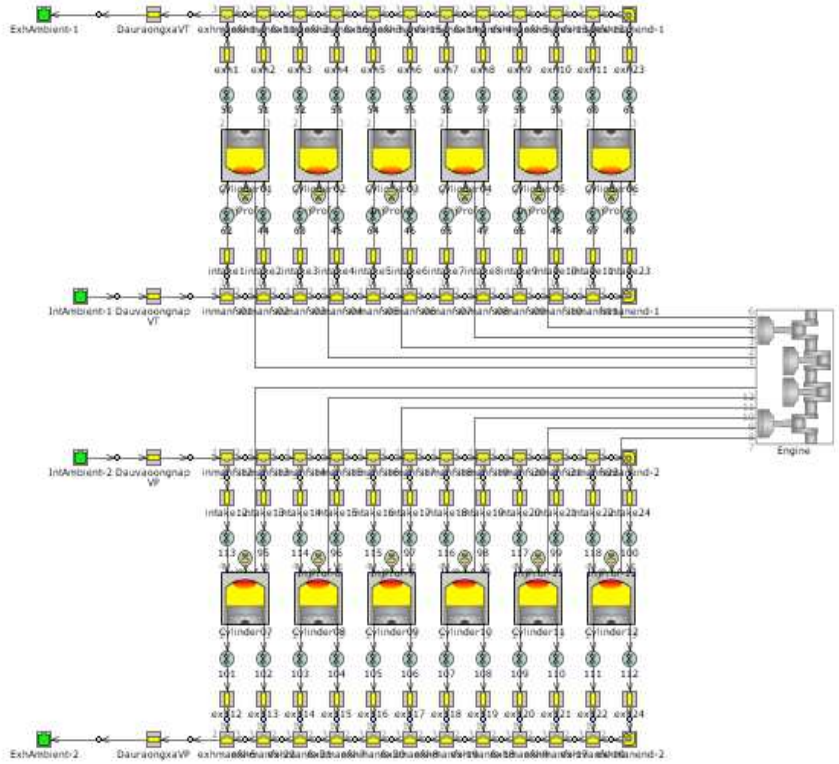
Bảng 2. Các trường hợp khảo sát

TT	T_{nc}, ºC (K)
TH 1	70 (343)
TH 2	75 (348)
TH 3	80 (353)
TH 4	85 (358)
TH 5	90 (363)

3. Xây dựng mô hình và tính toán

3.1. Mô hình tính toán chu trình công tác

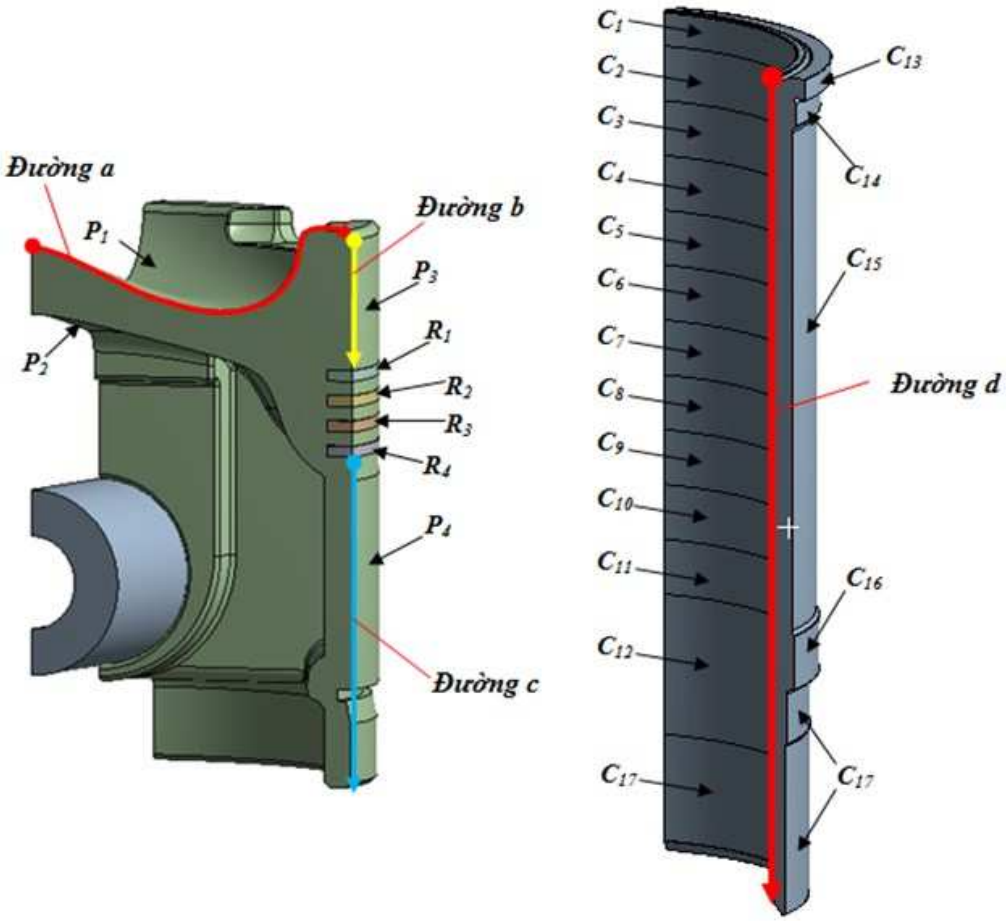
Để xây dựng mô hình tính toán chu trình công tác của động cơ, nhóm tác giả sử dụng phần mềm GT-SUITE của hãng Gamma Technologies, đây là phần mềm tổng hợp phục vụ nghiên cứu chuyên sâu với thế mạnh là mô phỏng, chuyên dùng để thiết kế, phân tích các hệ thống của động cơ, được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu. Mô hình tính toán chu trình công tác của động cơ 3Д12 được thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Mô hình tính toán chu trình công tác của động cơ 3Д12

3.2. Mô hình xác định điều kiện biên nhiệt

Mô hình hình học tính toán trạng thái nhiệt của nhóm piston - xi lanh được xây dựng trên phần mềm ANSYS WORKBENCH với các bề mặt piston - xi lanh cần xác định điều kiện biên nhiệt được thể hiện trên Hình 3, trong đó các bề mặt P_2, P_3, P_4 và từ C_{13} đến C_{17} được xác định theo [8], các bề mặt P_1 và từ R_1 đến R_4, từ C_1 đến C_{12} được xác định theo phương pháp [9,10]. Trong đó, mô hình tính toán sử dụng kết hợp môđun tính toán điều kiện biên BCOPC với phần mềm tính toán chu trình công tác GT-SUITE, phần mềm xác định trạng thái nhiệt ANSYS WORKBENCH để xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt piston - xi lanh.



Hình 3. Mô hình hình học nhóm piston - xi lanh

P_1, P_2, P_3, P_4 - Bề mặt đỉnh, mặt dưới đỉnh, mặt bên đầu và mặt bên thân piston; R_1, R_2, R_3, R_4 - Bề mặt lưng xéc măng lần lượt từ trên xuống; C_1…C_{12} - Các bề mặt gương xi lanh từ trên xuống với mép dưới C_1 tương ứng điểm chết trên, mép dưới C_{11} tương ứng điểm chết dưới của piston, mép dưới C_{12} tương ứng vị trí xéc măng thứ tư khi piston ở điểm chết dưới; C_{13}… C_{17} - Các bề mặt ngoài xi lanh từ trên xuống dưới với C_{13}, C_{14}, C_{16} là bề mặt vai tựa trên, vách giữa, vai tựa dưới tiếp xúc với thân xi lanh; C_{15} là bề mặt tiếp xúc nước làm mát; C_{17} là bề mặt tiếp xúc với gioăng cao su và khí trong các te.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả xác định điều kiện biên nhiệt các bề mặt nhóm piston - xi lanh

Sử dụng kết hợp các phần mềm GT-SUITE, BCOPC và ANSYS WORKBENCH, kết quả điều kiện biên thu được theo Bảng 3 trên cơ sở bảo đảm cân bằng năng lượng trong nhóm piston - xi lanh và làm cơ sở để xác định trạng thái nhiệt của piston và xi lanh.

Kết quả tính toán điều kiện biên cho thấy, khi tăng nhiệt độ nước làm mát, nhiệt độ tác dụng lên các bề mặt piston - xi lanh đều tăng, bao gồm cả các bề mặt tiếp xúc với môi chất công tác. Tại bề mặt đỉnh piston P_1, nhiệt độ trung bình do môi chất công tác dụng lên bề mặt đỉnh piston tăng từ 1080 K lên 1088 K khi nhiệt độ nước làm mát tăng từ 70ºC lên 90ºC. Tại bề mặt lưng xecmăng thứ nhất R_1, giá trị này tăng từ 427,7 K lên 444,1 K. Giá trị nhiệt độ tác dụng lên các bề mặt tăng lên, trong khi hệ số truyền nhiệt thay đổi không đáng kể, điều này sẽ làm tăng nhiệt độ của các chi tiết.

Bảng 3. Kết quả xác định điều kiện biên

Bề mặt	TH 1		TH 2		TH 3		TH 4		TH 5	
	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)	α (W/m^2.K)	T (K)
P_1	338,7	1080	338,5	1082	338,4	1084	338,2	1086	338	1088
R_1	25000	427,7	25000	431,9	25000	436	25000	440	25000	444,1
R_2	17000	426,6	17000	430,8	17000	434,9	17000	438,8	17000	442,8
R_3	12000	425,5	12000	429,6	12000	433,6	12000	437,6	12000	441,5
R_4	7000	424,4	7000	428,5	7000	432,3	7000	436,4	7000	440,2
C_1	338,7	1080	338,5	1082	338,4	1084	338,2	1086	338	1088
C_2	314,6	1112	314,4	1114	314,2	1116	314,1	1118	313,9	1120
C_3	846,3	695,5	846,2	698,4	846	701,2	845,9	704	845,7	706,9
C_4	1124	630,7	1124	633,7	1124	636,5	1124	639,5	1124	642,4
C_5	801,1	692	801	695	800,9	697,7	800,7	700,6	800,6	703,5
C_6	702,6	711,1	702,4	714	702,3	716,8	702,2	719,6	702,1	722,5
C_7	649,5	706,7	649,4	709,6	649,3	712,4	649,2	715,2	649,1	718,1
C_8	613	670,7	612,9	673,7	612,8	676,5	612,7	679,4	612,6	682,3
C_9	580,6	590,5	580,6	593,5	580,5	596,4	580,4	599,3	580,3	602,3
C_{10}	565,2	502,2	565,1	505,4	565,1	508,4	565	511,5	565	514,6
C_{11}	606,4	469,2	606,4	472,6	606,4	475,7	606,4	478,9	606,3	482,1
C_{12}	996,3	458,6	996,3	461,7	996,3	465,3	996,3	468,6	996,3	472

4.2. Kết quả tính toán chu trình công tác của động cơ

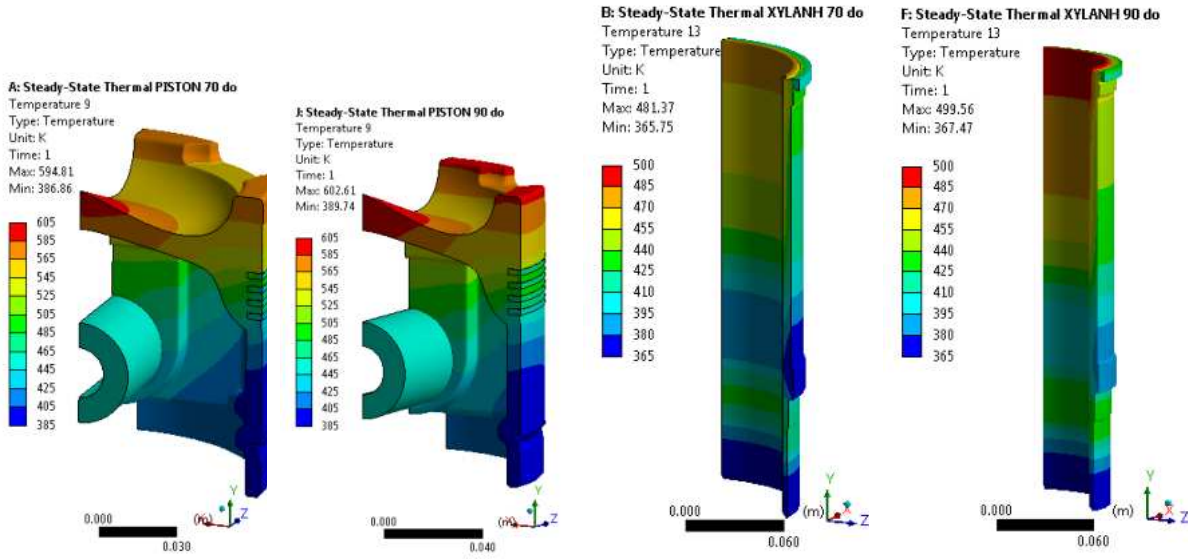
Bảng 4. Kết quả một số thông số tính toán chu trình công tác

Thông số	TH 1	TH 2	TH 3	TH 4	TH 5
Công suất có ích N_e, kW	214,534	214,540	214,547	214,553	214,560
Hiệu suất có ích η_e, %	33,195	33,196	33,197	33,198	33,199
Suất tiêu hao nhiên liệu có ích g_e, g/kWh	252,211	252,204	252,197	252,189	252,182
Tổng trao đổi nhiệt các xi lanh, kW	117,643	116,899	116,171	115,444	114,716
Trao đổi nhiệt trung bình xi lanh, kW	9,786	9,726	9,666	9,607	9,548
Hệ số nạp, không khí η_v	0,834	0,833	0,832	0,831	0,830
Áp suất cực đại xi lanh TB $p_{\max}$, MPa	6,607	6,608	6,609	6,610	6,611
Nhiệt độ cực đại trong xi lanh $T_{\max}$, K	1822,0	1824,6	1827,1	1829,6	1832,2
Nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh piston, K	570,43	572,69	574,93	577,11	579,3
Nhiệt độ trung bình bề mặt xi lanh, K	434,26	438,48	442,63	446,81	451,01

Kết quả tính toán chu trình công tác từ phần mềm GT-SUITE trong bảng 4 cho thấy, khi nhiệt độ nước làm mát tăng từ 70ºC lên 90ºC, nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh piston tăng từ 570,43 K lên 579,3 K, nhiệt độ trung bình bề mặt xi lanh (vùng tiếp xúc với môi chất công tác) tăng từ 434,26 K lên 451,01 K. Sự gia tăng nhiệt độ trên bề mặt buồng đốt làm tăng nhiệt lượng truyền đến khí nạp, làm giảm hệ số nạp của động cơ từ 0,834 xuống 0,830 làm giảm công suất động cơ. Tuy nhiên, tổng lượng nhiệt thất thoát qua bề mặt buồng đốt giảm từ 117,643 kW xuống 114,716 kW, điều này sẽ làm tăng công suất và hiệu suất của động cơ, vì vậy công suất động cơ gần như không thay đổi ($N_e = 214,534\ kW$ với $T_{nc} = 70°C$ và $N_e = 214,56\ kW$ với $T_{nc} = 90°C$).

4.3. Kết quả xác định trạng thái nhiệt

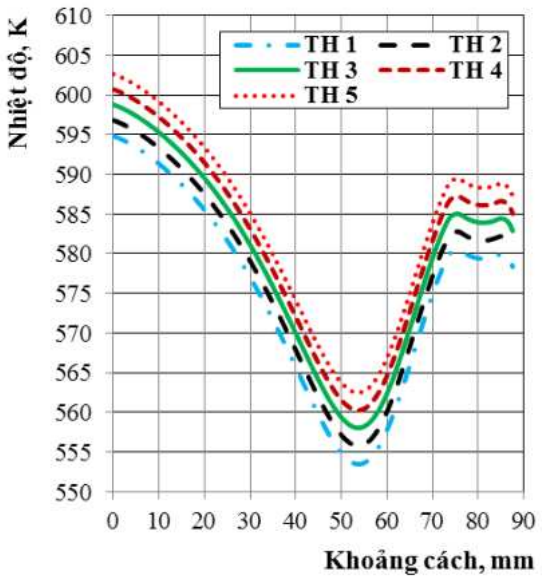
Sử dụng phần mềm ANSYS WORKBENCH xác định trạng thái nhiệt piston, xi lanh các trường hợp; kết quả TH 1, 5 thể hiện trên Hình 4. Nhiệt độ piston, xi lanh theo các đường khảo sát ở Hình 3 đối với các TH thể hiện trên Hình 5, Hình 6, Hình 7 và Hình 8.



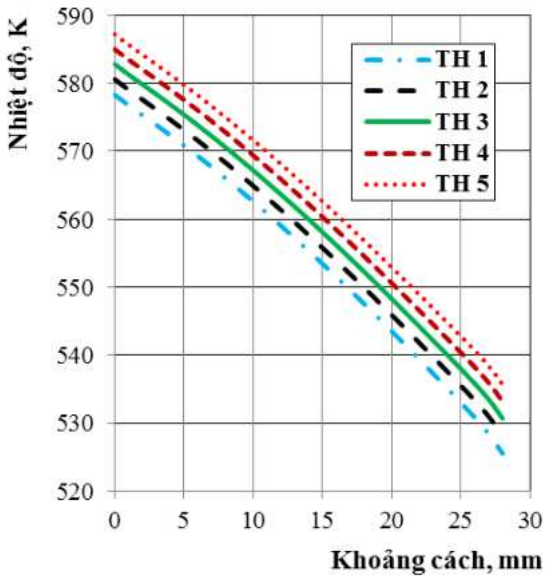
TH 1 **TH 5** **TH 1** **TH 5**

Piston *Xi lanh*

Hình 4. Trạng thái nhiệt piston và xi lanh ở TH 1 và TH 5



Hình 5. Nhiệt độ bề mặt đỉnh piston theo đường a (Hình 3)

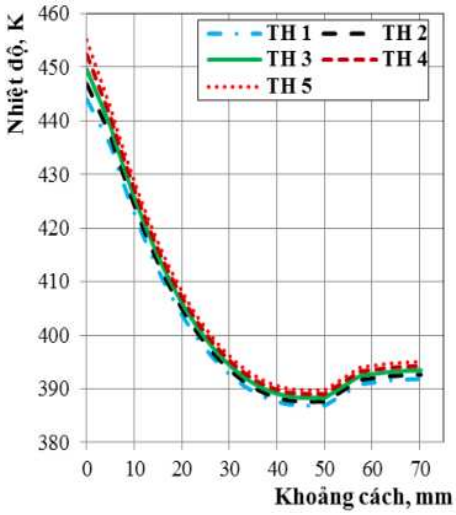


Hình 6. Nhiệt độ bề mặt bên đầu piston theo đường b (Hình 3)

Kết quả thu được trong phạm vi khảo sát:

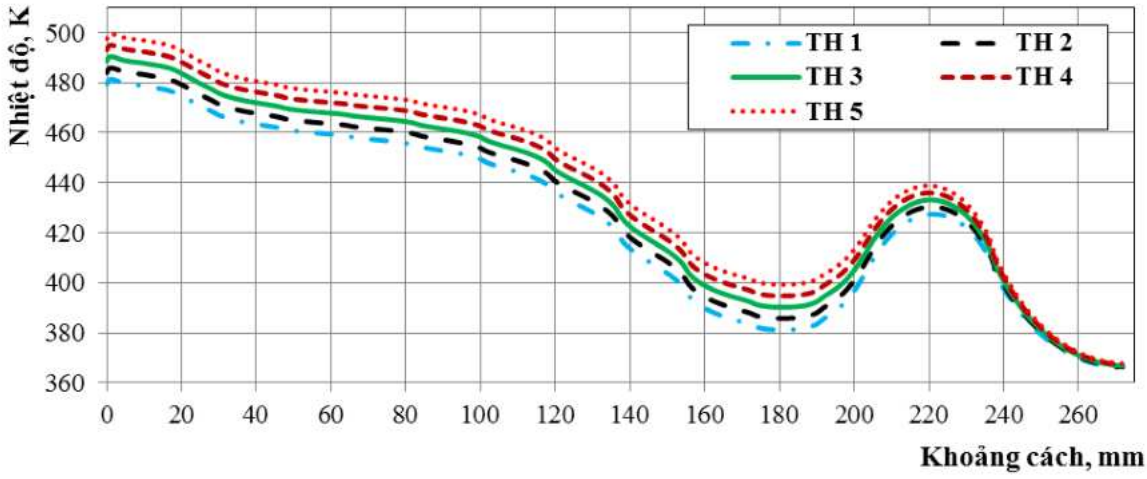
- Nhiệt độ piston và xi lanh tăng lên rõ rệt (Hình 4). Khi tăng nhiệt độ nước làm mát thêm 5ºC, nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh piston tăng khoảng 2ºC, nhiệt độ trung bình bề mặt xi lanh (vùng tiếp xúc với môi chất công tác) tăng khoảng 4ºC (Bảng 4).

- Đối với piston, theo đường a, tại trung tâm đỉnh piston nhiệt độ tăng 7,8ºC, ở vùng rìa ngoài đỉnh piston, sự chênh lệch tăng lên 8,9ºC (Hình 5); theo đường b, ở phần đầu piston, nhiệt độ tại điểm trên cùng tăng 8,9ºC, tại điểm dưới cùng (mép trên rãnh xéc măng thứ nhất) tăng 10,2ºC (Hình 6); theo đường c, trên thân piston, tại mép dưới của rãnh xéc măng thứ tư, nhiệt độ tăng 11ºC và giá trị này giảm dần tới mép trên rãnh xéc măng dầu cuối cùng, nhiệt độ chỉ tăng 2,9ºC, sau đó, giá trị này tăng nhẹ nhưng tới điểm cuối cùng phần đuôi piston, nhiệt độ chỉ tăng 3,2ºC (Hình 7). Kết quả khảo sát sự thay đổi nhiệt độ piston cho thấy, khi thay đổi nhiệt độ nước làm mát, khu vực xung quanh các rãnh xéc măng có sự thay đổi lớn nhất và sự thay đổi này giảm xuống tới các khu vực xa rãnh xéc măng hơn.



Hình 7. Nhiệt độ bề mặt bên thân piston theo đường c (Hình 3)

- Đối với xi lanh, theo đường d, trên bề mặt gương xi lanh, nhiệt độ điểm trên cùng tăng 18,2ºC, giá trị tăng nhiệt độ thay đổi không quá nhiều cho tới vị trí gioăng kín nước đầu tiên, tại đó, nhiệt độ tăng khoảng 17,8ºC. Khi khảo sát về phần đuôi xi lanh, giá trị tăng nhiệt độ giảm xuống, tại vị trí dưới cùng, nhiệt độ mặt trong của xi lanh chỉ tăng 1,8ºC (Hình 8).



Hình 8. Nhiệt độ bề mặt gương xi lanh theo đường d (Hình 3)

- Nhiệt độ lớn nhất của piston là 602,61 K, xi lanh là 499,6 K (TH5), so sánh với giới hạn nhiệt độ của vật liệu, với piston hợp kim nhôm không quá 523 ÷ 623 K; xi lanh thép không quá 723 ÷ 773 K [8], nhiệt độ của piston, xi lanh vẫn nằm trong giới hạn cho phép.

5. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát đến trạng thái nhiệt của piston, xi lanh động cơ diesel tàu thủy với đối tượng nghiên cứu động cơ 3Д12. Kết quả khảo sát cho thấy nhiệt độ nước làm mát có ảnh hưởng đáng kể tới trạng thái nhiệt của piston và xi lanh. Khi nhiệt độ nước làm mát tăng từ 70ºC lên 90ºC, nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh piston tăng từ 570,43 K lên 579,3 K, nhiệt độ trung bình bề mặt xi lanh (vùng tiếp xúc với môi chất công tác) tăng từ 434,26 K lên 451,01 K.

Đối với piston, khi thay đổi nhiệt độ nước làm mát, khu vực xung quanh các rãnh xéc măng có sự thay đổi lớn nhất, và sự thay đổi này giảm xuống đối với các khu vực xa rãnh xéc măng hơn. Đối với xi lanh, khu vực xung quanh áo nước làm mát thay đổi lớn nhất và sự thay đổi này giảm rõ rệt từ khu vực gioăng bao kín nước về phía đuôi xi lanh.

Khảo sát sự thay đổi thông số chu trình công tác của động cơ cho thấy, tăng nhiệt độ nước làm mát làm tăng nhiệt độ bề mặt buồng đốt, tăng độ sấy nóng khí nạp, làm giảm hệ số nạp, tuy nhiên, nhiệt độ bề mặt buồng đốt tăng làm giảm sự thất thoát nhiệt vào hệ thống làm mát, làm cho công suất động cơ thay đổi không đáng kể.

Sự thay đổi nhiệt độ khác nhau giữa piston và xi lanh, cùng với sự khác nhau về vật liệu chế tạo sẽ làm thay đổi sự giãn nở nhiệt và kích thước khe hở giữa piston và xi lanh. Nghiên cứu tiếp theo được xác định là khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát tới kích thước khe hở nhiệt giữa piston và xi lanh.

Tài liệu tham khảo

[1] Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, and Л. Л. Мягков. (2008). *Конструирование двигателей внутреннего сгорания*. М.: Машиностроение.

[2] F. S. Silva. (2006). “Fatigue on engine pistons – A compendium of case studies,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 13, pp. 480–492.

[3] G. N. G. (1978). *Handbook on iron casting*. M.: Mechanical engineering. Leningr. department.

[4] M. Takiguchi, H. Kikuchi, and S. Furuhama. (1988). “Influence of clearance between piston and cylinder on piston friction,” *SAE Trans.*, pp. 737–745.

[5] J. Walentynowicz. (2011). “Influence the higher temperature of the cooling liquid on operational parameter of the piston combustion engine,” *J. KONES*, vol. 18, pp. 671–676.

[6] M. Gazon, J. B. Blaisot, N. Duclaux-De-L’Estoille, and S. Wang, “Effect of coolant temperature on combustion and combustion noise fluctuations in a Diesel engine at idle conditions,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 5_Supplement, p. 3261, May 2008, doi: 10.1121/1.2933564.

[7] J. Adler and T. Bandhauer, “Performance of a Diesel Engine at High Coolant Temperatures,” *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 139, May 2017, doi: 10.1115/1.4036771.

[8] Đ. T. Thắng. (2016). *Tính toán sức bền các chi tiết của động cơ đốt trong bằng phương pháp phần tử hữu hạn*. Hà Nội: Nhà xuất bản Quân đội nhân dân Việt Nam.

[9] N. Van Duong and P. X. Phuong. (2023). “Determining thermal equivalent boundary conditions for piston surfaces,” *Transp. Commun. Sci. J.*, pp. 452–464.

[10] Nguyễn Văn Dương, Phạm Xuân Phương, and Lê Tiến Dương, “Xây dựng mô hình xác định điều kiện biên nhiệt trên pít tông - xi lanh động cơ diesel 4 kỳ phun nhiên liệu trực tiếp,” *J. Sci. Tech.*, vol. 20, no. 01 SE-, Mar. 2025, doi: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n01.908.

Research on the Impact of Coolant Temperature on the Thermal State of the Piston and Cylinder in Marine Diesel Engines.

Abstract: *Annually, a significant number of pistons and cylinders in marine diesel engines are damaged and must be replaced. The damage is mainly related to wear, temperature, and fatigue. At high temperatures, the material strength is seriously reduced, while the thermal expansion and uneven deformation of the piston and cylinder can decrease the thermal clearance size and accelerate the surface wear process. The paper presents the results of developing a model to evaluate the impact of coolant temperature on the thermal state of the piston and cylinder in marine diesel engines. The computational model uses a combination of the BCOPC boundary condition calculation module with GT-SUITE working cycle calculation software and ANSYS WORKBENCH thermal state determination software to evaluate the impact of coolant temperature on the thermal state of the piston and cylinder. The research results show that the coolant temperature has a significant influence on the thermal state of components within the piston-cylinder group; at the same time, the calculated results serve as input data for investigating the impact of coolant temperature on the thermal clearance size of the piston-cylinder.*

Keywords: Thermal state; temperature; piston; cylinder; diesel engine.

❑

Nghiên cứu thiết kế phần tử đàn hồi trong hệ thống treo xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam

Tô Viết Thành, Dương Thành Công*, Từ Vĩnh Sang

Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: duongthanhcongmta@gmail.com, Tel: 0345142636

Tóm tắt

Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết thiết kế phần tử đàn hồi của hệ thống treo trên xe tăng thiết giáp, xây dựng mô hình khảo sát dao động, ứng dụng vào tính toán thiết kế hệ thống treo cho xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam, khảo sát và đánh giá độ êm dịu chuyển động của xe khi sử dụng hệ thống treo có phần tử đàn hồi đã thiết kế, góp phần hoàn thiện thiết kế, hoàn thiện công nghệ chế tạo các cụm hệ thống và tổng thành xe thiết giáp xích.

Từ khóa: *Phần tử đàn hồi; hệ thống treo; xe thiết giáp xích; độ êm dịu.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, xe thiết giáp xích đang được Bộ Quốc phòng đẩy mạnh nghiên cứu, sản xuất, nội địa hóa với việc tự chủ công nghệ cao, các tính năng của xe như độ cơ động hay tính năng thông qua đã được chú trọng nâng cao. Bên cạnh đó việc thiết giáp xích ngoài kíp xe ra còn mang thêm tiểu đội bộ binh bên trong yêu cầu bảo đảm độ êm dịu khi chuyển động, tránh gây mệt mỏi và làm giảm khả năng tác chiến của kíp chiến đấu.

Trong những điều kiện chuyển động thực tế, các kích thích từ mặt đường lên thân xe thông qua hệ thống treo làm giảm tốc độ và độ êm dịu chuyển động, ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe kíp xe, giảm khả năng quan sát địa hình, giảm độ chính xác của hỏa lực, giảm độ bền và có thể gây phá hỏng các kết cấu của xe.

Từ những yêu cầu đặt ra trên, để hoàn thiện cấu tạo và sản xuất xe thiết giáp xích tại Việt Nam, cần phải nghiên cứu sâu hơn về các hệ thống trên xe, trong đó có hệ thống treo. Phần tử đàn hồi trong hệ thống treo có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng cơ động, tính năng thông qua và độ êm dịu chuyển động của xe.



Hình 1. Xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam

2. Cơ sở lý thuyết thiết kế phần tử đàn hồi trong hệ thống treo xe thiết giáp xích

2.1. Các tiêu chí đánh giá hệ thống treo

Chất lượng của hệ thống treo thường được đánh giá bằng những tham số của độ êm dịu chuyển động: tần số, biên độ, tốc độ và gia tốc của các dao động thẳng đứng và dao động góc dọc thân xe. Các tham số này phụ thuộc vào kết cấu của xe và biên dạng mặt đường xe chạy.

Cụ thể chúng được đánh giá thông qua:

- Phân bố biên độ gia tốc dao động thẳng đứng theo chiều dài thân xe.

- Biên độ cực đại của dao động thân xe khi trục cân bằng chưa va đập cứng với gối hạn chế hành trình.

- Vận tốc chuyển động của xe khi xảy ra hiện tượng cộng hưởng.

- Hiệu quả dập tắt dao động thân xe của giảm chấn.

2.2. Sơ đồ tính toán hệ thống treo

Khi chuyển động, xe thiết giáp xích bị các bề mặt mấp mô của nền đường tác động lên làm cho thân xe bị dao động. Trong thực tế, dao động chủ yếu của thân xe có thể tính đến là: Dao động thẳng đứng của trọng tâm thân xe và dao động góc dọc của thân xe (dao động quanh trục ngang của thân xe).

Để lập các phương trình vi phân mô tả dao động của thân xe xích quân sự, ta chấp nhận các giả thiết sau:

- Chuyển động của xe xích là chuyển động thẳng đều;

- Biên dạng mặt đường đối với hai dải xích là như nhau;

- Bỏ qua ảnh hưởng của dẫn tiến xích đến thân xe;

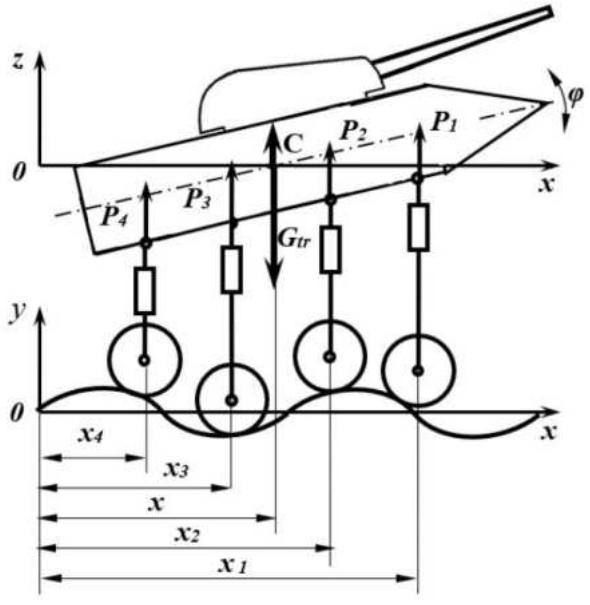
Chuyển động của thân xe được chọn theo toạ độ như sau:

x - Độ dịch chuyển trọng tâm xe theo phương nằm ngang, tính từ một điểm cố định trên địa hình;

z - Độ dịch chuyển trọng tâm thân xe theo phương thẳng đứng. Gốc toạ độ z trùng với vị trí trọng tâm thân xe khi xe chạy trên mặt phẳng nằm ngang, với điều kiện không có dao động thân xe;

φ - Dịch chuyển góc của thân xe trong mặt phẳng XOZ, tính từ đường nằm ngang. giá trị dương của φ trong hệ tọa độ đã chọn ứng với dịch chuyển góc của thân xe ngược chiều kim đồng hồ;

y - Tọa độ thẳng đứng, đặc trưng cho biến dạng của nền đất theo phương chuyển động.



Hình 2. Mô hình tính toán dao động xe thiết giáp xích

Trong đó:

G_{tr}: Trọng lượng phần được treo;

P_j: Lực tác dụng của bánh tỳ thứ j qua hệ thống treo vào thân xe theo phương thẳng đứng;

C_j: Độ cứng của phần tử đàn hồi;

r_j: Hệ số cản của giảm chấn;

I_{tr}: Mô men quán tính so với trục ngang đi qua trọng tâm thân xe;

x: Tọa độ trọng tâm thân xe theo phương nằm ngang;

x_j: Tọa độ tâm của bánh tỳ thứ j theo phương nằm ngang (j = 1,2,3,...n);

Để có thể viết được các phương trình vi phân mô tả chuyển động của thân xe có tính đến các giả thiết trên, khi lập sơ đồ tính toán, ta coi:

- Trọng lực các phần treo của xe G_{tr} tác dụng theo phương thẳng đứng và đặt tại trọng tâm xe;
- Trạng thái ban đầu của thân xe là trạng thái tĩnh;
- Các ngoại lực tác dụng lên thân xe từ hệ thống treo hướng theo phương thẳng đứng và phương của lực đi qua trục bánh tỳ.

Ta thấy, đối với xe xích nói chung, tất cả các ngoại lực tác dụng lên thân xe đều là phản lực (trừ trọng lực). Các phản lực xuất hiện do tác dụng tương hỗ giữa các bánh tỳ và xích có hướng đi qua tâm của bánh tỳ. Trong trường hợp tổng quát các phản lực này có thể phân tích thành các phần thẳng đứng và nằm ngang.

Vì chuyển động của xe được coi là thẳng đều, nên tổng các thành phần phản lực nằm ngang phải bằng không, vì vậy các dao động của thân xe trong mặt phẳng đứng song song với hướng chuyển động của xe, là do các thành phần phản lực thẳng đứng truyền qua các trục cân bằng của bánh tỳ và phần tử đàn hồi lên thân xe gây nên.

2.3. Phương trình dao động thân xe thiết giáp xích

Với mô hình khảo sát ở trên ta có hệ phương trình vi phân sau:

$$m_{tr}\ddot{Z} = \sum_{1}^{2n} P_j - G_{tr}$$

$$I_{tr}\ddot{\varphi} = \sum_{1}^{2n} P_j l_j$$

Trong đó:

m_{tr} - khối lượng phần treo của xe (kg)

I_{tr} - Mômen quán tính của phần treo thân xe đối với trục ngang qua trọng tâm thân xe ($N.m.s^2$)

$\ddot{z}$, $\ddot{\varphi}$ - Gia tốc thẳng đứng và gia tốc góc của trọng tâm thân xe (m/s^2, rad/s^2)

$l_j = (x_j - x)$ - Khoảng cách từ trọng tâm thân xe đến bánh tỳ thứ j (m)

P_j - Lực tác dụng từ bánh tỳ thứ j qua hệ thống treo vào thân xe dọc theo phương thẳng đứng (N)

n - Số bánh tỳ một bên

3. Thiết kế phần tử đàn hồi của hệ thống treo

Về cơ bản, hệ thống treo trên xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam cũng như hầu hết các hệ thống treo trên các xe xích quân sự khác đó là hệ thống treo độc lập, có trục xoắn đơn, phần tử giảm chấn thủy lực kiểu ống tác động hai chiều.

Qua quá trình tìm hiểu, nghiên cứu, tính toán theo yêu cầu tính năng của xe đã được đề ra, nhóm tác giả đưa ra được các thông số kỹ thuật phục vụ cho tính toán của phần tử đàn hồi như sau:

Bảng 1. Các thông số tính toán hệ thống treo xe thiết giáp xích

TT	Các thông số kỹ thuật	Ký hiệu	Thông số	Đơn vị
1	Khối lượng xe	G	14780	kg
2	Trọng lượng phần treo	G_{tr}	136700	N
3	Tổng số bánh tỳ	2.n	12	Chiếc
4	Khoảng cách từ tâm bánh tỳ thứ n đến trọng tâm xe (n = 1…6)	l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6	1,512 1,178 0,842 -0,453 -1,178 -1,893	m
5	Chiều dài làm việc của trục xoắn	L_x	2,076	m
6	Khoảng sáng gầm xe	H_{gx}	0,37	m
7	Bán kính bánh tỳ	R_{bt}	0,295	m
8	Chiều dài thân xe	L_{tx}	6,97	m
9	Chiều cao thân xe	H_{tx}	2,224	m
10	Chiều dài làm việc của trục cân bằng	R_{cb}	0,325	m
11	Khoảng cách từ đường tâm trục xoắn đến đáy gầm xe	h_1	0,065	m
12	Công suất lớn nhất của xe	N_{emax}	240	kW
13	Tổng số giảm chấn		4	Chiếc
14	Hệ số cản của giảm chấn quy về trục tâm bánh tỳ ở hành trình thuận	μ_{tb}	38150	$N.m^{-1}.s^{-1}$
15	Hệ số cản của giảm chấn quy về trục tâm bánh tỳ ở hành trình nghịch	μ_{ngb}	54370	$N.m^{-1}.s^{-1}$
16	Mô đun đàn hồi loại 2	G	$8,5.10^4$	MPa

3.1. Xác định độ cứng quy dẫn của trục xoắn

Độ cứng quy dẫn của phần tử đàn hồi C_{bj} - xác định từ điều kiện đảm bảo chu kỳ dao động góc riêng T_φ của xe:

$$T_\varphi = 2\pi\sqrt{\frac{I_y}{2\sum_{j=1}^{n} C_{bj} l_j^2}} = 1{,}1 - 1{,}5[s]$$

Để đảm bảo cho các thành viên kíp xe không bị hiện tượng say, ta chọn $T_\varphi = 1{,}2$ s.

Từ công thức trên ta có:

$$C_{bj} = \frac{\pi^2 I_y}{T_\varphi^2 \sum_{j=1}^{n} l_j^2}$$

Giá trị I_x được xác định theo công thức:

$$I_y = \frac{G_{tr}.\alpha.(0,06.\beta_y^2.L_{tx}^2 + H_{tx}^2)}{g}$$

Trong đó:

g - Gia tốc trọng trường, g = 9,8 m/s^2.

α - Hệ số tính đến ảnh hưởng của khối lượng vỏ thép.

+ α = 1, đối với xe có vỏ thép chống đạn pháo.

+ α = 0,5 - 0,65, đối với xe có vỏ thép chống đạn bộ binh.

Đối với xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam, ta lấy α = 0,65.

β_y = 1,13 với pháo nòng dài đặt trên xe xích hạng nhẹ.

L_{tx} - Chiều dài thân xe.

H_{tx} - Chiều cao thân xe.

G_{tx} - Trọng lượng phần treo của xe.

Thay các số liệu vào ta được

I_y = 98.767 [N.m.s^2]

C_{bj} = 70.744 [N/m]

3.2. Hành trình của bánh tỳ

Hành trình của bánh tỳ được xác định theo công thức sau:

$$f_t = \frac{P_t}{C_{bi}} = \frac{G_{tr}}{2n.C_{bi}}$$

Với: n - số bánh tỳ mỗi bên.

Thay số vào, ta có:

$$f_t = \frac{136700}{2.6.21790} = 0,161[m]$$

3.3. Góc nghiêng của trục cân bằng so với phương ngang

Khi ở trạng thái tĩnh, theo sơ đồ tính toán cụm treo trục xoắn đơn có:

$$\sin\beta = \frac{H_{gx} - h_1 - R_{bt}}{R_{cb}}, \text{ suy ra } \beta = \arcsin(\frac{H_{gx} + h_1 - R_{bt}}{R_{cb}})$$

Thay số ta được: β = 0,445 [rad] = 25,529^0

3.4. Góc xoắn của trục xoắn khi chịu tải tĩnh

$$\gamma_t = \gamma_0 - \beta$$

Với γ_0 - Góc giữa trục cân bằng và phương ngang khi trục cân bằng ở trạng thái tự do

Từ sơ đồ tính toán cụm treo ta có:

$$\sin\gamma_0 = \frac{f_t + H_{gx} + h_1 - R_{bt}}{R_{cb}}; \text{ suy ra } \gamma_0 = \arcsin(\frac{f_t + H_{gx} + h_1 - R_{bt}}{R_{cb}}) = 1,184[rad] = 67,89^o$$

Ta có: $\gamma_t = \gamma_0 - \beta = 0,739[rad] = 42,36^o$

3.5. Đường kính làm việc của trục xoắn:

$$\gamma_t = \frac{M_{xt} L_x}{G I_p} = \frac{P_t R_{cb} \cos\beta L_x}{G.0,1.d_x^4}$$

Trong đó:

P_t - Tải trọng tĩnh của thân xe tác dụng lên mỗi bánh tỳ, $P_t = G_{tr}/(2.n)$

I_p - Mô men quán tính độc cực tiết diện thanh xoắn, $I_p = 0.1 d_x^4$ (dx: đường kính trục xoắn).

Suy ra, ta có:

$$d_x = \sqrt{\frac{P_t R_{cb} \cos\beta L_x}{G.0,1.\gamma_t}}$$

Thay các số liệu vào, ta được: $d_x = 0,033$ (m). Để bảo đảm độ cứng, chọn: $d_x = 0,038$ (m).

4. Tính toán kiểm bền trục xoắn

4.1. Xác định tải trọng lớn nhất tác dụng lên trục xoắn

Từ sơ đồ tính toán cụm treo nhận thấy tải trọng lớn nhất tác dụng lên trục xoắn khi xe làm việc là khi trục cân bằng chạm vào hạn chế hành trình xác định theo công thức:

$P_{bmax} = C_{bj} f_{bjmax}$

- Độ cứng tổng cộng của cụm treo $C_{bj} = 70820$ [N/m]

- Hành trình cực đại của bánh tỳ $f_{bimax} = 0,438$ [m]

- Thay các số liệu vào ta có: $P_{b\max} = C_{bj} f_{bi\max} = 31040$ [N].

- Mô men xoắn lớn nhất của trục xoắn:

$M_{tx\max} = P_{b\max} R_{cb} \cos\alpha_1 = 10220$ [N.m]

Do khi chế tạo người ta đã tiến hành tạo ứng suất dư ban đầu cho trục xoắn (thường bằng 1/3 ứng suất lớn nhất của trục xoắn) nên thực tế M_{txmax} mà trục xoắn phải chịu là: $M_{tx\max tt} = 2M_{tx\max}/3 = 6811$ [N.m].

Trong quá trình tính toán, đầu nhỏ của trục xoắn gắn với thân xe xem như là liên kết tuyệt đối cứng (fixed), phần then hoa đầu to trục xoắn là phần trục tiếp nhận mô men xoắn. Trong quá trình làm việc, ở mỗi vị trí ăn khớp giữa một cặp then của then hoa đầu to trục xoắn và then hoa trục cân bằng chịu tác dụng của một lực vòng lớn nhất là:

$$P_{then\max} = \frac{M_{tx\max tt}}{Z_{th} R_{tx}}$$

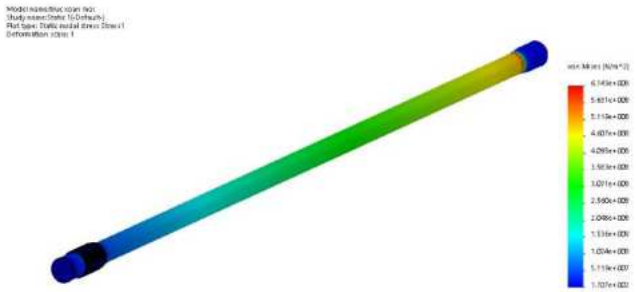
R_{tx} - bán kính vòng chia đầu to trục xoắn, $R_{tx} = 0,024$ [m];

Z_{th} - số then của then hoa đầu to trục xoắn $Z_{th} = 48$.

Thay các số liệu vào ta có: $P_{thenmax} = 5912$ [N]

4.2. Kiểm bền trục xoắn bằng Ansys Workbench

Để tính toán kiểm bền trục xoắn khi đưa chế độ tải trọng như trên, ta sử dụng phần mềm Ansys Workbench, thu được các kết quả sau:



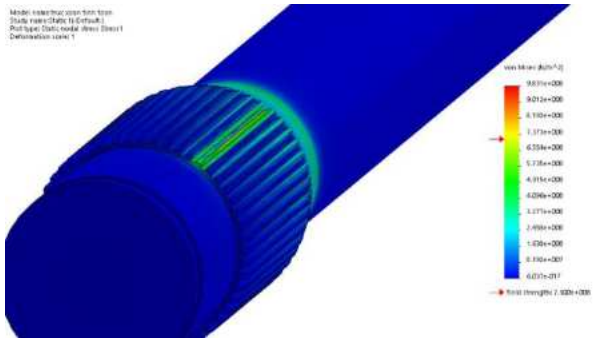
Hình 3. Phân bố ứng suất trên trục xoắn

Ứng suất mặt cắt ngang lớn nhất của trục xoắn τ_{tdmax} = 614,3 MPa tại vị trí tiếp giáp giữa then hoa đầu nhỏ với đoạn làm việc của trục xoắn. So sánh với ứng suất bền cho phép của vật liệu chế tạo trục xoắn 45XHMΦA là $[\tau_b]$ = 1275 MPa, ta nhận thấy $\tau_{tdmax} < [\tau_b]$ => Như vậy trục xoắn đảm bảo điều kiện bền ứng suất khi làm việc.



Hình 4. Biến dạng tổng của trục xoắn

Biến dạng lớn nhất của trục xoắn là Δ_{max} = 0,0024 [mm].



Hình 5. Ứng suất trên bề mặt then hoa tại một vị trí ăn khớp

Ứng suất chèn dập lớn nhất của then hoa là σ_d = 983,1 MPa. So sánh với ứng suất chèn dập cho phép của vật liệu chế tạo trục xoắn 45XHMΦA là $[\sigma]$ = 1420 MPa, ta nhận thấy $\sigma_d < [\sigma]$ => Như vậy then hoa trục xoắn đảm bảo điều kiện bền ứng suất chèn dập.

5. Đánh giá độ êm dịu chuyển động của xe thiết giáp xích khi sử dụng hệ thống treo thiết kế

Để đảm bảo độ êm dịu chuyển động của xe xích thì các thông số đánh giá độ êm dịu chuyển động của nó phải nằm trong giới hạn cho phép, theo các tiêu chuẩn đánh giá. Các chỉ tiêu đánh giá độ êm dịu chuyển động của xe xích gồm:

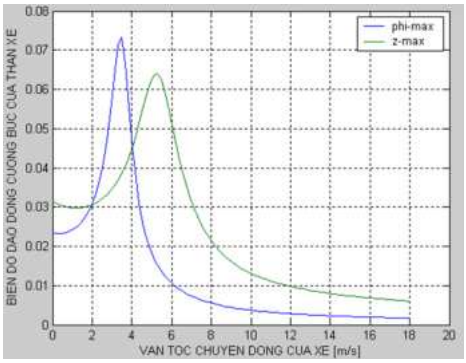
+ Gia tốc dao động thẳng đứng tại vị trí ghế lái;

+ Chu kỳ dao động góc dọc của thân xe: T, φ;

+ Thế năng biến dạng đàn hồi: λ;

+ Biên độ cộng hưởng: φ_{max}, Z_{max}.

Trên cơ sở mô hình khảo sát dao động xe thiết giáp xích đã được xây dựng, chúng ta xây dựng chương trình tính toán thu được kết quả như sau:



Các kết quả đảm bảo các chỉ tiêu đánh giá độ êm dịu chuyển động của xe như chu kỳ dao động góc riêng, biên độ dao động thẳng đứng, biên độ dao động góc dọc và các thông số kết cấu cụm treo như góc nghiêng trục cân bằng, hành trình bánh tỳ… Các tham số này đều nằm trong giá trị cho phép, điều đó khẳng định hệ thống treo đáp ứng được yêu cầu chuyển động của xe trên thực địa.

Biên độ dao động thẳng đứng lớn nhất của thân xe là 6,25 cm tại tốc độ V = 17,93 km/h.

Biên độ dao động góc dọc lớn nhất của thân xe là $3,65^0$ tại tốc độ V = 11,2 km/h.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày những nội dung chính: Tính toán thiết kế mới hệ thống treo độc lập, trục xoắn đơn cho xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam; Sử dụng phần mềm Inventor để thiết kế 3D cụm treo của xe trên cơ sở kích thước tính toán được; Sử dụng phần mềm Ansys Workbench để tính bền cho trục xoắn; Xây dựng mô hình dao động tổng quát của xe, thiết lập hệ phương trình vi phân tổng quát mô tả dao động thân xe, khảo sát dao động thân xe với cụm treo tính toán thiết kế bằng phương pháp giải tích, từ đó đánh giá chất lượng hệ thống treo thiết kế so với các chỉ tiêu, yêu cầu chung của hệ thống treo làm cơ sở cho quá trình nghiên cứu hoàn thiện thiết kế hệ thống treo lắp trên xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

1. Lê Trung Dũng, Nguyễn Minh Tân, Cù Xuân Phong.(2023). *Lý thuyết xe xích quân sự*, Lần 1, NXB QĐND, Hà Nội.
2. Nguyễn Văn Luận, Lê Kỳ Nam. (1999). *Kết cấu và tính toán xe tăng - thiết giáp*, phần 2 Hệ thống truyền lực, Học viện KTQS.
3. Binh chủng Tăng thiết giáp. (2003). *Cấu tạo và sử dụng xe chiến đấu bộ binh BMP-1*, NXB Quân đội nhân dân.
4. Nguyễn Phùng Quang. (2004). *MatLab & Simulink*, NXB Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội.

Research on design of elastic elements in suspension systems of tracked armor vehicles manufactured in Viet Nam

Abstract: *The article presents the theoretical basis for designing elastic elements of suspension systems on armored vehicles, building a vibration survey model, applying it to calculating the design of suspension systems for tracked armored vehicles manufactured in Vietnam, surveying and evaluating the smoothness of vehicle movement when using suspension systems with designed elastic elements, contributing to perfecting the design, perfecting the manufacturing technology of system clusters and assemblies of tracked armored vehicles.*

Keywords: *Elastic element, suspension System, chain armored vehicle, smoothness of movement.*

❑

Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số kết cấu đến đặc tính động lực học của van phân phối điện - thủy lực hai cấp dùng trên xe quân sự

Nguyễn Duy Đạt[1], Nguyễn Tiến Vĩ[1*], Lê Văn Dưỡng[1]
[1]Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự
Email: tienvinguyen2610@gmail.com

Tóm tắt

Van phân phối điện - thủy lực hai cấp được dùng trên một số xe quân sự như phà tự hành GSP, xe bắc cầu cứng TMM - 3M, xe khắc phục vật cản IMR - 2M,… Trong đó, cụ thể trên xe phà tự hành GSP, van được dùng để điều khiển từ xa việc cấp dầu thủy lực vào các xy lanh công tác gồm xy lanh đóng mở phao, xy lanh nâng hạ vệt dẫn và xy lanh khóa vệt dẫn. Việc nghiên cứu, thiết kế, chế tạo van phân phối điện - thủy lực hai cấp dùng trên xe phà GSP nhằm làm chủ về công nghệ thiết kế, công nghệ chế tạo đáp ứng nhu cầu nội địa hóa vật tư thay thế. Bài báo này tập trung vào xây dựng mô hình động lực học van phân phối điện - thủy lực hai cấp, nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số kết cấu đến đặc tính động lực học của van. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để thiết kế, chế tạo van phân phối điện - thủy lực hai cấp trong thực tế.

Từ khóa: *Van phân phối điện - thủy lực; động lực học; lưu lượng; áp suất; mô hình toán.*

1. Đặt vấn đề

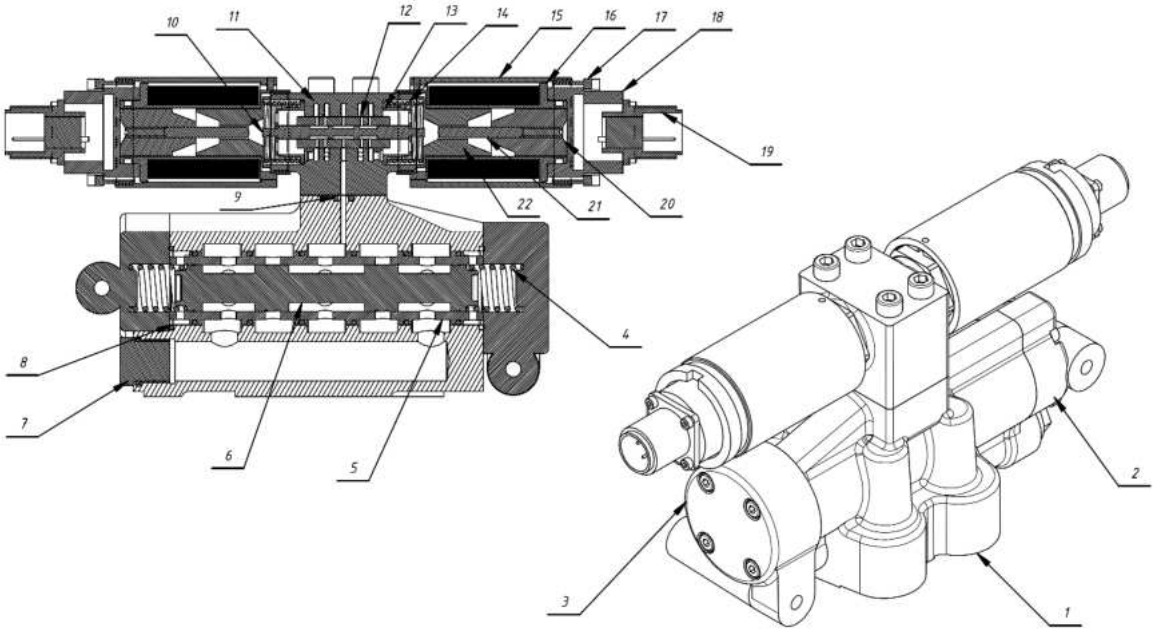
Hiện nay, đa phần các xe máy công binh thuần quân sự cũng như lưỡng dụng đều sử dụng hệ thống thủy lực để dẫn động các thiết bị công tác, điều khiển các quá trình di chuyển và vận hành của xe. Việc sử dụng hệ thống thủy lực dẫn động, trong đó có các van phân phối điện - thủy lực đem lại khả năng điều khiển nhẹ nhàng, chính xác, hiệu suất cao cho các xe máy công binh. Để đảm bảo lưu lượng thông qua lớn của dòng chất lỏng và các đặc tính động lực học tốt, việc sử dụng van phân phối điện - thủy lực hai cấp là cần thiết, đồng thời đảm bảo được kết cấu nhỏ gọn và dòng điện điều khiển nhỏ 1. Hiện nay, có một số lượng rất lớn các xe quân sự sử dụng loại van phân phối này, tuy nhiên chúng ta vẫn hoàn toàn phụ thuộc vào nguồn vật tư nhập khẩu. Xét trên mọi khía cạnh từ kinh tế cho đến quân sự, cũng như sự chủ động, tự chủ đảm bảo vật tư trong nước đều không đảm bảo. Do đó, việc nghiên cứu, thiết kế, chế tạo loại van này ở trong nước là thực sự cần thiết và cấp bách trong tình hình hiện nay.

Cấu tạo của van phân phối điện - thủy lực hai cấp bao gồm các thành phần van chính ở phía dưới và van phụ (van điện) ở phía trên, giữa hai van được liên kết bằng các bu lông và gioăng làm kín. Các bộ phận chính của van chính gồm thân van 1, con trượt van chính 6, ống lót van chính 5, các lò xo định tâm van chính 4. Các bộ phận chính của van phụ bao gồm: Thân bỏ van phụ 11, cụm cuộn điện từ, con trượt van phụ 10, ống lót van phụ 12, các lò xo van phụ 14.

Trong thân van chính và thân van điện có các đường dầu để kết nối với các đường bơm, đường hồi, đường công tác và đường điều khiển.

Nguyên lý hoạt động của van phân phối điện - thủy lực hai cấp như sau: Khi hệ thống thủy lực làm việc (bơm dầu làm việc), nếu ta bật công tắc điều khiển về vị trí mở hoặc gấp phao, vệt cầu. Lúc này sẽ có dòng điện đi vào nam châm điện của van phân phối, tạo thành lực từ hóa hút lõi thép và đẩy cho con trượt dịch chuyển. Khi con trượt nhỏ dịch chuyển sẽ mở thông đường dầu từ bơm tới một đầu con trượt của van chính. Nhờ áp lực của dầu đẩy con trượt của van chính dịch chuyển. Khi đó đường dầu đầu kia của con trượt được nối thông với thùng

dầu. Đồng thời mở đường dầu từ bơm tới một đầu của xy lanh thủy lực. Đầu kia của xy lanh thủy lực cũng được mở thông với thùng chứa. Lúc đó nhờ áp lực dầu tác động vào pít tông xy lanh thủy lực làm cho pít tông chuyển động để mở hoặc gấp phao, vệt cầu.



Hình 1. Cấu tạo van phân phối điện - thủy lực hai cấp dùng trên xe quân sự (được thiết kế)

1 - Thân vỏ van chính; 2 - Nắp vỏ van chính bên phải; 3 - Nắp vỏ van chính bên trái; 4 - Lò xo van chính; 5 - Ống lót van chính; 6 - Con trượt van chính; 7 - Nút bịt van chính; 8 - Phớt hai đầu van chính; 9 - Phớt ghép van chính; 10 - Con trượt van phụ; 11 - Thân vỏ van phụ; 12 - Ống bạc lót van phụ; 13 - Nắp chặn con trượt van phụ; 14 - Lò xo van phụ; 15 - Vỏ cuộn điện; 16 - Thân lõi cuộn điện; 17 - Nắp vặn; 18 - Đầu vỏ cuộn điện; 19 - Đầu giắc cắm; 20 - Lõi số 1; 21 - Ti đẩy; 22 - Lõi số 2

Khi đưa công tắc điều khiển về vị trí trung gian, dòng điện đi vào van điện từ bị ngắt. Nhờ có lò xo đẩy cho các con trượt về vị trí ban đầu làm cho các đường dầu qua van điện từ bị đóng lại. Lúc này, dù bơm dầu vẫn tiếp tục làm việc, song dầu không thể đi tới các xy lanh thủy lực được nữa.

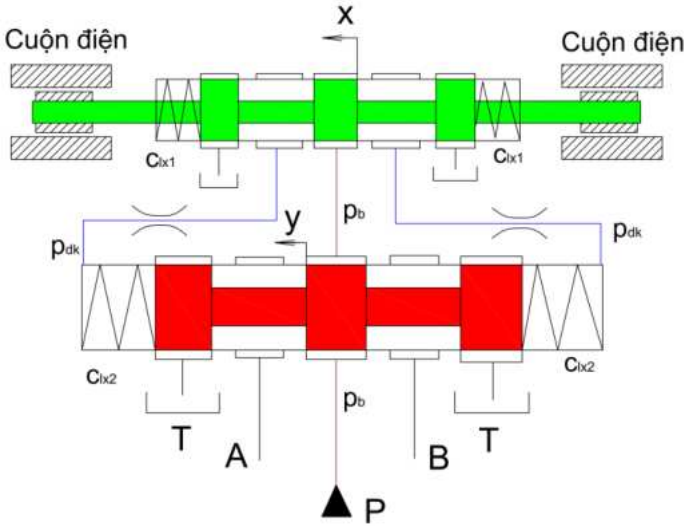
Nghiên cứu về động lực học loại van này đã có một số công trình nghiên cứu liên quan như: Trong nghiên cứu của Vũ Thị Thu 3, tác giả đã nghiên cứu đặc điểm kết cấu và nguyên lý làm việc của các loại van phân phối điện tỷ lệ, servo, trong đó tập trung vào nghiên cứu đặc tính làm việc của van phân phối điện tỷ lệ một cấp trong hệ thống thủy lực điều khiển vị trí. Tác giả Valery Tchkalov và cộng sự 4, đã mô hình hóa các van phân phối thủy lực trong môi trường Simhydraulics để nghiên cứu động lực học của van phân phối một cấp đơn giản, trong đó tập trung vào nghiên cứu các đặc tính tần số và quá trình quá độ. Tác giả Mingxing Han và cộng sự 5, đã nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đặc tính động lực của van phân phối có kết cấu chuyên dụng trong hệ thống thủy lực có lưu lượng rất lớn đến vài nghìn lít/phút và đòi hỏi phản ứng nhanh đến vài chục μs. Tác giả QingHui Yuan và cộng sự 6, đã xây dựng và nghiên cứu mô hình động lực học van phân phối điện - thủy lực hai cấp bốn cửa ba vị trí nhưng có thiết kế hai trục van song song tích hợp trong hệ thống thủy lực có điều khiển load-sensing.

2. Xây dựng mô hình động lực học van phân phối điện - thủy lực hai cấp

Khi xây dựng mô hình động lực van phân phối điện - thủy lực hai cấp, cần đưa vào một số giả thiết mà không làm ảnh hưởng đến kết quả nghiên cứu động lực học, cụ thể như sau:

- Hệ số lưu lượng tại các tiết lưu và các cửa công tác của van là không đổi;
- Bỏ qua rò rỉ chất lỏng công tác qua các khe hở hướng kính của các con trượt van;
- Áp suất đường dầu hồi không đổi và coi như bằng không.

Mô hình toán của van phân phối điện - thủy lực hai cấp được xây dựng trên cơ sở các phương trình lưu lượng dầu thủy lực qua các tiết lưu, phương trình liên tục của dòng dầu, phương trình trạng thái của dầu thủy lực và các phương trình cơ học chuyển động của các con trượt 2.



Hình 2. Mô hình tính toán van phân phối điện - thủy lực hai cấp

Phương trình điện áp trong mạch điều khiển van:

$$U_{dk} = R_{dk} i_{dk} + L_{dk} \frac{di_{dk}}{dt} + C \frac{dx}{dt} \tag{1}$$

Ở đây, U_{dk} - Điện áp điều khiển; R_{dk} - Điện trở của cuộn điện; L_{dk} - Điện cảm của cuộn điện; C - hệ số cản; x - dịch chuyển của ty đẩy cuộn điện.

Phương trình lưu lượng dòng dầu trong tầng điều khiển:

$$Q_{dk} = F_c \frac{dy}{dt} + k_n \frac{dp_{dk}}{dt} \tag{2}$$

Ở đây, Q_{dk} - Lưu lượng dòng dầu điều khiển con trượt chính, F_c - Tiết diện mặt đầu của con trượt chính, y - Dịch chuyển của con trượt chính, k_n - Hệ số nén của dầu trong khoang điều khiển của van chính, p_{dk} - Áp suất dầu trong khoang điều khiển của van chính.

Lưu lượng điều khiển được xác định theo phương trình sau:

$$Q_{dk} = \mu_{dk} \pi d_{dk} x \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_b - p_{dk}|} sign(p_b - p_{dk}) \tag{3}$$

Ở đây, $k_{dk} = \mu_{dk}\pi d_{dk}x\sqrt{\frac{2}{\rho}}$ - Khả năng thông qua của van điện điều khiển; μ_{dk} - Hệ số lưu lượng qua van điều khiển điện; d_{dk} - Đường kính con trượt van điện điều khiển; p_b - Áp suất bơm; ρ - Khối lượng riêng của dầu thủy lực.

Phương trình chuyển động của con trượt van điện:

$$m_{c1}\frac{d^2x}{dt^2} + k_{ms1}\frac{dx}{dt} + c_{lx1}x + R_1 = P_{el} \quad (4)$$

Ở đây, m_{c1} - Khối lượng con trượt van điện; k_{ms1} - Hệ số ma sát ướt trong khe hở giữa con trượt van điện và ống lót van điện; R_1 - Lực cản thủy động; c_{lx1} - Độ cứng lò xo van điện; P_{el} - lực đẩy của cuộn điện từ.

Lực điện từ:

$$P_{el} = k_i i \quad (5)$$

Ở đây i - cường độ dòng điện trong cuộn dây điều khiển; k_i - hệ số sức điện động.

Phương trình chuyển động của con trượt van chính có dạng tương tự như đối với van điện, thành phần lực điện từ được thay thế bằng lực do áp suất dòng dầu trong khoang điều khiển tạo ra, lực này được tính toán như sau:

$$P_{dk} = p_{dk}F_c \quad (6)$$

Lưu lượng qua van chính được xác định như sau:

$$Q_v = \mu_v\pi d_v y\sqrt{\frac{2}{\rho}|p_b - p_{xl}|}sign(p_b - p_{xl}) \quad (7)$$

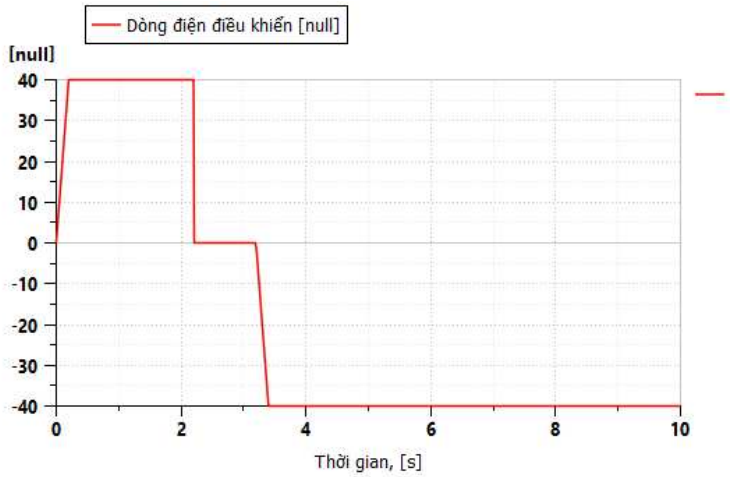
Ở đây, μ_v - Hệ số lưu lượng của cửa ống lót van chính; d_v - Đường kính con trượt van chính; y - Dịch chuyển của con trượt van chính; p_b - Áp suất bơm; p_{xl} - Áp suất trong xy lanh công tác.

Nghiên cứu động lực học van phân phối điện - thủy lực hai cấp được thực hiện bằng phương pháp mô phỏng số trên phần mềm chuyên dụng LMS Amesim. Trong đó các phần tử điện và cơ khí của van phân phối điện - thủy lực hai cấp được mô hình hóa cụ thể, đảm bảo việc nghiên cứu được đầy đủ các đặc tính động lực học của van.

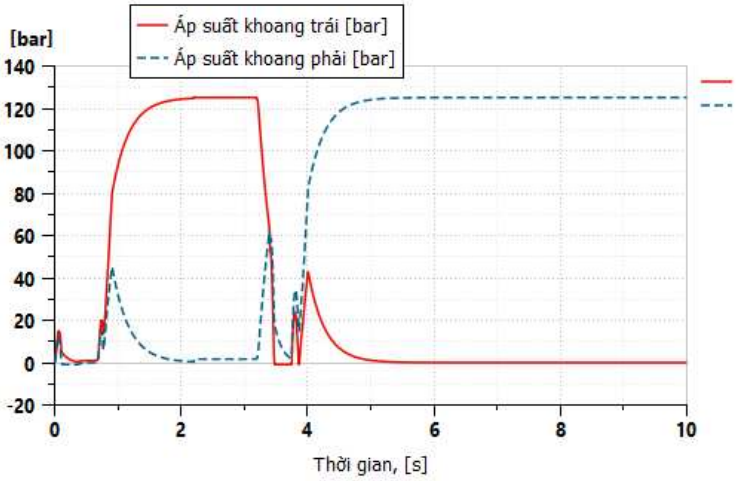
3. Thông số đầu vào và kết quả khảo sát

Để phục vụ nghiên cứu động lực học Van phân phối điện - thủy lực hai cấp bao gồm các thông số kết cấu và thông số làm việc của van như sau:

- Đường kính con trượt van chính, mm: 18;
- Khối lượng con trượt van chính, kg: 0,131;
- Chiều dài lò xo van chính ở trạng thái tự do, mm: 20;
- Hệ số lưu lượng: 0,65;
- Áp suất làm việc của hệ thống, bar: 125.



Hình 3. Dòng điện cấp vào van điện

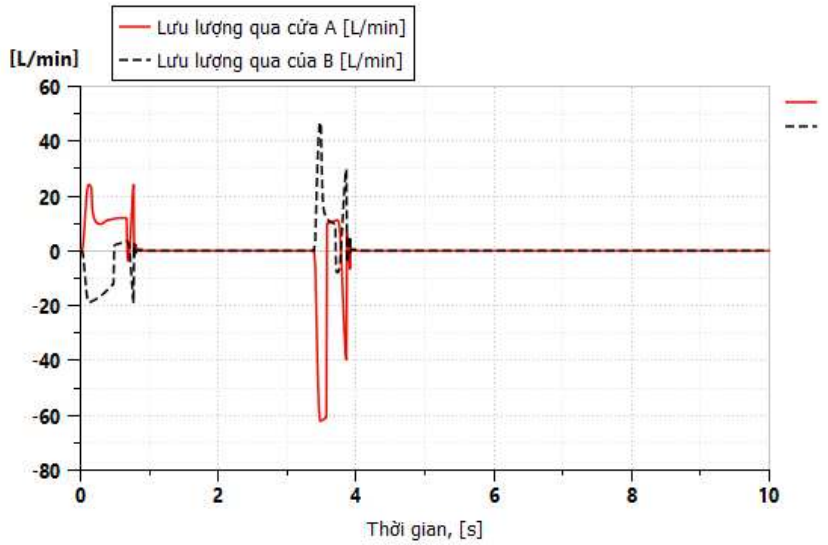


Hình 4. Áp suất điều khiển van chính

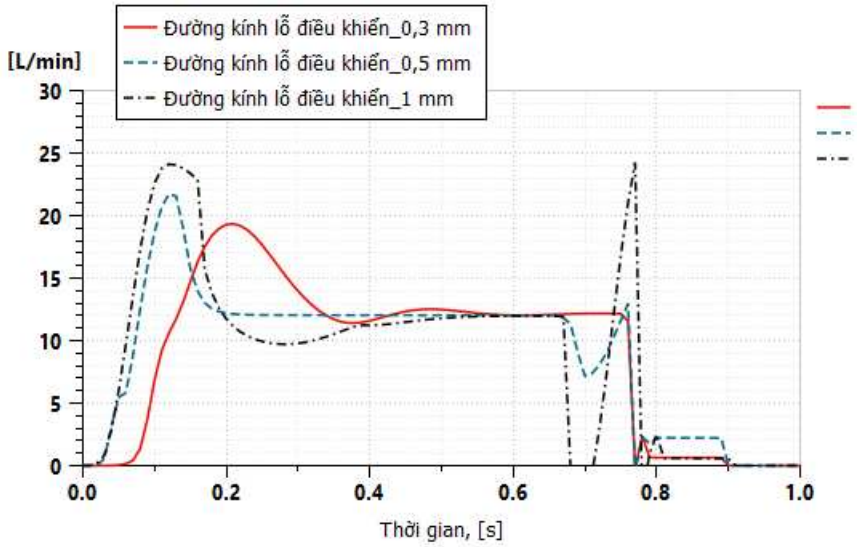
Nghiên cứu động lực học van phân phối thủy lực hai cấp được thực hiện để đánh giá đặc tính động lực học của van trong hai trường hợp bao gồm ảnh hưởng các thông số kết cấu van như đường kính lỗ dầu điều khiển và độ cứng của lò xo van chính đến khả năng làm việc của van.

Trong trường hợp thứ nhất, nghiên cứu ảnh hưởng của đường kính lỗ điều khiển đến khả năng làm việc và độ trễ điều khiển của van phân phối. Nghiên cứu được thực hiện trong điều kiện áp suất hệ thống là 125 bar tương tự như trên hệ thống thủy lực dẫn động của xe phà GSP, độ cứng lò xo van chính c_{lx2} = 50 N/mm, đường kính lỗ điều khiển 1 mm.

Khi cấp điện vào lần lượt hai cuộn điện của van điện để đảo chiều dòng dầu cấp vào hệ thống (Hình 3, Hình 4, Hình 5), quy luật biến thiên giá trị áp suất điều khiển đã có sự thay đổi tương ứng. Sau thời điểm 1s, áp suất điều khiển vẫn duy trì, tuy nhiên xy lanh đã đi hết hành trình nên lưu lượng đi vào hệ thống bằng 0.

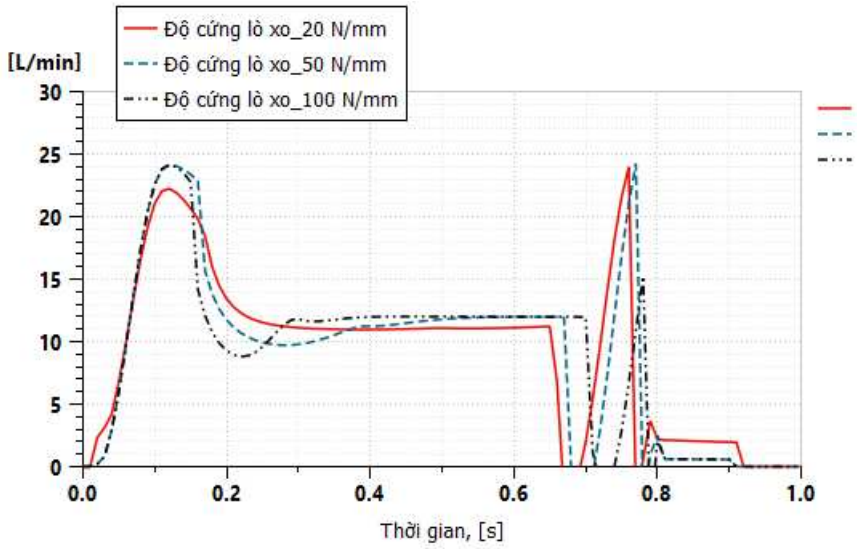


Hình 5. Lưu lượng qua van phân phối



Hình 6. Độ trễ lưu lượng theo đường kính lỗ điều khiển

Theo Hình 6, khi tăng đường kính của lỗ điều khiển độ trễ điều khiển của van đã giảm đi, với đường kính lỗ 1 mm đã đảm bảo độ trễ điều khiển 0,1 s. Nếu tăng đường kính lỗ điều khiển quá lớn sẽ ảnh hưởng đến kết cấu và nguyên lý làm việc của van, còn nếu để đường kính lỗ điều khiển quá nhỏ sẽ ảnh hưởng đến tính điều khiển và rất khó gia công. Vì vậy, với kết cấu nhỏ gọn của van và trình độ công nghệ chế tạo trong nước, việc chọn đường kính lỗ điều khiển 1 mm đảm bảo yêu cầu đặt ra.



Hình 7. Lưu lượng đi vào hệ thống theo độ cứng lò xo van chính

Theo Hình 7, khi thay đổi độ cứng của lò xo van chính c_{lx2} = 20, 50, 100 N/mm, lưu lượng cấp qua van đi vào hệ thống không bị thay đổi quá nhiều. Các đặc tính về điều khiển vẫn được đảm bảo cả về thời gian quá độ và giá trị lưu lượng ở trạng thái ổn định. Do đó, lò xo van chính chỉ đóng vai trò định tâm con trượt van chính ở vị trí trung gian, độ cứng lò xo không làm ảnh hưởng đến đặc tính lưu lượng qua van phân phối cấp vào hệ thống.

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng mô hình tính toán van phân phối điện - thủy lực hai cấp, xây dựng các phương trình vi phân mô tả động lực học van. Đã khảo sát các đặc tính động lực học của van phân phối điện - thủy lực hai cấp thông qua mô hình mô phỏng được xây dựng trong môi trường LMS Amesim. Kết quả nghiên cứu thể hiện: Với đường kính lỗ điều khiển 1 mm đảm bảo tính điều khiển cho van và tính công nghệ phù hợp với kích thước của van và trình độ công nghệ chế tạo trong nước, còn với độ cứng của lò xo van chính, sự ảnh hưởng đến đặc tính làm việc của van là không đáng kể (khi đường kính lỗ điều khiển 1 mm). Với các kết quả nghiên cứu đạt được, nội dung nghiên cứu là cơ sở quan trọng để chế tạo van phân phối điện - thủy lực hai cấp đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật tương đương với sản phẩm ngoại nhập.

Các yếu tố cần tiếp tục nghiên cứu đối với van phân phối điện - thủy lực hai cấp loại này bao gồm: Áp suất, lưu lượng làm việc của hệ thống, độ đóng của các van điện và van chính, cũng như rất nhiều các thông số kết cấu và làm việc khác… ảnh hưởng đến khả năng làm việc của van như thế nào. Đây là những vấn đề sẽ được nhóm tác giả thực hiện trong thời gian tới để hoàn thiện mẫu van đã chế thử này.

Tài liệu tham khảo

1. Trần Quang Hùng, Đỗ Doãn Phi, Lê Trọng Cường, Trần Hữu Lý. (2013). *Truyền động thủy lực trên Xe máy Công binh*. Học viện Kỹ thuật quân sự.
2. Bùi Hải Triều, Nguyễn Đình Tùng. (2017). *Truyền động và điều khiển thủy lực ứng dụng*, NXB Khoa học và kỹ thuật.
3. Vũ Thị Thu. (2016). *Đề tài cấp trường: Nghiên cứu ứng dụng các loại van tỷ lệ trong hệ điều khiển vị trí,* Đại học Hàng hải Việt Nam.

4. V. Tchkalov and S. Miller. (2014). *Parameterization of directional and proportional valves in simhydraulics,* Mathworks Inc., Natick, MA, USA, Tech. Rep., pp. 1–30.
5. Mingxing Han, Yinshui Liu, Kan Zheng, Youchun Ding and Defa Wu. (2020). *Investigation on the modeling and dynamic characteristics of a fast-response and large-flow water hydraulic proportional cartridge valve,* Journal of Mechanical Engineering Science. DOI: 10.1177/0954406220922860.
6. QingHui Yuan and Jae Y. Lew. (2005). *Modeling and Control of Two Stage Twin Spool Servo-Valve for Energy-Saving,* American Control Conference, USA, pp. 4363-4368.

Study on the influence of structural parameters on the dynamic characteristics of two-stage electrohydraulic direction valves used on military vehicles

Abstract: *The two-stage electro-hydraulic direction valve is used on some military vehicles such as the GSP self-propelled machine, the TMM-3M bridge vehicle, the IMR-2M obstacle clearance vehicle, etc. Specifically, on the GSP self-propelled machine, the valve is used to remotely control the supply of hydraulic oil to the working cylinders including opening and closing the float cylinder, the guideway lifting and lowering cylinder, and the guideway locking cylinder. The research, design and manufacture of the two-stage electro-hydraulic direction valve used on the GSP machine aims to master the design technology and manufacturing technology to meet the needs of localizing replacement materials. This paper focuses on building a dynamic model of the two-stage electro-hydraulic direction valve, studying the influence of structural parameters on the dynamic characteristics of the valve. The research results are the basis for designing and manufacturing the two-stage electro-hydraulic direction valve in practice.*

Keywords: Electro-hydraulic direction valve, dynamics, flow, pressure, mathematical modeling.

❑

Nghiên cứu khả năng của một số thuật toán điều khiển bám quỹ đạo cho xe tự hành có hệ thống lái Ackerman và cảm biến LiDAR

Mai Viết Vượng[1], Vũ Ngọc Tuấn[2], Nguyễn Đình Dũng[3]

[1] Hệ quản lý học viên sau đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2] Viện Cơ khí Động Lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2] Khoa Hàng không Vũ trụ, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[1]Email: mvvuong292@gmail.com, Contact number: 0978133156

Tóm tắt

Bài báo khảo sát và so sánh khả năng ứng dụng một số thuật toán điều khiển bám quỹ đạo chuyển động cho trước của xe tự hành (UGV) có trang bị hệ thống lái Ackerman và cảm biến LiDAR dựa trên nền tảng ROS2. Hệ thống lái Ackermann được sử dụng phổ biến trên ô tô, có ràng buộc động học phức tạp hơn các hệ thống lái khác. Trên nền tảng ROS2 hiện tại hỗ trợ một số thuật toán điều khiển báo quỹ đạo chuyển động cho trước như Regulated Pure Pursuit, Vector Pursuit, và Model Predictive Path Integral (MPPI). Những phương pháp này sẽ được đánh giá dựa trên các tiêu chí quan trọng bao gồm khả năng bám theo quỹ đạo định trước, độ ổn định lái, khả năng tránh vật cản, khả năng di chuyển trong không gian hẹp, hiệu suất tính toán,... Kết quả khảo sát giúp xác định ưu, nhược điểm của từng thuật toán trong các dạng môi trường điều khiển UGV khác nhau, làm cơ sở lựa chọn kỹ thuật phù hợp cho từng bài toán thiết kế xe tự hành dùng cảm biến LiDAR cụ thể.

Từ khoá: *UGV; LiDAR; bám quỹ đạo; Ackermann; ROS2; Regulated Pure Pursuit; Vector Pursuit; Model Predictive Path Integral.*

1. Đặt vấn đề

Trên xe tự hành (UGV) hiện nay sử dụng hệ thống lái Ackermann cho phép giảm mòn lốp, đảm bảo xe di chuyển ổn định. Cảm biến LIDAR (Light Detection and Ranging) được tích hợp hỗ trợ nhận diện vật cản trong môi trường xung quanh, làm cơ sở để thực hiện điều hướng cho xe tự hành. Trên nền tảng ROS2, các thuật toán như Regulated Pure Pursuit, Vector Pursuit, Model Predictive Path Integral (MPPI) đáp ứng được yêu cầu động học của hệ thống lái Ackermann. Các công trình nghiên cứu hiện tại cũng như ROS2 Official đã nêu ra ưu, nhược điểm của từng thuật toán và so sánh hiệu quả của từng thuật toán đối với thuật toán điều khiển Pure Pursuit trên các điều kiện thử nghiệm khác nhau. Bài báo này tập trung đánh giá và so sánh hiệu suất của các thuật toán này trên một khung tham chiếu chung, với các kịch bản thực tế, làm cơ sở lựa chọn giải pháp điều khiển phù hợp cho từng ứng dụng cụ thể.

2. Cảm biến LiDAR

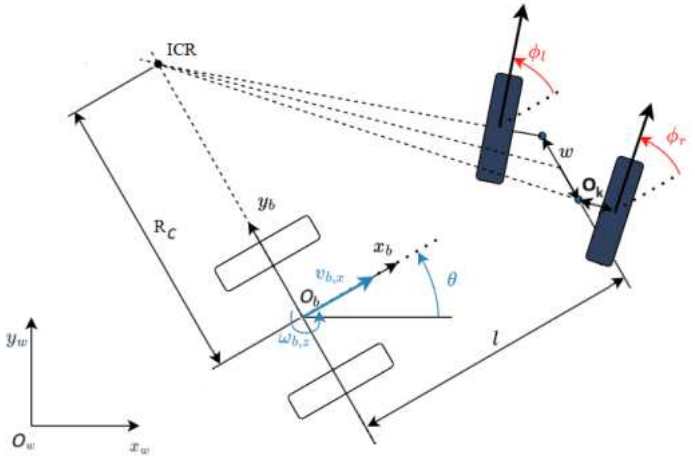
Cảm biến LiDAR đóng vai trò quan trọng, cung cấp khả năng quét và xây dựng bản đồ môi trường xung quanh với độ chính xác cao. Cảm biến LiDAR hoạt động bằng cách phát ra các xung laser, đo thời gian phản xạ của chúng từ vật thể quay trở lại cảm biến để xác định khoảng cách tới vật thể chắn tia laser và lập bản đồ đám mây điểm phản xạ [1]. Khoảng cách R từ vị trí phát xung đến vật thể có thể xác định theo (1):

$$R = c.\Delta t/(2.n) \qquad (1)$$

Với c là vận tốc ánh sáng (m/s); Δt là thời gian di chuyển của tia laser (giây); n là chiết suất môi trường.

3. Mô hình toán của UGV có hệ thống lái Ackermann

Mô hình động học quay vòng của UGV trong mặt phẳng được xây dựng dựa theo [2, 3]. Sơ đồ động học quay vòng (Hình 1.1) là cơ sở để xác định các thông số động học quay vòng và quỹ đạo chuyển động của UGV.



Hình 1. Sơ đồ động học quay vòng của UGV

* Khi biết vận tốc dài $v_{b,x}$ và vận tốc góc $\omega_{b,z}$ của UGV, bán kính tính toán có thể xác định theo công thức (2):

$$R_c = \frac{v_{b,x}}{w_{b,z}} \tag{2}$$

Do hệ thống lái đảm bảo theo cơ chế Ackermann nên ta xác định được góc quay bánh xe bên trái và bên phải theo công thức (3) và (4):

$$\phi_l = arctan\left(\frac{l}{R_c - w/2}\right) \tag{3}$$

$$\phi_r = arctan\left(\frac{l}{R_c + w/2}\right) \tag{4}$$

* Mặt khác, khi biết góc quay của bánh xe bên trái (hoặc bánh xe bên phải), ta xác định được bán kính tính toán của UGV theo **Error! Reference source not found.** hoặc **Error! Reference source not found.**:

$$R_c = \frac{l}{tan\phi_l} + w/2 \tag{5}$$

$$R_c = \frac{l}{tan\phi_r} - w/2 \tag{6}$$

Khi biết vận góc $w_{t,y}$ của bánh chủ động UGV (quay quanh trục cầu xe), ta xác định được vận tốc dài của bánh chủ động UGV theo :

$$v_{b,x} = w_{t,y}.r_d \tag{7}$$

Khi đó, vận tốc dài $v_{b,xw}, v_{b,yw}$ (lần lượt theo phương x_w, y_w) và vận tốc góc $\omega_{b,z}$ của UGV trong hệ trục toạ độ môi trường được xác định theo (8), (9) và (10):

$$\dot{v}_{b,xw} = v_{b,x}.cos\theta \tag{8}$$

$$\dot{v}_{b,yw} = v_{b,x}.sin\theta \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_{b,x}}{R_c} \quad (10)$$

Trong khoảng thời gian rất nhỏ dt, chuyển vị của UGV trong hệ trục toạ độ môi trường là θ, x_{pos}, y_{pos} xác định theo:

$$\theta = \dot{\theta}.dt \quad (11)$$

$$x_{pos} = \dot{v}_{b,xw}.dt = v_{b,x}.cos\theta.dt \quad (12)$$

$$y_{pos} = \dot{v}_{b,yw}.dt = v_{b,x}.sin\theta.dt \quad (13)$$

Hướng của UGV trong mặt phẳng Ox_wy_w được xác định theo góc quay quaternion để tránh gimbal lock [4] trong công thức (14):

$$\begin{cases} quaternion.x = 0 \\ quaternion.y = 0 \\ quaternion.z = sin(\theta/2) \\ quaternion.w = cos(\theta/2) \end{cases} \quad (14)$$

4. Một số thuật toán điều khiển bám quỹ đạo cho xe tự hành có hệ thống lái Ackermann và cảm biến LiDAR

4.1. Thông số kỹ thuật của mô hình khảo sát

Các thông số kỹ thuật của mô hình khảo sát trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật mô hình khảo sát trong mô phỏng Gazebo

STT	Thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Kích thước bao xe: Dài x rộng x cao	 0.37 x 0.29 x 0.20	 m x m x m
2	Chiều dài cơ sở	0.25	m
3	Chiều rộng cơ sở (lấy chiều rộng cơ sở bánh trước bằng chiều rộng cơ sở bánh sau)	0.15	m
4	Bán kính bánh xe	0.06	m
5	Bán kính quay vòng nhỏ nhất	0.30	m
6	Vận tốc nhỏ nhất - vận tốc lớn nhất	1.0 - 10.0	m/s
7	Vận tốc kỳ vọng	6.0	m/s
8	Chiều rộng hành lang di chuyển	1.0	m
9	Kích thước vật cản lập phương (Chiều dài cạnh)	0.25	m

4.2. Thuật toán Regulated Pure Pursuit

Thuật toán Regulated Pure Pursuit dựa trên phương pháp hình học để bám quỹ đạo (path tracking) trong hệ thống robot di động và UGV. Regulated Pure Pursuit cải tiến từ thuật toán Pure Pursuit, một kỹ thuật dựa trên việc xác định một "*điểm mục tiêu*" [5] trên quỹ đạo và tính toán góc quay lái và vận tốc để đưa UGV hướng về điểm này. Phiên bản Regulated được tối ưu hóa với các cơ chế điều chỉnh, như kiểm soát vận tốc theo độ cong của quỹ đạo, giới hạn góc quay và quản lý điểm mục tiêu động theo tốc độ hiện tại. Điều này

giúp giảm thiểu hiện tượng dao động, tăng độ mượt mà và ổn định khi UGV di chuyển trên các bề mặt không đồng đều hoặc trong môi trường phức tạp. Thuật toán Regulated Pure Pursuit điều chỉnh vận tốc UGV dựa trên hai cơ chế chính [6]:

- Tối ưu hoá theo độ cong: Giảm vận tốc v_t' khi gặp đường cong gắt hoặc góc khuất bằng công thức:

$$v'_t = \begin{cases} v_t.K, & Khi\ K > T_k \\ \dfrac{v_t}{r_{min}}, & Khi\ K \le T_k \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó, K là độ cong quỹ đạo tức thời (xác định bằng hai lần tỉ số giữa toạ độ theo phương ngang của *"điểm mục tiêu"* so với khoảng cách từ UGV đến *"điểm mục tiêu"*), T_k là ngưỡng độ cong điều chỉnh vận tốc, r_{min} là bán kính nhỏ nhất để áp dụng tối ưu hoá độ cong.

- Tối ưu hoá theo khoảng cách: Giảm vận tốc v_t' khi UGV gần vật cản theo công thức:

$$v'_t = v_t.\frac{d_o}{\alpha.d_{prox}} \quad (16)$$

Trong đó, d_o là khoảng cách tức thời đến vật cản, d_{prox} là ngưỡng khoảng cách an toàn đến vật cản, α là hệ số điều chỉnh.

Cuối cùng, vận tốc góc ω_t xác định theo vận tốc tuyến tính và độ cong như sau:

$$\omega_t = v'_t.K \quad (17)$$

4.3. Thuật toán Vector Pursuit

Tương tự như Regulated Pure Pursuit, thuật toán Vector Pursuit là một biến thể cải tiến của Pure Pursuit. Vector Pursuit sử dụng các đại lượng vector để mô tả và điều hướng quỹ đạo. Phương pháp này không chỉ xem xét khoảng cách mà còn tính đến sự định hướng giữa UGV và quỹ đạo, giúp điều chỉnh vận tốc và góc lái một cách linh hoạt. Vector Pursuit sử dụng lý thuyết vít [7] (screw theory) để xác định chuyển động mong muốn của UGV. Theo lý thuyết vít, một vít $\$ có dạng: $\$ = [\vec{S}; \overrightarrow{S_0} + h.\vec{S}]$. Trong đó, $\vec{S}$ mô tả hướng của vít trong không gian, $\overrightarrow{S_0}$ mô tả vị trí của vít, h là bước ren biển diễn quan hệ tỉ lệ giữa chuyển động quay và chuyển động tịnh tiến.

Dựa vào đó, thuật toán Vector Pursuit thực hiện qua các bước chính:

* Tính toán vít tức thời:

- Tính toán vít tức thời $\$_t$ mô tả dịch chuyển tịnh tiến cần thiết từ vị trí hiện tại đến *"điểm mục tiêu"*.

- Tính toán vít tức thời $\$_r$ mô tả sự quay cần thiết từ định hướng hiện tại sang định hướng mong muốn tại *"điểm mục tiêu"*.

* Kết hợp các vít tức thời: Sử dụng tính chất cộng của vít để tạo ra vít tức thời tổng hợp $\$_d$, mô tả chuyển động mong muốn tức thời của UGV.

4.4. Thuật toán Model Predictive Path Integral

Model Predictive Path Integral Control (MPPI) là một thuật toán bám quỹ đạo theo kiểu mô hình điều khiển dự bảo (Model Predictive Control - MPC). Thuật toán này được

thiết kế để điều khiển các hệ thống phi tuyến chịu ảnh hưởng bởi nhiễu, tối ưu hóa quỹ đạo chuyển động trong thời gian thực dựa trên hàm chi phí. MPPI tối ưu hóa dãy điều khiển sao cho hành vi của hệ thống đạt được tối ưu với chi phí thấp nhất, đồng nghĩa với việc bám sát quỹ đạo đưa ra nhất. Thuật toán MPPI có thể mô tả theo Hình 2 [8]. Trong đó, K là số mẫu; N là số bước; $(u_0, u_1, .., u_{N-1})$ là bộ giá trị điều khiển ban đầu; $\Delta t, x_{t0}, F, G, B, B_E$ là các thông số động học của hệ thống; $\emptyset, q, R, \lambda$ là các thông số chi phí; u_{init} là giá trị để khởi tạo điều khiển mới.

while *Nhiệm vụ chưa hoàn thành* **do**
  for $k \leftarrow 0$ **to** $K-1$ **do**
    $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{t_0}$;
    for $i \leftarrow 1$ **to** $N-1$ **do**
      $\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + (\mathbf{f} + \mathbf{G}\mathbf{u}_i)\Delta t + \mathbf{B}_E \epsilon_{i,k}\sqrt{\Delta t}$;
      $\tilde{S}(\tau_k) = \tilde{S}(\tau_k) + \tilde{q}(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i, \epsilon_{i,k}, t_i)$;
  for $i \leftarrow 0$ **to** $N-1$ **do**
    $\mathbf{u}_i =$
    $\mathbf{u}_i + \mathcal{H}^{-1}\mathcal{G}\left[\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{\exp\left(-\frac{1}{\lambda}\tilde{S}(\tau_k)\right)\frac{\epsilon_{i,k}}{\sqrt{\Delta t}}}{\sum_{k=1}^{K}\exp\left(-\frac{1}{\lambda}\tilde{S}(\tau_k)\right)}\right)\right]$;
  Gửi tới cơ cấu chấp hành $(\mathbf{u}_0)$;
  for $i \leftarrow 0$ **to** $N-2$ **do**
    $\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i+1}$;
  $\mathbf{u}_{N-1} = \mathbf{u}_{\text{init}}$
  Cập nhật trạng thái hiện tại sau khi có phản hồi;
  Kiểm tra xem hoàn thành nhiệm vụ chưa;

Hình 2. Thuật toán MPPI

5. Khảo sát và so sánh khả năng ứng dụng một số thuật toán điều khiển bám quỹ đạo dựa trên nền tảng ROS2 với một số dạng bản đồ có chướng ngại vật tĩnh

5.1. Giả thiết

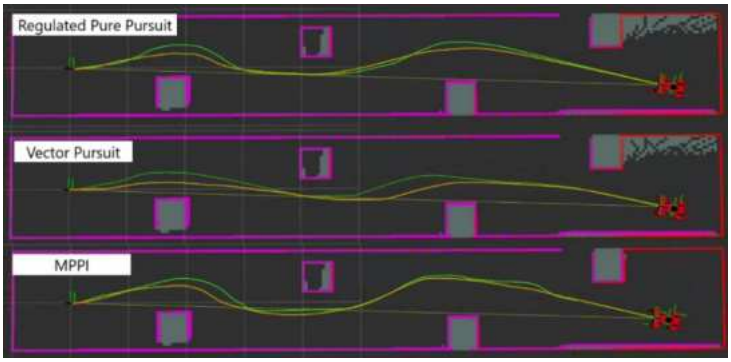
- Mô hình UGV có công thức bánh xe 4x2, dẫn động cầu sau, sử dụng hệ thống lái Ackermann cầu trước;

- Mô hình UGV có bán kính an toàn là *0,25 m*, được xác định theo khoảng cách từ tâm hình học của UGV đến điểm xa nhất trên thân xe trong mặt phẳng ngang song song với mặt đường;

- Thiết lập tham số: yêu cầu về vận tốc lớn nhất, vận tốc nhỏ nhất, vận tốc khi gặp vật cản, khoảng cách an toàn,… được đặt như nhau ở cả ba thuật toán;

- Sử dụng môi trường mô phỏng Gazebo để xây dựng bản đồ, xây dựng mô hình UGV tích hợp LiDAR và mô phỏng điều khiển, quan sát kết quả bằng Rviz2.

5.2. Điều kiện đường hẹp



Hình 3. Quỹ đạo của UGV khi sử dụng các thuật toán khác nhau

Điều kiện đường hẹp được thiết kế để UGV phải di chuyển trong không gian hẹp và đổi

hướng liên tục với biên độ nhỏ. Điều kiện này cho phép đánh giá thuật toán về khả năng bám đường, khả năng bảo đảm tránh va chạm, khả năng duy trì vận tốc trung bình lớn cho UGV.

Khả năng bám quỹ đạo của từng thuật toán điều khiển thể hiện trên Hình 3. Trong đó, đường màu xanh thể hiện quỹ đạo tính toán do hệ thống điều hướng Nav2 của ROS2 xuất ra, đường màu vàng thể hiện quỹ đạo thực tế mà UGV di chuyển.

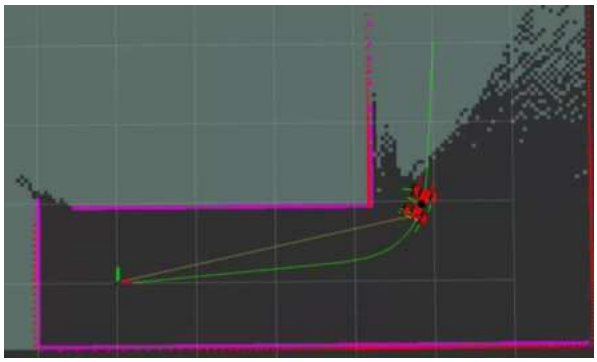
Một số thông số định lượng đánh giá khả năng bám quỹ đạo và bảo đảm an toàn khi di chuyển gần vật cản được thể hiện trên Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả khảo sát UGV trong điều kiện đường hẹp

STT	Tiêu chí	Thuật toán		
		Regulated Pure Pursuit	**Vector Pursuit**	**MPPI**
1	Độ lệch trung bình giữa quỹ đạo thực tế và quỹ đạo tính toán (mm)	60,4	71,2	40,3
2	Khoảng cách nhỏ nhất tới vận cản (mm)	35,6	24,7	30,1
3	Va chạm	Không	Không	Không
4	Vận tốc trung bình (m/s)	4,3	4,6	5,7

5.3. Điều kiện quay vòng mù

Điều kiện quay vòng mù là một đoạn đường hẹp gấp khúc 90^0 mà đoạn đường sau khúc của chưa được biết trước, ngay sau khúc cua là vật cản tĩnh (Hình 4). Lúc này UGV phải tránh một vật cản bất ngờ và xử lý tình huống trong thời gian rất nhỏ. Điều kiện này cho phép đánh giá hiệu suất các thuật toán về khả năng bảo đảm an toàn trước vật cản bất ngờ.



Hình 4. Điều kiện quay vòng mù

Kết quả khảo sát UGV theo điều kiện quay vòng mù thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả khảo sát UGV theo điều kiện quay vòng mù

STT	Tiêu chí	Thuật toán		
		Regulated Pure Pursuit	**Vector Pursuit**	**MPPI**
	Khoảng cách dừng khi phát hiện vật cản bất ngờ (mm)	72,3	65,7	91,5
	Va chạm (mm)	Không	Không	Không

5.4. Điều kiện đường rộng, thay đổi quỹ đạo liên tục

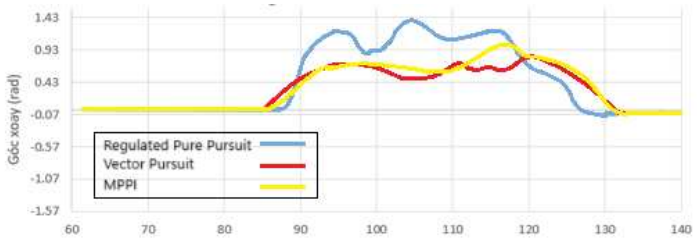
Điều kiện đường rộng, thay đổi quỹ đạo liên tục là không gian rộng, gồm nhiều vùng mù chưa biết trước cho phép UGV di chuyển với góc đánh lái rộng, giúp hạn chế dao động do lắc thân xe quanh trục thẳng đứng. Đồng thời, yêu cầu UGV phải thay đổi quỹ đạo mỗi khi gặp một vật cản mới trên đường di chuyển. Điều kiện này đánh giá khả năng bám quỹ đạo, khả năng di chuyển ổn định (ít dao động) và khả năng phản ứng của UGV khi phải thay đổi quỹ đạo liên tục.

Khả năng bám quỹ đạo của từng thuật toán điều khiển thể hiện trên Bảng 4. Trong đó, đường màu xanh thể hiện quỹ đạo tính toán do hệ thống điều hướng Nav2 của ROS2 xuất ra, đường màu vàng thể hiện quỹ đạo thực tế mà UGV di chuyển.

Bảng 4. Kết quả khảo sát UGV trong điều kiện đường rộng, thay đổi quỹ đạo liên tục

STT	Tiêu chí	Thuật toán		
		Regulated Pure Pursuit	**Vector Pursuit**	**MPPI**
	Độ lệch trung bình giữa quỹ đạo thực tế và quỹ đạo tính toán (mm)	84,1	79,9	48,4
	Khoảng cách nhỏ nhất tới vận cản (mm)	38,3	41,5	39,6
	Va chạm	Không	Không	Không
	Vận tốc trung bình (m/s)	3,8	4,2	5,4

Sự thay đổi góc xoay thân xe quanh trục thẳng đứng trong quá trình di chuyển thể hiện trên đồ thị Hình 5. Các đoạn góc quay thân xe không đổi cho thấy xe chuyển động thẳng hoặc đang quay vòng đều. Sự biến thiên của góc quay thân xe càng mạnh trong khoảng thời gian càng nhỏ cho thấy dao động và bất ổn định thân xe càng lớn.



Hình 5. Biến thiên góc quay thân xe quanh trục thẳng đứng theo thời gian

6. Kết luận

Kết quả khảo sát của bài báo cho thấy ưu, nhược điểm về hiệu suất của các thuật toán bám quỹ đạo sử dụng phổ biến trên nền tảng ROS2. Từ các khảo sát nhận thấy thuật toán MPPI là thuật toán tối ưu nhất trên mọi phương diện điều khiển. Tuy nhiên, thuật toán này đòi hỏi tài nguyên phần cứng lớn để có thể xử lý khối lượng tính toán mẫu lớn. Trong trường hợp cần tối ưu chi phí chế tạo, ta có thể cân nhắc sử dụng hai thuật toán còn lại.

Regulated Pure Pursuit sẽ là lựa chọn tốt hơn Vector Pursuit ở yêu cầu bám quỹ đạo khi đặt trong điều kiện quỹ đạo đơn giản, đổi hướng với biên độ nhỏ. Không chỉ vậy Regulated Pure Pursuit cũng cho phép duy trì khoảng cách an toàn lớn hơn khi di chuyển qua các vật cản và dừng sớm trước vật cản bất ngờ hơn so với Vector Pursuit. Trong khi đó, Vector Pursuit thể hiện tốt hơn ở khả năng duy trì vận tốc trung bình cao và bám quỹ đạo tốt hơn khi đặt trong điều kiện

quỹ đạo phức tạp, biên độ góc hướng lớn. Ngoài ra, Vector pursuit cũng cho phép ổn định thân xe hơn, điều này dễ thấy bởi đường màu đỏ trên đồ thị Hình 6, tại các vùng biến thiên đều có độ dốc nhỏ hơn tại các vùng biến thiên tương ứng trên đường màu xanh. Điều này là do Vector pursuit tính toán vector điều hướng cho toàn quỹ đạo thay vì chỉ tập trung vào *"điểm mục tiêu"*.

Như vậy, bài báo đã khảo sát ba thuật toán phổ biến sử dụng trên ROS2 cho UGV có hệ thống lái Ackermann trong các tình huống cụ thể, đưa ra được ưu, nhược điểm của từng thuật toán trong từng điều kiện đường và yêu cầu khác nhau. Đây là cơ sở để người dùng lựa chọn thuật toán phù hợp với cấu hình phần cứng UGV, chi phí và yêu cầu điều kiện hoạt động cụ thể. Do quỹ đạo tính toán là không giống nhau ở mỗi lần khởi chạy chương trình, kết quả khảo sát sẽ có hạn chế nhất định do số lần lấy mẫu còn ít. Cả hai thuật toán Regulated Pure Pursuit và Vector Pursuit đều phù hợp với các hệ thống có cấu hình phần cứng khiêm tốn. Tuy nhiên, chúng có giới hạn về vận tốc trung bình do phần nguyên nhân lớn nằm ở phương pháp điều chỉnh vận tốc dựa trên thuật toán hình học. Trong tương lai, nghiên cứu sẽ mở rộng ứng dụng động lực học ô tô để tối ưu điều khiển vận tốc UGV đối với hai thuật toán này.

Tài liệu tham khảo

1. S. U. H. Syed, *Lidar Sensor in Autonomous Vehicles*. 2022.
2. V. Đ. Lập and P. Đ. Vi, *Cấu tạo ô tô quân sự* Hà Nội: Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân, 1995.
3. K. M. Lynch and F. C. Park, "Modern Robotics - Mechanics, Planning, and Control: Video supplements and software," 2017.
4. H. D. Mouton, "Comparison of body rotations using Euler angles and quaternions," 2021 2021. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/11427/33222.
5. C. Coulter, "Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm," 1992.
6. S. Macenski, S. Singh, F. Martín, and J. Ginés, "Regulated pure pursuit for robot path tracking," *Autonomous Robots,* vol. 47, no. 6, pp. 685-694, 2023.
7. J. Wit, C. Iii, and D. Ii, "Autonomous ground vehicle path tracking," *J. Field Robotics,* vol. 21, pp. 439-449, 08/01 2004, doi: 10.1002/rob.20031.
8. G. Williams, P. Drews, B. Goldfain, J. M. Rehg, and E. A. Theodorou, "Aggressive driving with model predictive path integral control," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 16-21 May 2016 2016, pp. 1433-1440, doi: 10.1109/ICRA.2016.7487277.

Research on the Capabilities of Various Trajectory Tracking Control Algorithms for Unmanned Vehicles with Ackermann Steering and LiDAR Sensors

Abstract: This paper focuses on the investigation and comparison of various motion trajectory tracking control algorithms for Unmanned Ground Vehicles (UGVs) equipped with Ackermann steering systems and LiDAR sensors, based on the ROS2 framework. Ackermann steering, commonly used in automobiles, presents more complex kinematic constraints compared to other steering systems. The current ROS2 platform supports several trajectory tracking control algorithms, such as Regulated Pure Pursuit, Vector Pursuit, and Model Predictive Path Integral (MPPI). These methods will be evaluated based on key criteria, including the ability to follow predefined trajectories, steering stability, obstacle avoidance, maneuverability in confined spaces, computational efficiency, and more. The survey results help identify the strengths and weaknesses of each algorithm in different UGV control environments, providing a basis for selecting the most suitable technique for specific LIDAR-based autonomous vehicle design problems.

Keywords: *UGV; LiDAR; Trajectory tracking; Ackermann; ROS2; Regulated Pure Pursuit; Vector Pursuit; Model Predictive Path Integral.*

❑

Nghiên cứu dao động của xe sửa chữa cơ động quân sự kéo mooc phát điện khi di chuyển trên mặt đường mấp mô ngẫu nhiên

Trần Đức Thắng[1], Nguyễn Minh Kha[1*], Phạm Chí Hiếu[2], Nguyễn Công Chính[2], Phạm Ngọc Minh Dũng[3]

[1]*Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự*

[2]*Trung tâm HL 125 Vĩnh Phúc, Học viện Kỹ thuật Quân sự*

[3]*Trường Quân sự quân khu 7*

Email: minhkha97@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ di chuyển đến dao động của xe sửa chữa cơ động kéo mooc phát điện khi di chuyển trên mặt đường mấp mô ngẫu nhiên. Mô hình động lực học ở dạng cơ hệ nhiều vật, xem xét đến sự đàn hồi của hệ thống treo, lốp xe và bỏ quả ảnh hưởng của độ dốc, biến dạng của nền đất. Chiều cao mấp mô ngẫu nhiên của mặt đường được xác định từ kết quả mô phỏng theo tiêu chuẩn ISO 8068. Hệ phương trình vi phân chuyển động được giải theo phương pháp mô phỏng bằng cách ứng dụng phần mềm Matlab. Kết quả bài báo đã chỉ ra dao động của tổ hợp xe sửa chữa cơ động khi di chuyển với các tốc độ 36 km/h, 42 km/h, 48 km/h, 54 km/h trên các mặt đường mấp mỗ ngẫu nhiên cấp D. Kết quả bài báo là cơ sở để hướng đến cải tiến hệ thống treo trên mooc phát điện trên thực tế nhằm giảm thiểu dao động của tổ hợp. Đây là vấn đề rất có ý nghĩa trong lĩnh vực an ninh quốc phòng.

Từ khóa: *Xe quân sự; đường gồ ghề ngẫu nhiên; xe tải ba cầu; động lực học; hệ nhiều vật.*

1. Đặt vấn đề

Xe sửa chữa cơ động quân sự MTO-AT (Hình 1) do Liên Xô sản xuất, dựa trên khung gầm xe tải Zil 131 là xe chuyên dụng được sử dụng để thực hiện nhiệm vụ cứu kéo các phương tiện bị hư hỏng về nơi tập kết, sửa chữa các hư hỏng tại chỗ. Trên xe sửa chữa cơ động MTO-AT được bố trí các trang thiết bị như máy tiện, máy mài, máy khoan…đều cần đến nguồn điện. Vì vậy, các xe sửa chữa cơ động được tích hợp thêm một tổ hợp máy phát điện nằm trên rơ mooc được kéo theo phía sau. Tổ hợp máy phát điện được đặt trên rơ mooc không có hệ thống treo, hai bánh xe của rơ mooc được liên kết bởi một trục dài, không có vi sai. So sánh với xe tải kéo theo rơ mooc, ta nhận thấy tổ hợp xe sửa chữa cơ động mang hai đặc điểm đặc trưng. Thứ nhất, tổ hợp xe sửa chữa cơ động thường di chuyển trên các địa hình khó khăn như địa hình đồi núi, trung du với biên dạng mặt đường ngẫu nhiên, không xác định. Thứ hai, đặc điểm kết cấu hệ thống di chuyển của mooc phát điện là không có hệ thống treo, vì vậy khi di chuyển cùng với xe kéo, mooc phát điện sẽ có sự rung lắc mạnh phụ thuộc tác động kích thích từ mặt đường. Nghiên cứu ảnh hưởng của địa hình phân bố ngẫu nhiên đến đến dao động của xe sửa chữa cơ động kéo mooc phát điện là cần thiết hướng đến mục tiêu cải tiến hệ thống treo trên mooc phát điện nhằm giảm thiểu sự rung lắc trong quá trình di chuyển đồng thời là cơ sở để cải tiến thay thế mooc phát điện bằng mooc chở đạn được, vật chất hậu cần hoặc thương binh trên chiến trường.

Đã có nhiều nghiên cứu về dao động của ô tô mang đặc điểm tương đồng với quá trình xe sửa chữa cơ động kéo theo rơ mooc di chuyển trên địa hình ngẫu nhiên. Đó là các nghiên cứu về động lực học xe tải hai cầu, ba cầu hoặc nhiều cầu, động lực học xe kéo rơ mooc khi di chuyển trên các mặt đường có biên dạng ngẫu nhiên hoặc biên dạng điều hòa.



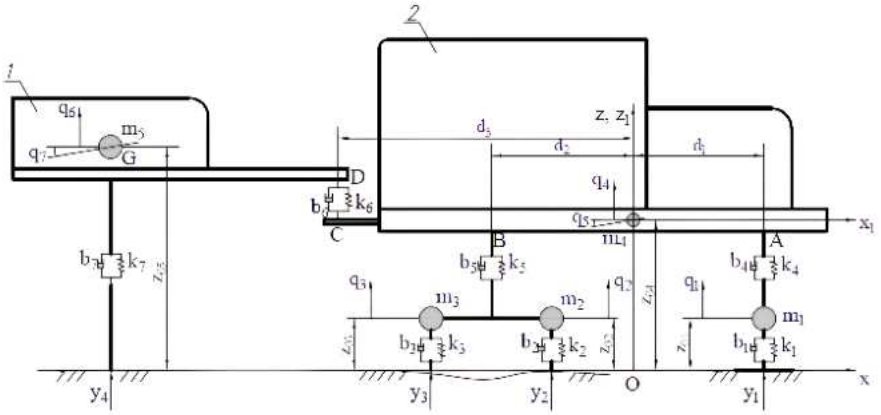
Hình 1. Xe sửa chữa cơ động MTO-AT kéo theo mooc phát điện khi di chuyển

Mô hình xe hai cầu là mô hình cơ bản nhất về nghiên cứu dao động của xe ô tô. Tác giả Jun Yang và cộng sự đã nghiên cứu về mô hình 3D của xe hai cầu 7 bậc tự do với tác động kích thích từ mặt đường có biên dạng ngẫu nhiên được mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink, tác giả đã khảo sát dao động của xe trong một số trường hợp thay đổi về độ cứng của hệ thống treo, vận tốc chuyển động của xe [1]. Trong [2,3], các tác giả đã phân tích ảnh hưởng của các thông số bố trí hệ truyền lực của ô tô tải theo chiều dọc của xe đến rung động của phương tiện và của người lái xe. Mô hình 2D hoặc 3D nghiên cứu về động lực học xe tải ba cầu trong quá trình di chuyển được trình bày trong các tài liệu [4-7]. Trong nghiên cứu [5], tác giả đã trình bày về mô hình 3D với 11 bậc tự do để xem xét ảnh hưởng của dao động thẳng đứng đến người lái xe. Trong [6], tác giả đã xây dựng mô hình động lực học ô tô 10 bậc tự do để xem xét ảnh hưởng của các thông số khác nhau trong tất cả các hệ thống treo của xe đến dao động của ghế lái theo phương thẳng đứng và góc nghiêng của cabin. Mô hình động lực học ô tô tải bốn cầu hoặc năm cầu cũng được nghiên cứu trong các tài liệu [8, 9]. Bài báo tập trung khảo sát ảnh hưởng của mặt đường phân bố ngẫu nhiên cấp D theo tiêu chuẩn ISO 8068 đến dao động của xe kéo và mooc phát điện trong quá trình di chuyển với các vận tốc khác nhau.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Mô hình động lực học xe tải kéo mooc phát điện

Mô hình động lực học nghiên cứu dao động của xe sửa chữa cơ động kéo theo mooc phát điện là mô hình 2D. Xe tải ba cầu liên kết với mooc kéo bằng khớp trụ thông qua gối đỡ (hình 2). Quá trình xe tải di chuyển sẽ kéo mooc phát điện di chuyển theo.



Hình 2. Mô hình động lực học tổ hợp xe sửa chữa cơ động kéo mooc phát điện:
1- Mooc phát điện; 2- Xe cơ sở

Toàn bộ cơ hệ khảo sát được đặt trong hệ tọa độ cố định xOz gắn với mặt đất. Bỏ qua độ dốc và biến dạng của nền đất. Trong hình 2, m_1, m_2, m_3 lần lượt là khối lượng của các cầu xe, m_4 là khối lượng của thân xe cơ sở, m_5 là khối lượng của mooc phát điện; gối đỡ liên kết xe cơ sở và mooc phát điện được thay thế bằng hệ lò xo - giảm chấn với hệ số cản nhớt và độ cứng lần lượt là b_6, k_6; b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_7 lần lượt là hệ số cản nhớt của lốp xe trước, lốp xe giữa, lốp xe sau, hệ treo trước, hệ treo sau và lốp xe trên mooc phát điện; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_7 lần lượt là độ cứng của lốp xe trước, lốp xe giữa, lốp xe sau, hệ treo trước, hệ treo sau và lốp xe trên mooc phát điện; d_1, d_2, d_3 lần lượt là khoảng cách từ trọng tâm thân xe cơ sở đến mặt phẳng đối xứng ngang của hệ treo trước, khoảng cách từ trọng tâm thân xe cơ sở đến mặt phẳng đối xứng ngang của hệ treo sau và khoảng cách từ trọng tâm thân xe cơ sở đến trục của khớp nối, d_4 là khoảng cách từ trọng tâm mooc phát điện đến trục của khớp nối. Gọi J_4, J_5 lần lượt là mô men quán tính của thân xe cơ sở và mô men quán tính của mooc phát điện đối với các trục quay tương ứng; z_{01}, z_{02}, z_{03}, z_{04}, z_{05} lần lượt là vị trí ban đầu của trọng tâm các khối lượng tương ứng m_1, m_2, m_3, m_4, m_5; y_1, y_2, y_3, y_4 lần lượt là các hàm kích thích từ mặt đường tác dụng lên các lốp xe, các hàm này được xem xét phụ thuộc thời gian.

Vecto tọa độ suy rộng để khảo sát dao động của cơ hệ có dạng:

$$\begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 & q_6 & q_7 \end{bmatrix}^T$$

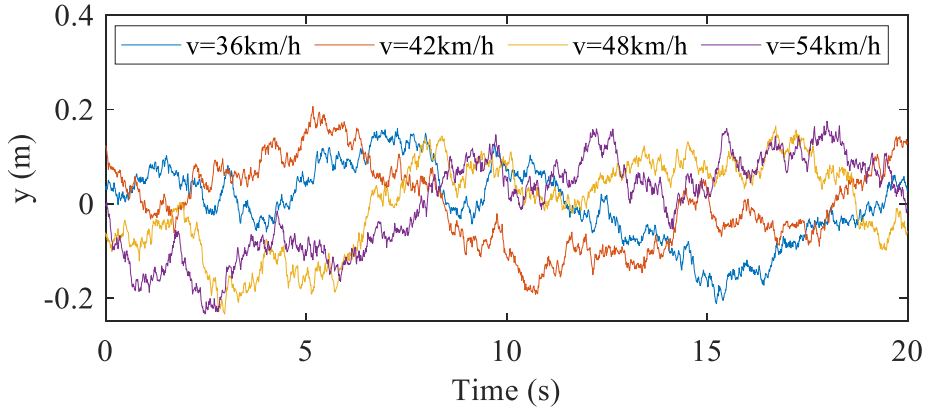
Trong đó: q_1 (m), q_2 (m), q_3 (m) là chuyển vị trọng tâm các khối lượng không treo trên xe kéo; q_4 (m) là chuyển vị theo phương thẳng đứng của trọng tâm thân xe kéo; q_5 (rad) là góc lắc thân xe kéo quanh trục đi qua trọng tâm; q_6 (m) là chuyển vị tịnh tiến của trọng tâm mooc phát điện; q_7 (rad) là góc lắc của thân mooc phát điện.

2.2. Hàm kích thích từ mặt đường mấp mô ngẫu nhiên

Theo [10-12], mấp mô mặt đường được mô tả trên miền thời gian theo biểu thức:

$$\dot{q}(t) + 2\pi f_0 v q(t) = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) v}\, w(t) \tag{1}$$

Trong đó: $q(t)$ là hàm kích thích từ mặt đường mấp mô ngẫu nhiên, $w(t)$ là là độ lệch chuẩn của quá trình ngẫu nhiên Gaussian, được lấy từ thư viện Simulink trong Matlab, v là vận tốc của xe, f_0 = 0.0628 Hz là tần số biên nhỏ nhất, $G_q(n_0)$ tính theo đơn vị m^3 là hằng số lấy theo tiêu chuẩn ISO 8068. Đối với mặt đường cấp D, ta có $G_q(n_0)$ = 1024. Biên dạng mặt đường ngẫu nhiên cấp D ứng với các tốc độ khác nhau được biểu diễn trên hình 3.



Hình 3. Mấp mô ngẫu nhiên của mặt đường cấp D

2.3. Động năng, thế năng, hàm hao tán của cơ hệ

Động năng của cơ hệ gồm động năng chuyển động tịnh tiến theo các phương Ox, Oz và chuyển động quay quanh trục đi qua khối tâm của các khối lượng m_4, m_5 và được xác định:

$$T = \frac{1}{2}m_1\left(v^2 + \dot{q}_1^{\,2}\right) + \frac{1}{2}m_2\left(v^2 + \dot{q}_2^{\,2}\right) + \frac{1}{2}m_3\left(v^2 + \dot{q}_3^{\,2}\right) + \frac{1}{2}m_4\left(v^2 + \dot{q}_4^{\,2}\right) + \frac{1}{2}J_4\dot{q}_5^{\,2} + \frac{1}{2}m_5\left(v^2 + \dot{q}_6^{\,2}\right) + \frac{1}{2}J_5\dot{q}_7^{\,2} \tag{2}$$

Tổng thế năng của cơ hệ được xác định theo biểu thức:

$$\Pi = m_1 g\left(z_{01} + q_1\right) + m_2 g\left(z_{02} + q_2\right) + m_3 g\left(z_{03} + q_3\right) + m_4 g\left(z_{04} + q_4\right) + m_5 g\left(z_{05} + q_6\right) + \frac{1}{2}k_1\left(q_1 - y_1\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(q_2 - y_2\right)^2 + \frac{1}{2}k_3\left(q_3 - y_3\right)^2 + \frac{1}{2}k_7\left(q_6 - y_4\right)^2 + \frac{1}{2}k_4\left(q_4 - d_1q_5 - q_1\right)^2 + \frac{1}{2}k_5\left(q_4 + d_2q_5 - \frac{q_2 + q_3}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}k_6\left(q_6 + d_4q_7 - q_4 - d_3q_5\right)^2 \tag{3}$$

Tổng năng lượng hao tán của của cơ hệ được xác định theo biểu thức:

$$\Phi = \frac{1}{2}b_1\left(\dot{q}_1 - \dot{y}_1\right)^2 + \frac{1}{2}b_2\left(\dot{q}_2 - \dot{y}_2\right)^2 + \frac{1}{2}b_3\left(\dot{q}_3 - \dot{y}_3\right)^2 + \frac{1}{2}b_4\left(\dot{q}_4 - d_1\dot{q}_5 - \dot{q}_1\right)^2 + \frac{1}{2}b_5\left(\dot{q}_4 + d_2\dot{q}_5 - \frac{\dot{q}_2 + \dot{q}_3}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}b_6\left(\dot{q}_6 + d_4\dot{q}_7 - \dot{q}_4 - d_3\dot{q}_5\right)^2 + \frac{1}{2}b_7\left(\dot{q}_6 - \dot{y}_4\right)^2 \tag{4}$$

2.4. Hệ phương trình vi phân chuyển động

Áp dụng phương trình Lagrang loại 2 để thiết lập hệ phương trình vi phân mô tả cơ hệ:

$$m_1\ddot{q}_1 + \left(b_1 + b_4\right)\dot{q}_1 - b_4\dot{q}_4 + b_4d_1\dot{q}_5 - b_1\dot{y}_1 + \left(k_1 + k_4\right)q_1 - k_4q_4 + k_4d_1q_5 - k_1y_1 + m_1g = 0 \tag{5}$$

$$m_2\ddot{q}_2 + \left(b_2 + 0.25b_5\right)\dot{q}_2 + 0.25b_5\dot{q}_3 - 0.5b_5\dot{q}_4 - 0.5b_5d_2\dot{q}_5 - b_2\dot{y}_2 + \left(k_2 + 0.25k_5\right)q_2 + 0.25k_5q_3 - 0.5k_5q_4 - 0.5k_5d_2q_5 - k_2y_2 + m_2g = 0 \tag{6}$$

$$m_3\ddot{q}_3 + 0.25b_5\dot{q}_2 + \left(b_3 + 0.25b_5\right)\dot{q}_3 - 0.5b_5\dot{q}_4 - 0.5b_5d_2\dot{q}_5 - b_3\dot{y}_3 + 0.25k_5q_2 - 0.5k_5d_2q_5 + \left(k_3 + 0.25k_5\right)q_3 - 0.5k_5q_4 - k_3y_3 + m_3g = 0 \tag{7}$$

$$m_4\ddot{q}_4 - b_4\dot{q}_1 - 0.5b_5\dot{q}_2 - 0.5b_5\dot{q}_3 + \left(b_4 + b_5 + b_6\right)\dot{q}_4 + \left(b_6d_3 - b_4d_1 + b_5d_2\right)\dot{q}_5 - b_6\dot{q}_6 - b_6d_4\dot{q}_7 - k_4q_1 - 0.5k_5q_2 - 0.5k_5q_3 + \left(k_4 + k_5 + k_6\right)q_4 + \left(k_5d_2 - k_4d_1 + k_6d_3\right)q_5 - k_6q_6 - k_6d_4q_7 + m_4g = 0 \tag{8}$$

$$J_4\ddot{q}_5 + b_4d_1\dot{q}_1 - 0.5d_2b_5\dot{q}_2 - 0.5d_2b_5\dot{q}_3 + \left(b_6d_3 - b_4d_1 + b_5d_2\right)\dot{q}_4 + \left(b_6d_3^{\,2} + b_4d_1^{\,2} + b_5d_2^{\,2}\right)\dot{q}_5 - b_6d_3\dot{q}_6 - d_4d_3b_6\dot{q}_7 + k_4d_1q_1 - 0.5k_5d_2q_2 - 0.5k_5d_2q_3 + \left(k_5d_2 - k_4d_1 + k_6d_3\right)q_4 + \left(k_4d_1^{\,2} + k_5d_2^{\,2} + k_6d_3^{\,2}\right)q_5 - k_6d_3q_6 - k_6d_3d_4q_7 = 0 \tag{9}$$

$$m_5\ddot{q}_6 - b_6\dot{q}_4 - b_6d_3\dot{q}_5 + \left(b_6 + b_7\right)\dot{q}_6 + b_6d_4\dot{q}_7 - b_7\dot{y}_4 - k_6q_4 - k_6d_3q_5 + \left(k_6 + k_7\right)q_6 + k_6d_4q_7 - k_7y_4 + m_5g = 0 \tag{10}$$

$$J_5\ddot{q}_7 - b_6d_4\dot{q}_4 - b_6d_4d_3\dot{q}_5 + b_6d_4\dot{q}_6 + b_6d_4^{\,2}\dot{q}_7 - k_6d_4q_4 - k_6d_4d_3q_5 + k_6d_4q_6 + k_6d_4^{\,2}q_7 = 0 \tag{11}$$

3. Kết quả và thảo luận

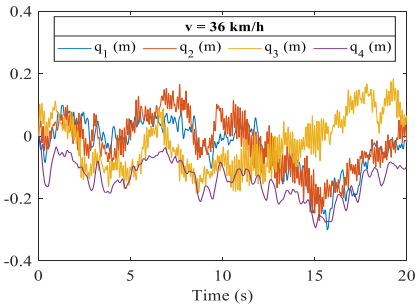
Tiến hành khảo sát dao động của tổ hợp xe kéo và mooc phát điện với với các vận tốc không đổi 36 km/h, 54 km/h lần lượt tương ứng với 10 m/s và 15 m/s. Các vận tốc được lựa chọn phù hợp với vận tốc thực tế khi vận hành xe sửa chữa cơ động MTO-AT ngoài thực tế. Điều kiện ban đầu: $q_{i0} = 0; \dot{q}_{i0} = 0 (i = 1 \div 7)$

Bộ tham số đầu vào để giải hệ phương trình (5-11) được cho trong bảng 1 sau đây.

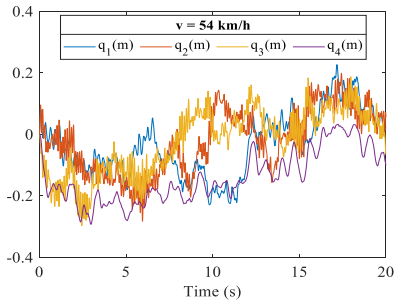
Bảng 1. *Thông số đầu vào*

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
k_1 (N/m)	8×10^5	k_7 (N/m)	8×10^5	b_6 (N.s/m)	500	m_3 (kg)	300
k_2 (N/m)	8×10^5	b_1 (N.s/m)	500	b_7 (N.s/m)	500	m_4 (kg)	5575
k_3 (N/m)	8×10^5	b_2 (N.s/m)	500	J_4 (kg.m^2)	8250	m_5 (kg)	1300
k_4 (N/m)	195×10^3	b_3 (N.s/m)	500	J_5 (kg.m^2)	230	d_1 (m)	2.23
k_5 (N/m)	295×10^3	b_4 (N.s/m)	24000	m_1 (kg)	305	d_2 (m)	1,75
k_6 (N/m)	4×10^5	b_5 (N.s/m)	11500	m_2 (kg)	300	d_3 (m)	3,6
g (m/s^2)	9,8	d_4 (m)	1,2				

Chuyển vị của các cầu xe và thân xe cơ sở q_1, q_2, q_3, q_4 ứng với vận tốc 36km/h được mô tả trên hình 4 và ứng với vận tốc 54km/h được mô tả trên hình 5. Sự so sánh chuyển vị q_1, q_2, q_3, q_4 thể hiện không rõ nét khi so sánh giữa các vận tốc 36 km/h hay 54 km/h vì chúng có biên độ lớn nhất và hình dáng gần như nhau. Tuy nhiên ta nhận thấy, đồ thị chuyển vị thẳng đứng của các cầu xe và thân xe có hình dạng ngẫu nhiên giống với biên dạng mặt đường chứng tỏ sự phù hợp về mặt chuyển động so với các quan sát trên thực tế.

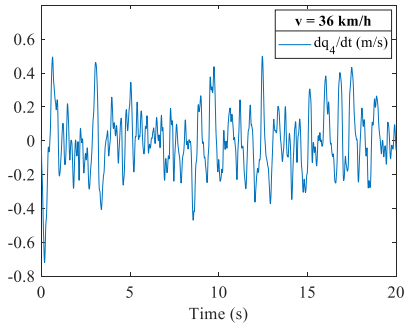


Hình 4. Chuyển vị q_1, q_2, q_3, q_4 khi v = 36 km/h

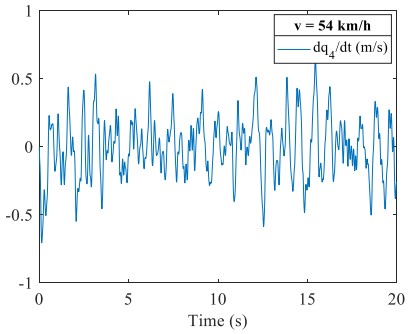


Hình 5. Chuyển vị q_1, q_2, q_3, q_4 khi v = 54 km/h

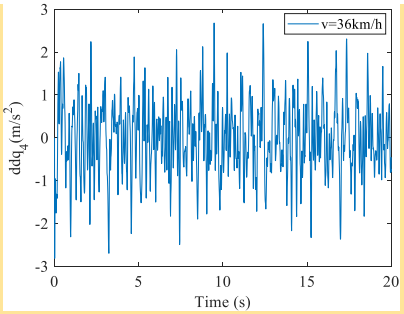
Đồ thị vận tốc dao động theo phương thẳng đứng $\dot{q}_4$ của thân xe cơ sở trong các trường hợp vận tốc 36km/h, 42 km/h, 48 km/h, 54 km/h có hình dạng tương tự nhau, ở đây ta xét vận tốc dao động $\dot{q}_4$ tương ứng ở vận tốc 36 km/h và 54km/h như mô tả trên hình 6 và hình 7. Sự tương đồng về mặt chuyển vị của cầu xe và thân xe dẫn đến vận tốc dao động theo phương thẳng đứng của thân xe cơ sở cũng có dạng ngẫu nhiên và gần giống nhau tương ứng với hai vận tốc này.



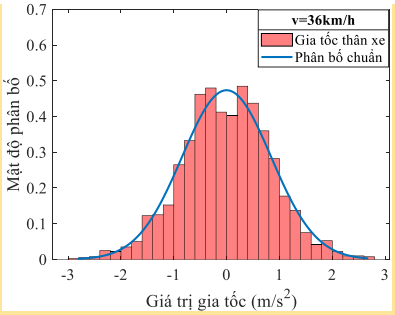
Hình 6. Vận tốc $\dot{q}_4$ khi v = 36 km/h



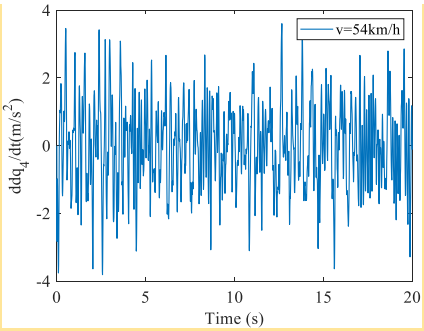
Hình 7. Vận tốc $\dot{q}_4$ khi v = 54 km/h



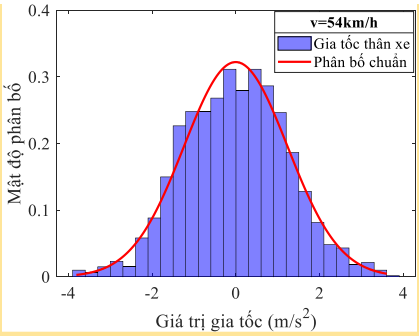
Hình 8. Gia tốc dao động thẳng đứng của thân xe cơ sở khi v = 36km/h



Hình 9. Phân bố gia tốc dao động thẳng đứng của thân xe cơ sở khi v = 36km/h



Hình 10. Gia tốc dao động thẳng đứng của thân xe cơ sở khi v = 54km/h



Hình 11. Phân bố dao động thẳng đứng của thân xe cơ sở khi v = 54km/h

Trên hình 8 và hình 9 thể hiện giao tốc thẳng đứng của thân xe cơ ở khi v = 36 km/h và v = 54 km/h và mật độ phân bố dao động thẳng đứng thân xe cơ sở tương ứng với hai với tốc (Hình 9 và hình 11). Theo [13] các giá trị tham số của phân bố chuẩn (do gia tốc dao động bao gồm cả giá trị âm và dương) được ước lượng thông qua hàm hợp lý được cho bởi công thức:

$$\hat{\theta} = \arg\max_{\theta \in \Theta} \mathrm{L}_n(\theta; y) \tag{12}$$

Trong đó: θ là véc tơ tham số của phân bố, $\theta = [\mu, \sigma^2]$; $\mathrm{L}_n(\theta; y)$ là hàm hợp lý với bộ tham số θ và các giá trị gia tốc mô phỏng $\boldsymbol{y}$; $\hat{\theta}$ là giá trị ước lượng của các tham số; Θ là miền không gian tham số. $\mathrm{L}_n(\theta; y)$ để đánh giá mật độ khớp tại các mẫu dữ liệu quan sát được cho bởi công thức:

$$\mathrm{L}_n(\theta; y) = L_n(\theta; y) = f_n(y; \theta) \tag{13}$$

Hoặc được sử dụng thông qua hàm logarit của hàm hợp lý:

$$\ell_n(\theta) = \ln \mathrm{L}_n(\theta; y) = f_n(y; \theta) \tag{14}$$

Các tham số được ước lượng giá trị sao cho giá trị hàm hợp lý hoặc giá trị hàm logarit hợp lý là lớn nhất. Giá trị ước lượng các tham số phân bố của gia tốc được đưa ra trong bảng 2.

Bảng 2. *Giá trị ước lượng các tham số của phân bố tại các vận tốc khảo sát ở mặt đường cấp C.*

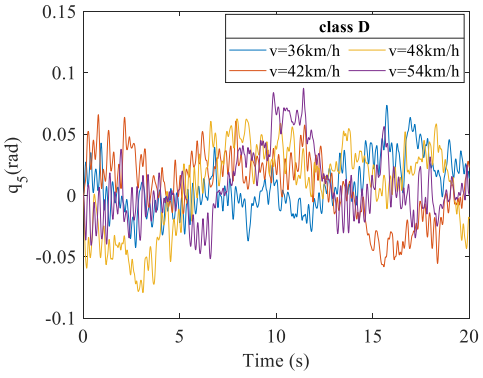
Vận tốc	Kỳ vọng (μ)	Phương sai (σ^2)	Khả năng xảy ra (Log-likelihood)
36 km/h	-0.0010	0.71	-2496.1298
64 km/h	-0.0055	1.5325	-3265.9065

Qua kết quả tính toán, bài báo nhận thấy rằng phân bố chuẩn là tương đối phù hợp với các giá trị gia tốc thu được từ mô phỏng thể hiện ở giá trị tuyệt đối của hàm logarit hợp lý là lớn. Để xác định gia tốc dao động thực tế của thân xe làm thông số cho thử nghiệm, bài báo lựa chọn giá trị gia tốc giới hạn trên miền [-3σ, 3σ] (m/s^2) (vùng có khả năng xảy ra lớn nhất) là các giá trị gia tốc của thân xe (Bảng 3).

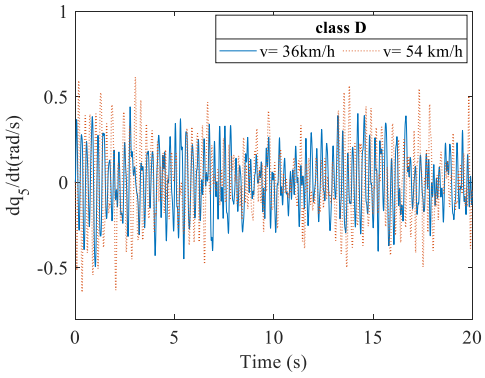
Bảng 3. *Giá trị gia tốc dao động tại trên miền [-3σ, 3σ] tại các vận tốc khảo sát tại mặt đường cấp C*

Vận tốc	Gia tốc tại -3σ (m/s^2)	Gia tốc tại 3σ (m/s^2)
36 km/h	-0.8436	0.8416
64 km/h	-1.2434	1.2324

Sự thể hiện ảnh hưởng của vận tốc đến dao động của xe cơ sở thể hiện rõ ràng hơn ở dao động lắc của thân xe. Xem xét góc lắc của thân xe cơ sở khi xe di chuyển trên mặt đường ngẫu nhiên cấp D với các vận tốc khác nhau, ta thu được đồ thị q_5 như trên hình 12 và đồ thị $\dot{q}_5$ như trên hình 13.

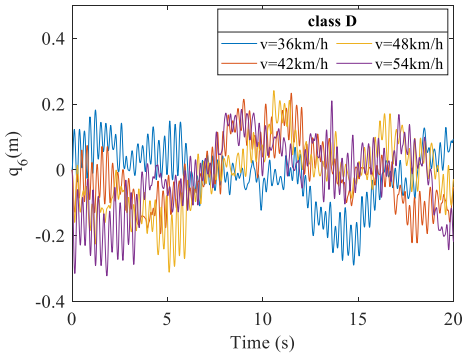


Hình 12. Chuyển vị góc của thân xe ứng các vận tốc di chuyển của xe

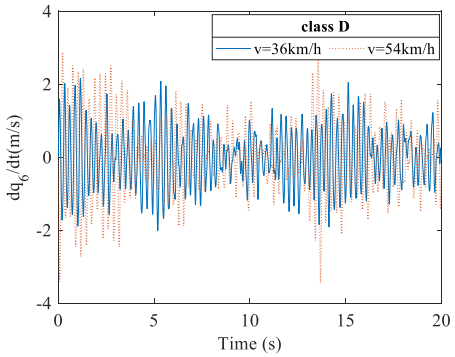


Hình 13. Vận tốc góc của thân xe ứng với các vận tốc di chuyển của xe

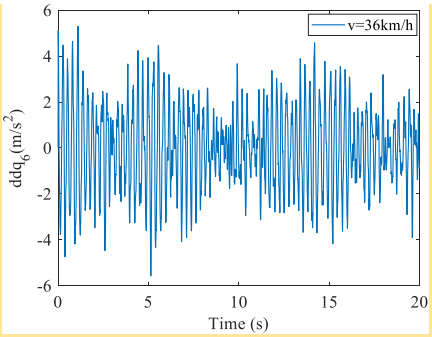
Từ đồ thị hình 12, ta nhận thấy trong quá trình di chuyển, thân xe cũng lắc một cách ngẫu nhiên không có quy luật, vận tốc càng tăng thì biên độ góc lớn nhất càng tăng theo. Ở vận tốc 54 km/h, góc lắc của thân xe có thể đạt đến 0,09 rad tương ứng với 5°. Tương tự, hình dạng của $\dot{q}_5$ trong các trường hợp vận tốc khác nhau cũng có hình dáng ngẫu nhiên, sự khác nhau thể hiện rõ rệt ở biên độ dao động.Từ hình 13, ta thấy rằng, vận tốc di chuyển lớn hơn, vận tốc góc của thân xe có biên độ cực đại lớn hơn, giá trị biên độ cực đại khoảng 0.6 rad/s ứng với vận tốc 54 km/h và 0.4 rad/s ứng với vận tốc 36 km/h.



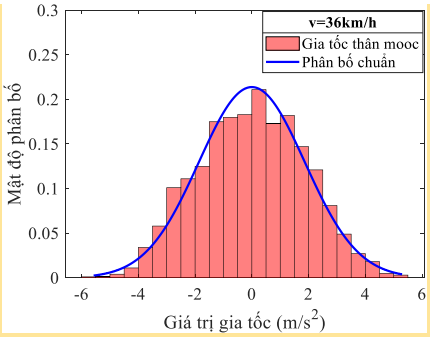
Hình 10. Chuyển vị thẳng đứng của mooc phát điện ứng các vận tốc di chuyển của xe



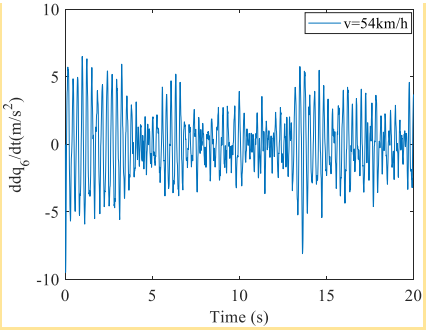
Hình 11. Vận tốc dao động theo phương thẳng đứng của mooc phát điện ứng



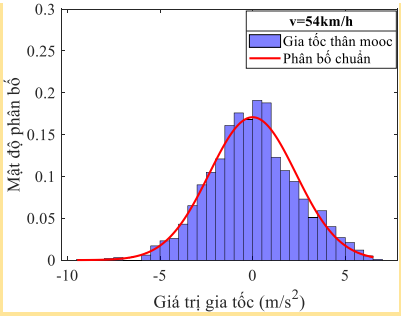
Hình 16. Gia tốc dao động thẳng đứng của thân mooc phát điện khi v = 36km/h



Hình 17. Phân bố gia tốc dao động thẳng đứng của thân mooc phát điện khi v = 36km/h



Hình 18. Gia tốc dao động thẳng đứng của thân mooc phát điện khi v = 54km/h



Hình 19. Phân bố gia tốc dao động thẳng đứng của thân mooc phát điện khi v = 54km/h

Giá trị ước lượng các tham số phân bố của gia tốc được đưa ra trong bảng 4.

Bảng 4. *Giá trị ước lượng các tham số của phân bố tại các vận tốc khảo sát ở mặt đường cấp D.*

Vận tốc	Kỳ vọng (μ)	Phương sai (σ^2)	Khả năng xảy ra (Log-likelihood)
36 km/h	-0.0008	3.6776	-2968.1298
64 km/h	-0.0012	4.5659	-3265.9065

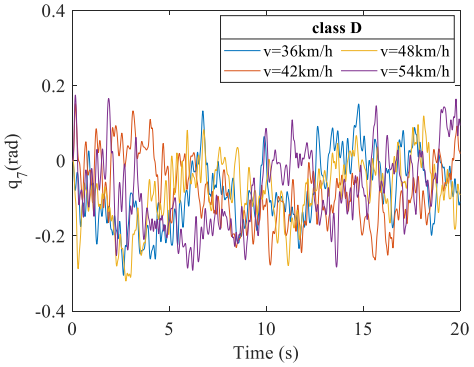
Qua kết quả tính toán, bài báo nhận thấy rằng phân bố chuẩn là tương đối phù hợp với các giá trị gia tốc thu được từ mô phỏng thể hiện ở giá trị tuyệt đối của hàm logarit hợp lý là lớn. Để xác định gia tốc dao động thực tế của thân xe làm thông số cho thử nghiệm, bài báo lựa chọn giá trị gia tốc giới hạn trên miền [-3σ, 3σ] (m/s^2) (vùng có khả năng xảy ra lớn nhất) là các giá trị gia tốc của thân xe (Bảng 5).

Bảng 5. *Giá trị gia tốc dao động tại trên miền [-3σ, 3σ] tại các vận tốc khảo sát tại mặt đường cấp D*

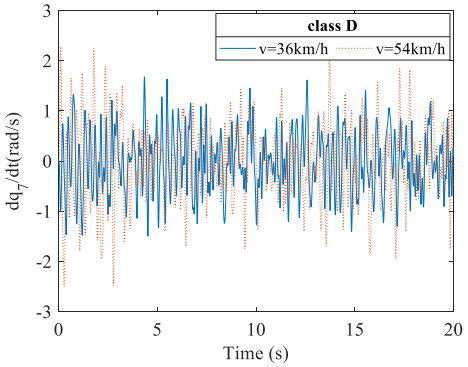
Vận tốc	Gia tốc tại -3σ (m/s^2)	Gia tốc tại 3σ (m/s^2)
36 km/h	-1.9185	1.9169
64 km/h	-2.1380	2.1356

Khảo sát chuyển vị thẳng đứng q_6, góc lắc q_7 của mooc phát điện tương tự như q_4, q_5 ta thu được các đồ thị trên hình 10, 11, 12 và hình 13. Đồ thị trên hình 10 cho thấy, chuyển vị tịnh tiến theo phương thẳng đứng của trọng tâm mooc phát điện có quy luật ngẫu nhiên và gần giống nhau tương ứng với các vận tốc xem xét. Tuy nhiên, vận tốc dao động khác nhau về biên độ cực đại, vận tốc tăng lên thì tốc độ dao động theo phương thẳng đứng của trọng tâm mooc phát điện cũng tăng theo. Biên độ cực đại của $\dot{q}_6$ khoảng 3,8 m/s khi vận tốc di chuyển là 54 km/h và 2,2 m/s khi vận tốc di chuyển là 36 km/h (hình 11).

Xem xét góc lắc của mooc phát điện trong quá trình di chuyển, ta nhận thấy biên độ lắc cực đại có giá trị khá lớn, vào khoảng 0,2 rad/s tương ứng với 11.5° (hình 12) và vận tốc góc $\dot{q}_7$ cũng tăng lên khi vận tốc chuyển động của xe tăng (hình 13). Xem xét tổng thể dao động của mooc phát điện, ta thấy khi xe di chuyển, mooc phát điện rung lắc khá mạnh. Nguyên nhân dẫn đến sự rung lắc của mooc phát điện lớn như thế là do nó không có hệ thống giảm chấn để dập tắt dao động.



Hình 12. Chuyển vị góc của mooc phát điện ứng các vận tốc di chuyển của xe



Hình 13. Vận tốc góc của mooc phát điện ứng các vận tốc di chuyển của xe

Từ các kết quả khảo sát trên có thể thấy, sự dao động của xe cơ sở và mooc phát điện tương thích với mấp mô của nền đường.Với các vận tốc lớn hơn, biên độ dao động không thay đổi nhiều nhưng tốc độ dao động thì lại tăng lên đáng kể so với vận tốc thấp hơn. Do vậy, quá trình hành quân di chuyển, ta nên lựa chọn tốc độ hành quân khoảng 36 km/h đến 42 km/h.

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng mô hình động lực học xe sửa chữa cơ động kéo mooc phát điện khi di chuyển trên địa hình có biên dạng mặt đường ngẫu nhiên và xem xét ảnh hưởng của các vận tốc chuyển động khác nhau đến dao động của xe cơ sở và của mooc phát điện khi di chuyển trên mặt đường mấp mô ngẫu nhiên cấp D. Kết quả nghiên cứu chỉ ra nên duy trì vận tốc của xe ở mức thấp bởi vận tốc dao động của xe cơ sở và mooc phát điện có khuynh hướng đạt biên độ cực đại nhỏ hơn. Trên cơ sở đó, xây dựng đặc tính thống kê của các giá trị gia tốc thu được và nhận thấy rằng phân bố chuẩn là phù hợp để biểu diễn thống kê cho các giá trị gia tốc này. Đây là nghiên cứu có ý nghĩa lớn trong lĩnh vực quân sự khi xem xét ảnh hưởng của điều kiện làm việc tới quá trình di chuyển của xe sửa chữa cơ động quân sự. Là cơ sở để cải tiến nâng cao tính năng sử dụng của loại xe sửa chữa cơ động vốn đang được sử dụng tại nhiều quốc gia có nền kinh tế chưa phát triển, trong đó có Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

1. J. Yang and M. Dong, "Research on Vibration of Automobile Suspension Design", MATEC Web of Conferences, vol. 153:04008, 2018. https://doi.org/10.1051/matecconf/201815304008.
2. D. Miroslav, B. S. Zeljko and M. M. Danijela, "Impact of truck'spower trainlayout on driver's foreand-aft vibration loads", Journal of Mechanical Engineering and Modern Technology, vol. 1, no. 1, pp. 37-51, 2018. http://www.jmemt.jarap.org.
3. L. E. Davis and J. M. Bunker, "Dynamic load sharing for heavy vehicles : a new metric", *Road and Transport Research*, vol. 18, no. 4, pp. 23-37, 2009. https://www.researchgate.net/publication/43206184.
4. S. Aziz and A. Z. Yunus, "Analysis of the vertical vibration effects on ride comfort of vehicle driver", *Journal of Vibroengineering*, vol. 14, no. 2, pp. 559–571, 2012. https://www.extrica.com/article/10613
5. L. Hao and N. V. Liem, "Improving ride comfort and road friendliness of heavy truck using semi-active suspension system", *Robotic Systems and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 17–26, 2023. https://doi.org/10.21595/rsa.2023.23021.
6. H. Yongzhu, N. V. Liem, and Y. Yong, "Vibration research of heavy trucks. Part 1: Sensitivity analysis of dynamic parameters on ride comfort", *Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 114–123, 2020. https://doi.org/10.21595/jmeacs.2020.21813.
7. N. V. Liem and L. V. Quynh, "Ride comfort performance of heavy truck with three control cases of semi-active isolation systems", *Vibroengineering procedia*, vol. 22, no. 6, pp. 93-98, 2019. https://doi.org/10.21595/vp.2018.20455.
8. T. T. Hung, D. N. Khanh and L. V. Quynh, "Analyzing the effect of vehicle speed and class of random road profile on a 4-axle truck vehicle vibration", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 18, no. 9, pp. 1052-1057, 2023. https://www.arpnjournals.com/jeas/volume_09_2023.htm
9. L. V. Quynh, J. Zhang, X. Liu and Y. Wang, "Nonlinear dynamic analysis of interaction between vehicle and road surfaces for 5-axle heavy truck", *Journal of Southeast University*, vol. 27, no. 4, pp. 405-409, 2011. https://doi.org/10.3969/j.issn.10037985.2011.04.012.
10. M. Agostinacchio, D. Ciampa and S. Olita, "The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach", *Eur. Transp. Res. Rev*, vol. 6, pp. 267–275, 2014. https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8.
11. C. D. Jiang, L. Cheng, S. Fengchun and C. Hongjie, "Simulation of Road Roughness Based on Using IFFT Method", *in 2012 Third World Congress on Software Engineering*, Wuhan, China, 2012, pp. 190-193. https://doi.org/10.1109/WCSE.2012.46.
12. Y. Zhang, Z. Haisheng and L. T. Seng, "A Simple Approach for Simulating the Road Surface Roughness Involved in Vehicle-Bridge Interaction Systems", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 18, no. 7: 1871009, 2018. https://doi.org/10.1142/S0219455418710086.
13. Nguyễn Văn Bình, Tô Viết Thành, (2023), "Khảo sát dao động của ô tô và đặc tính thống kê dao động trên nền đường ngẫu nhiên", *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, Hội nghị Khoa học và Công nghệ Cơ khí - Động lực lần thứ XVI*, Số đặc biệt, tr.183-190

Study on the response of military mobile repair vehicles towing power generator trailers when moving on a random rough road

Abstract: *The research paper investigates the effect of movement speed on the oscillation of mobile repair vehicles towing power generator trailers when traversing random rough terrain. The dynamic model, formulated as a multi-body mechanical system, considers the suspension system and tire elasticity while disregarding the influence of slope and ground deformation. The height profile of the random rough terrain is determined from simulations based on ISO 8068 standards. The system of differential equations is solved using MATLAB simulation software. The results of the study show the oscillation of the mobile repair vehicle combination at speeds of 36 km/h, 42 km/h, 48 km/h, and 54 km/h on random rough roads in class D. These findings provide a basis for improving the suspension system of the power generator trailer in real-world applications to minimize vehicle oscillation. This research holds significant implications for the field of national security and defense.*

Keywords: Military vehicle; random road roughness; three-axle truck; dynamics; multi-body system.

❑

Thiết kế mô hình huấn luyện dẫn động điều khiển hệ thống phanh ô tô bằng thủy lực có trợ lực chân không

Lê Văn Trung[1,*], Trần Thành Lam[1], Lại Việt Anh[1], Đỗ Văn Tứ[1], Nguyễn Mạnh Hùng[1]

[1] Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự

[*] Email: levtrung86@lqdtu.edu.vn, Contact number: 0793193710

Tóm tắt

Bài báo trình bày thiết kế mô hình huấn luyện dẫn động điều khiển hệ thống phanh thủy lực có trợ lực chân không, nhằm hỗ trợ giảng dạy và nghiên cứu trong lĩnh vực kỹ thuật ô tô. Mô hình được thiết kế với cấu trúc trực quan, bao gồm đầy đủ các thành phần chính như bàn đạp phanh, bầu trợ lực chân không, xi lanh phanh chính, đường ống dẫn dầu và cơ cấu phanh bánh xe. Các chi tiết được bố trí khoa học, giúp người học quan sát rõ nguyên lý hoạt động. Hệ thống có thể thực hiện các thí nghiệm kiểm tra áp suất dầu phanh, đánh giá hiệu quả trợ lực và khảo sát một số tình huống gần với thực tế nhờ vào việc bố trí các cảm biến như cảm biến đo góc quay của bàn đạp phanh, cảm biến đo áp suất dầu dẫn động cầu trước và dẫn động cầu sau. Ngoài ra, tác giả cũng xây dựng mô hình 3D bằng phần mềm Autodesk Inventor để mô phỏng cấu tạo, nguyên lý làm việc của hệ thống phanh, kết quả thí nghiệm được thể hiện trên giao diện phần mềm tương tác được xây dựng bằng Visual Studio. Kết quả thử nghiệm cho thấy mô hình hoạt động ổn định, đáp ứng yêu cầu đào tạo ngành kỹ thuật ô tô.

Từ khóa: *Áp suất dẫn động phanh, vị trí bàn đạp phanh, mô hình huấn luyện, mô phỏng*

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, cùng với sự phát triển chung của khoa học kỹ thuật, nền công nghiệp ô tô đã có những bước tiến nhảy vọt, các thiết bị mô phỏng quá trình lái, dao động, phanh, mô phỏng bán tự động... đã phát triển vô cùng mạnh mẽ [1]. Cốt lõi của các hệ mô phỏng này là bộ thiết bị phần cứng chuyên dụng, có chức năng tương tác và xử lý các luồng giữ liệu từ máy tính gửi đến mô hình thực, điều khiển cơ cấu chấp hành, cũng như thu nhận dữ liệu theo chiều ngược lại từ các cảm biến để làm cơ sở xây dựng bộ số liệu đầu vào cho mô hình toán học trong các phần mềm mô phỏng [2]. Đối với lĩnh vực ô tô, có thể kể đến các hệ thống X-in-the-Loop (Brake-in-the-Loop, AWD-in-the-Loop, EPS-in-the-Loop,...) của công ty IPG Automotive, phục vụ rất hiệu quả công tác đào tạo, chuyển giao công nghệ giữa các trường đại học và các tập đoàn công nghiệp trên thế giới [3]; các hệ thống X-Robot (Steering Robot, Braking Robot, Pedal Robot,...) được phát triển bởi Tập đoàn đa quốc gia AB Dynamics [4]. Bên cạnh đó, các hãng cung cấp thiết bị thu thập và xử lý dữ liệu như Dewesoft, National instrument, dSPACE liên tục cho ra đời các sản phẩm thương mại là các mô hình bán tự động với hàm lượng công nghệ cao, đáp ứng được nhu cầu nghiên cứu và phát triển các hệ thống kỹ thuật phức tạp [5]. Tuy nhiên, các sản phẩm này có giá thành rất cao, thời hạn bảo hành ngắn, phát sinh nhiều chi phí khai thác sử dụng như phí nâng cấp phần mềm, hiệu chuẩn và sửa chữa phần cứng [6].

Trong các trường đại học và các cơ sở nghiên cứu trong nước, công tác đào tạo, huấn luyện thí nghiệm, thực hành đóng vai trò quan trọng. Để nâng cao khả năng sẵn sàng làm chủ trang thiết bị cho học viên, sinh viên, cán bộ, kỹ thuật viên, việc xây dựng các mô hình và tiến tới việc bán tự động chúng, kết nối giữa phần cứng và phần mềm trong công tác đào tạo, thí nghiệm, thực hành và huấn luyện là cần thiết bởi hiệu quả kinh tế mang lại trong tình hình ngân sách dành cho giáo dục trong nước còn hạn hẹp [7]. Ứng dụng công nghệ trong hệ mô phỏng HIL giúp rút ngắn

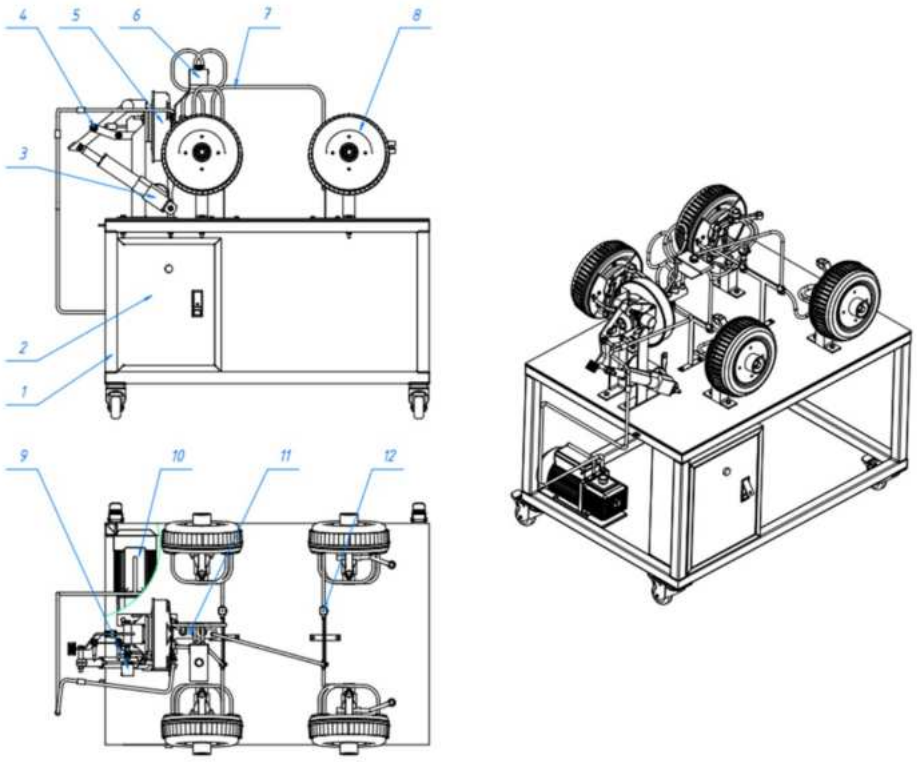
thời gian nghiên cứu, phát triển trong công tác thiết kế, cải tiến và hiện đại hóa trang bị. Nhờ các thiết bị mô phỏng còn có thể tạo ra môi trường ảo, khảo sát các tình huống đặc biệt khó thực hiện được trong thực tế (khảo sát va chạm, chuyển làn tốc độ cao, phanh gấp...) [8]. Trong nước đã xuất hiện khá nhiều các mô hình bán tự động trên cơ sở nhập ngoại [9, 10].

Trên cơ sở đó, nhóm tác giả đã tiến hành thiết kế xây dựng mô hình huấn luyện dẫn động điều khiển hệ thống phanh ô tô bằng thủy lực có trợ lực chân không nhằm phục vụ đào tạo và nghiên cứu cho giảng viên và học viên chuyên ngành Ô tô quân sự tại Học viện. Sử dụng mô hình giúp học viên có một cái nhìn trực quan về các hệ thống, cụm, cơ cấu và chi tiết được học, nắm được cấu tạo và nguyên lý làm việc của hệ thống.

2. Xây dựng mô hình huấn luyện dẫn động điều khiển hệ thống phanh ô tô bằng thủy lực có trợ lực chân không

2.1. Thiết kế mô hình

Dựa trên phương pháp nghiên cứu lý thuyết xác định sơ bộ các thông số động học, động lực học, thông số kết cấu của các cụm tổng thành của hệ thống phanh thủy lực trợ lực chân không. Sử dụng phần mềm Autodesk Inventor xây dựng mô hình mô phỏng thiết kế như sau:



Hình 1. Thiết kế mô hình bán tự động hệ thống phanh thủy lực trợ lực chân không

1. Khung mô hình; 2. Tủ điện; 3. Xi lanh điện; 4. Cảm biến tiệm cận; 5. Bầu trợ lực chân không; 6. Bình dầu; 7. Đường ống; 8. Cơ cấu phanh; 9. Encoder đo góc; 10. Bơm chân không; 11. Xi lanh chính; 12. Cảm biến áp suất

Mô hình thiết kế có kích thước bao: D×R×C = 1214×812×1242 mm. Khung mô hình được chế tạo từ thép C45, được phủ sơn tĩnh điện màu xanh lá. Các cụm của hệ thống phanh thủy lực được gá trên các tấm gá, đảm bảo gá đặt chắc chắn và ổn định khi mô hình làm việc. Để có thể nghiên cứu động học, động lực học của hệ thống đồng thời tự động hóa quá trình làm việc, cần thiết phải bố trí các cảm biến và hệ thống điều khiển và thu thập dữ liệu tương ứng (hình 1):

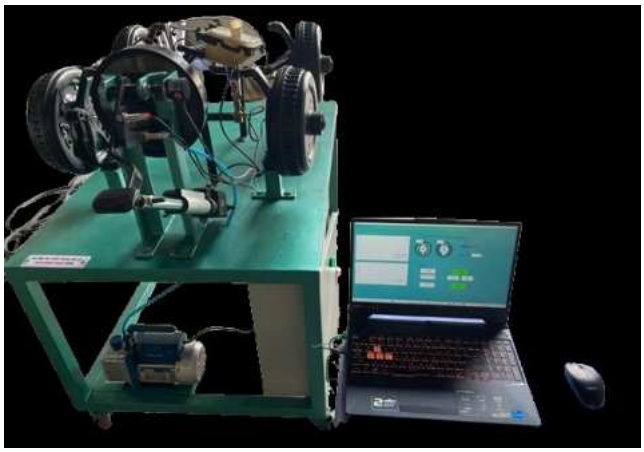
+ Cảm biến áp suất số 01: Giám sát và thu thập thập dữ liệu áp suất đến cầu trước;

+ Cảm biến áp suất số 02 (vị trí 12): Giám sát và thu thập thập dữ liệu áp suất đến cầu sau;

+ Cảm biến tiệm cận số 01 (vị trí 4): Giới hạn hành trình đạp của bàn đạp phanh;

+ Cảm biến tiệm cận số 02: Giới hạn hành trình trả của bàn đạp phanh;

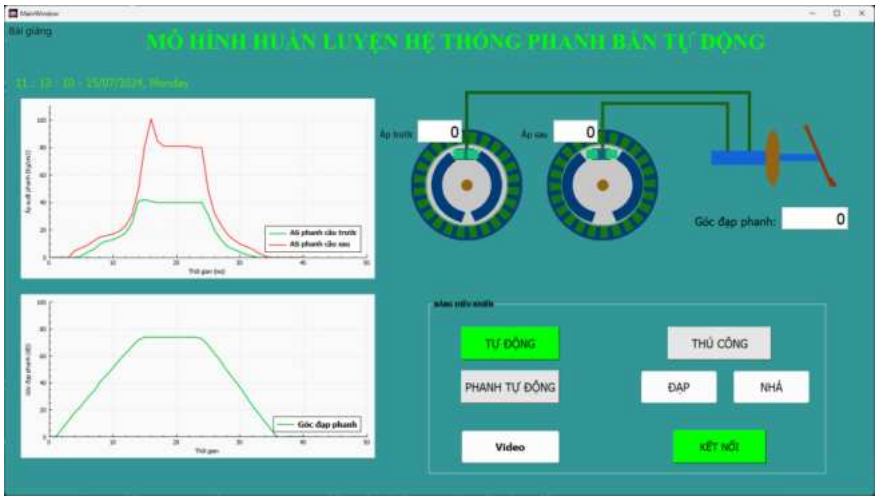
+ Cảm biến góc quay của bàn đạp (vị trí 9): Xác định hành trình bàn đạp;



Hình 2. Mô hình thực tế sau khi chế tạo

2.2. Xây dựng phần mềm tương tác giữa mô hình thực và mô phỏng

Phần mềm tương tác được viết dựa trên nền tảng C#. Sử dụng công cụ Visual Studio để xây dựng giao diện điều khiển.

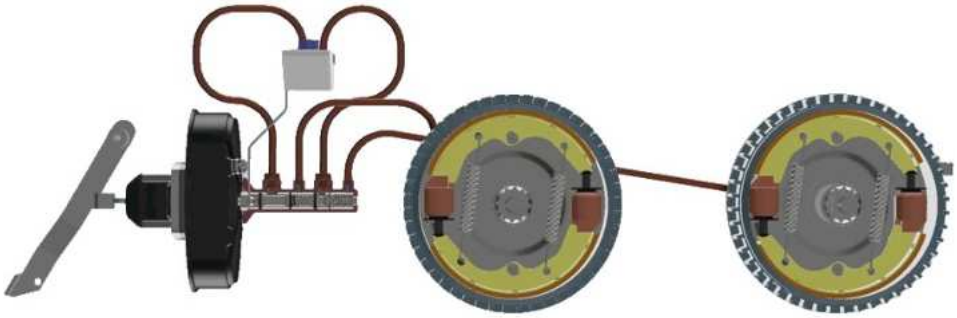


Hình 3. Giao diện phần mềm tương tác

Phần mềm có chức năng thu thập dữ liệu dưới dạng đồ thị và dạng số, các kết quả được lưu lại và xuất ra file .txt để xử lý. Trên giao diện làm việc được xây dựng hai chế độ tương ứng với chế độ tự động và chế độ bằng tay. Với chế độ phanh tự động: Xi lanh được điều khiển tương ứng với quá trình đạp phanh và nhả phanh. Hành trình bàn đạp được giới hạn bởi hai cảm biến tiệm cận để xác định vị trí. Chế độ phanh thủ công tương ứng với từng trường hợp cụ thể: Khi đạp bàn đạp phanh theo thời gian thực, xi lanh sẽ tự động tiến hành cho đến khi người thao tác dừng bàn đạp tại vị trí bất kỳ. Hành trình nhả cũng được tiến hành tương tự. Lúc này áp suất đối với hai dòng dẫn động được thu thập và hiển thị trên màn hình.

Trong quá trình làm việc, do không thể tháo rời và quan sát thực tế các chuyển động bên trong nên để nghiên cứu cụ thể nguyên lý làm việc của các cụm chi tiết chính (bầu trợ lực chân

không, xi lanh phanh chính, xi lanh công tác và cơ cấu phanh), trên phần mềm tương tác có phần video được liên kết và trình chiếu tương ứng với quá trình đạp và nhả phanh. Tín hiệu điều khiển cho video trình chiếu cũng đồng thời là tín hiệu điều khiển xi lanh điện để thực hiện quá trình phanh.



Hình 4. Liên kết quá trình làm việc các cụm, cơ cấu chính bằng mô phỏng

3. Đánh giá kết quả thiết kế và khả năng ứng dụng

3.1. Tính trực quan và khả năng tương tác trong giảng dạy

Mô hình được thiết kế với bố cục hợp lý, giúp người học dễ dàng quan sát từng thành phần trong hệ thống phanh, bao gồm bàn đạp phanh, bầu trợ lực chân không, xy lanh chính, hệ thống đường ống và cơ cấu phanh bánh xe. Các chi tiết được sắp xếp theo nguyên lý thực tế của ô tô, đảm bảo sinh viên có cái nhìn tổng thể về hệ thống.

Mô hình có kích thước tương đối nhỏ gọn, có thể dễ dàng được bố trí trong phòng học, giúp giảng viên có thể kết hợp giảng dạy lý thuyết và hướng dẫn thực hành một cách nhanh chóng và thuận tiện.

Ngoài ra, mô hình còn tích hợp phần mềm tương tác, cho phép người dùng theo dõi quá trình vận hành thông qua giao diện trực quan. Sinh viên có thể điều chỉnh các thông số đầu vào, mô phỏng tình huống thực tế và quan sát sự thay đổi trong hệ thống. Điều này giúp tăng cường khả năng thực hành và hiểu sâu hơn về nguyên lý hoạt động của hệ thống phanh.

3.2. Khả năng thực hiện các bài thực hành, thí nghiệm

Mô hình được trang bị các cảm biến hiện đại, bao gồm:

Cảm biến áp suất dầu phanh ở cầu trước và cầu sau, giúp theo dõi sự phân bố lực phanh trong quá trình vận hành. Điều này hỗ trợ việc đánh giá hiệu suất phanh cũng như nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến độ ổn định của mô hình.

Cảm biến đo góc quay bàn đạp phanh, giúp xác định mối quan hệ giữa lực tác động của người lái và áp suất dầu phanh, từ đó phân tích đặc tính trợ lực và độ nhạy của hệ thống phanh.

Dữ liệu từ các cảm biến này được thu thập và hiển thị trên phần mềm tương tác, hỗ trợ học viên thực hiện các thí nghiệm, đo đạc và phân tích kết quả một cách chính xác.

3.3. Khả năng áp dụng trong giảng dạy tại các trường đại học

Mô hình có tính ứng dụng cao trong đào tạo ngành kỹ thuật ô tô tại các trường đại học, đặc biệt là các học phần liên quan đến hệ thống phanh và an toàn chuyển động. Nhờ thiết kế trực quan và khả năng tương tác bằng phần mềm, giảng viên có thể dễ dàng minh họa nguyên lý hoạt động, mô phỏng các tình huống thực tế và hướng dẫn học viên, sinh viên thực hành đo đạc, phân tích dữ liệu động lực học.

Ngoài ra, mô hình cũng hỗ trợ nghiên cứu chuyên sâu về hệ thống phanh, giúp người học tiếp cận các công nghệ cảm biến hiện đại và kỹ thuật điều khiển trong lĩnh vực ô tô. Điều này không chỉ nâng cao chất lượng giảng dạy mà còn tạo nền tảng cho các nghiên cứu ứng dụng trong ngành công nghiệp ô tô.

4. Kết luận

Nội dung bài báo đã giải quyết được các mục tiêu đề ra ban đầu, cụ thể như sau:

- Đã nghiên cứu, phân tích và lựa chọn được phương án thiết kế mô hình huấn luyện dẫn động điều khiển hệ thống phanh ô tô bằng thủy lực có trợ lực chân không.

- Mô hình có tính sư phạm: Thông qua mô phỏng và mô hình thực tế, giúp người học có cái nhìn trực quan về hệ thống, hiểu rõ bản chất quá trình làm việc của hệ thống. Bên cạnh đó, với khả năng tương tác cao, tích hợp cảm biến hiện đại và phần mềm mô phỏng, mô hình không chỉ hỗ trợ giảng dạy hiệu quả mà còn tạo điều kiện cho học viên, sinh viên thí nghiệm, thực hành và nghiên cứu khoa học.

- Mô hình mang đến khả năng ứng dụng rộng rãi tại các cơ sở đào tạo.

Kiến nghị

Tác giả kiến nghị được tiếp tục nghiên cứu đầy đủ và chuyên sâu hơn. Về mặt thực hành: Bố trí động cơ lai giúp thực quá trình phanh động, khảo sát thêm các giá trị về lực và mô men phanh. Về mặt lý thuyết: Tiến hành xây dựng mô hình toán học, ứng dụng phần mềm Matlab - Simulink hoặc Simcenter Amesim để khảo sát thực tế bằng lý thuyết sau đó đối chiếu với kết quả đo trên mô hình, để xuất các giải pháp nhằm nâng cao chất lượng của hệ thống phanh thủy lực trợ lực chân không.

Tài liệu tham khảo

1. Dankan, V. G. (2018). Automotive braking system simulations V diagram approach. International Journal of Engineering & Technology, August 2018. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.15666.
2. Dygalo, V. G., Keller, A. V. and Zavatskiy, A. M. (2020). HIL models formation principle in the design of automated vehicle braking system. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 819 012040. https://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012040.
3. Taehun H., Jihoon R. (2016). Development of HILS Systems for Active Brake Control Systems. 2016 SICE-ICASE International Joint Conference. https://doi.org/10.1109/SICE.2006.314663.
4. Cheli, F., Concas, A., Giangiulio, E., Sabbioni E. (2008). A simplified ABS numerical model: Comparison with HIL and full scale experimental tests. Computers & Structures, Volume 86, Issues 13–14, July 2008, pp. 1494-1502. https://doi.org/10.1016/j.compstruc. 2007.07.010.
5. Vũ Đức Lập, Phạm Đình Vi. (1996). Thử nghiệm xe. Hà Nội, HVKTQS.
6. Nguyễn Phúc Hiểu. (2002). Lý thuyết ô tô quân sự. Hà Nội, NXB Quân đội nhân dân.
7. Nauri, I. M., Sumarli, Ihwanudin, M., Mindarta, E. K., Harly, M., Putra, A. B., Awanggapati, B., and Ismail, H. (2020). Development of integrated hardware-in-the-loop (hil) testbench anti-lock brake system (abs) instrument, Journal of Physics: Conference Series 1700 012097. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1700/1/012097.

8. Amir S., Francis A. (2016). A Hardware-in-the-Loop Facility for Integrated Vehicle Dynamics Control System Design and Validation. IFAC-PapersOnLine. Volume 49, Issue 21, 2016, pp. 32-38. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.507.
9. https://www.vector.com/int/en/products/products-a-z/hardware/vt-system/steering-and-brake-hils/.
10. https://www.dspace.com/en/pub/home/applicationfields/ind-appl/automotive-industry/chassis/bra-kingsystems.cfm.

Design of training model for automobile brake system by hydraulic drive with vacuum booster

Tóm tắt: *The article presents the design of training model for automobile brake system by hydraulic drive with vacuum booster, to support teaching and research in the field of automotive engineering. The model is designed with an intuitive structure, including all the main components such as the brake pedal, vacuum booster, main brake cylinder, oil pipe and wheel brake mechanisms. These components are scientifically arranged, helping learners clearly observe the operating principle. The system can perform experiments to test brake oil pressure, evaluate the effectiveness of the booster and survey some situations close to reality thanks to the arrangement of sensors such as the sensor measuring the angle of the brake pedal, the sensor measuring the oil pressure of the front and rear axles. In addition, the author also built a 3D model using Autodesk Inventor software to simulate the structure and working principle of the brake system, the experimental results are shown on the interactive software interface built with Visual Studio. The test results show that the model operates stably, meeting the requirements of training in automotive engineering.*

Từ khoá: Brake pressure, brake pedal position, training model, simulation.

❑

Mô phỏng động lực học quay vòng ô tô KAMAZ-43253 bằng phần mềm Matlab-Simulink

Bạch Kiên Trung[1], TS. Vũ Mạnh Dũng[1]
[1]Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự
* Email: bachkientrung83@gmail.com, Số điện thoại: 0974170202

Tóm tắt

Mô hình động lực học quay vòng của xe Kamaz-43253 được xây dựng bằng Matlab-Simulink nhằm mô phỏng điều kiện hoạt động thực tế khi xe quay vòng. Qua đó, phân tích các thông số ảnh hưởng đến độ ổn định và an toàn. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự thay đổi của các thông số có tác động lớn đến khả năng quay vòng, làm cơ sở để cải thiện hiệu suất và đề xuất giải pháp tối ưu. Đây là phương pháp hiệu quả để cải tiến thiết kế và điều chỉnh thông số kỹ thuật, nâng cao hiệu suất cũng như độ an toàn khi vận hành xe.

Từ khóa: *Động lực học quay vòng, Matlab-Simulink, Góc đánh lái, thông số kỹ thuật, Gia tốc xe, Độ ổn định xe, Độ an toàn xe.*

1. Đặt vấn đề

Trong quá trình di chuyển của ô tô, khi đi vào quay vòng có nhiều nguy cơ có thể là đánh lái thiếu hoặc thừa, làm cho quỹ đạo của xe ô tô không chính xác. Khi xe chuyển động trên nền đường không bằng phẳng hoặc quay vòng, dưới tác dụng của lực theo phương ngang, làm các lốp bị biến dạng, tạo ra góc lệch bên của bánh xe cầu trước và bánh xe cầu sau, dẫn đến bán kính quay vòng thực tế khác với bán kính quay vòng lý thuyết tạo ra sự sai lệch về quỹ đạo chuyển động của ô tô. Khi đã quay vành lái thích hợp với cung cong của mặt đường nhưng tình trạng chuyển động xảy ra với bán kính quay vòng lớn hơn dẫn tới cần phải quay thêm thân xe *(trạng thái quay vòng thiếu)*. Ngược lại, khi đã quay vành lái thích hợp với cung cong của mặt đường nhưng tình trạng chuyển động xảy ra với bán kính quay vòng nhỏ hơn dẫn tới cần phải giảm sự quay thân xe *(trạng thái quay vòng thừa)*. Trạng thái này rất nguy hiểm vì có khả năng gây nên tăng gia tốc bên quá lớn và có thể lật xe, lái xe thiếu kinh nghiệm khó có khả năng hiệu chỉnh.

Từ tình hình thực tế trên, cần phải có sự đánh giá độ ổn định của xe ô tô khi quay vòng, đặc biệt với ô tô tải khi vận chuyển hàng hoá làm thay đổi trọng tâm xe, cũng như lực quán tính ly tâm là khá lớn khi quay vòng, điển hình cho xe tải được sử dụng phổ biến trong Quân đội ta hiện nay là Kamaz-43253 hai cầu với cầu sau chủ động. Vì vậy, việc xây dựng mô hình lý thuyết bằng phương trình toán học và tính toán mô phỏng bằng máy tính sát với thực tế nhất để đánh giá, kiểm nghiệm động lực học quay vòng thực tế của xe nói trên là vô cùng quan trọng và cấp thiết. Từ đó, bài báo "Mô phỏng động lực học quay vòng ô tô Kamaz-43253 bằng phần mềm Matlab-Simulink" đã được nêu ra để giải quyết vấn đề trên, đồng thời giúp cho người điều khiển xe có cái nhìn trực quan, sinh động về quá trình quay vòng của loại xe này, từ đó xây dựng các qui định, điều kiện đảm bảo an toàn khi quay vòng.

2. Cơ sở lý thuyết

Tác giả đưa ra các giả thiết nhằm đơn giản hóa bài toán nhưng vẫn đảm bảo đánh giá được vấn đề đặt ra, cụ thể như sau:

2.1. Mô hình xe có 2 trục *(cầu sau chủ động)* là đối xứng theo trục dọc của xe bỏ qua ảnh hưởng của độ lệch trọng tâm theo phương ngang;

2.2. Đối với các bài toán chuyển động trong mặt phẳng đường, trong trạng thái chuyển động với góc lắc ngang nhỏ, học viên đề xuất giả thiết khung xe cứng tuyệt đối để đơn giản hóa trong quá trình xây dựng mô hình;

2.3. Thân xe được coi như một tấm phẳng có khối lượng M đặt tại trọng tâm. Trong trường hợp tổng quát, thân xe có 6 chuyển động *(6 bậc tự do)* bao gồm: 3 chuyển động tịnh tiến theo các trục x *(trục dọc)*, y *(trục ngang)*, z *(trục thẳng đứng)* và 3 góc xoay tương ứng: φ *(góc lắc dọc - quay quanh trục y)*, β *(góc lắc ngang - quay quanh trục x)*, ψ *(góc lệch bên - quay quanh trục z)*;

2.4. Thân xe được nối với các cầu xe thông qua hệ thống treo đặc trưng bởi các độ cứng C_{ij} và hệ số cản giảm chấn K_{ij} *(chỉ số i: 1-trước; 2-sau; chỉ số j: 1-trái; 2-phải)*;

2.5. Các cầu xe *(cầu trước i=1, cầu sau i=2)* là các khối lượng không được treo được coi như các thanh phẳng, có khối lượng m_{A1}, m_{A2} đặt tại trọng tâm của chúng. Mỗi cầu xe có 01 chuyển động tịnh tiến theo trục thẳng đứng *(ξ_{A1}, ξ_{A2})* và 01 chuyển vị góc lắc ngang quanh trục dọc *(β_{A1}, β_{A2})*. Bỏ qua chuyển động tịnh tiến theo trục dọc và trục ngang; góc xoay của cầu xe theo trục thẳng đứng và trục ngang;

2.6. Cầu xe liên kết với mặt đường bằng bánh xe đàn hồi, đặc trưng bởi độ cứng C_{Lij};

2.7. Các bánh xe kép được quy về bánh xe đơn;

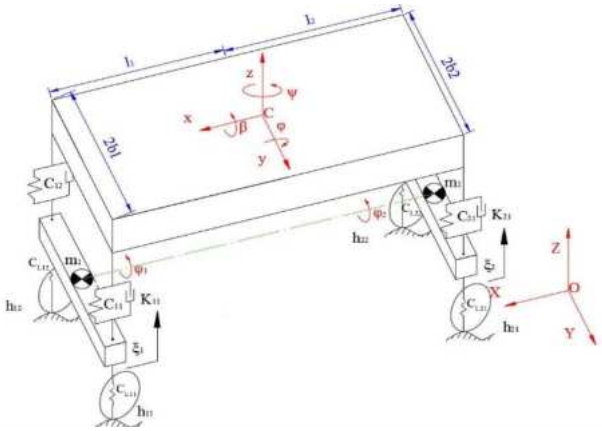
2.8. Bỏ qua ảnh hưởng của độ rơ vành tay lái và tốc độ đánh lái;

2.9. Đường phẳng và cứng tuyệt đối với chiều cao mấp mô mặt đường bằng 0;

2.10. Bỏ qua lực cản khí động theo phương ngang *(lực gió ngang F_{wy})*.

2.11. Chuyển động phương dọc của cầu xe tương đương với chuyển động dọc của khối lượng được treo tương ứng.

Từ các giả thiết trên, xác định mô hình khảo sát như *hình 1*, là mô hình không gian gồm 14 bậc tự do, bao gồm: 3 bậc tự do x, y, z *(tịnh tiến dọc theo trục Cx, ngang theo trục Cy, thẳng đứng Cz)* cho khối lượng M của xe nghiên cứu; 3 bậc tự do β, φ, ψ *(lắc ngang theo trục Cx, lắc dọc theo trục Cy, quay quanh trục Cz)* cho khối lượng m của khối lượng được treo của xe Kamaz-43253; 2 bậc tự do ξ_{Ai}, β_{Ai} cho m_{Ai} là các cầu xe *(thẳng đứng theo trục $A_{iz}A_i$ và lắc ngang quanh trục $A_{ix}A_i$) (i=1:2)*; 4 bậc tự do φ_{11}, φ_{12}, φ_{21}, φ_{22} cho mỗi bánh xe mô tả góc quay bánh xe *(bốn bánh xe)*.



Hình 1. Mô hình khảo sát

Áp dụng hệ phương trình Newton Euler [1] cho xe với khối lượng M *(bao gồm khối lượng được treo và các khối lượng không được treo)* trong mặt phẳng đường. Với 3 bậc tự do ta thiết lập được 3 phương trình mô tả chuyển động của xe trong mặt phẳng song song với mặt đường *(hình 2)*.

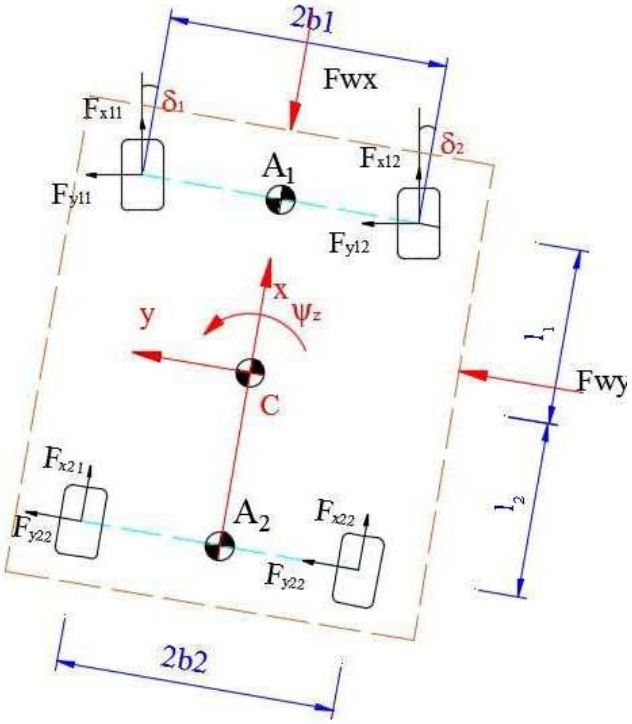
$$M(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\psi}) = F_{x11}\cos\delta_{11} - F_{y11}\sin\delta_{11} + F_{x12}\cos\delta_{12} - F_{y12}\sin\delta_{12} + F_{x21} + F_{x22} - F_{wx} \quad (1)$$

$$M(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\psi}) = F_{x11}\sin\delta_{11} + F_{y11}\cos\delta_{11} + F_{x12}\sin\delta_{12} + F_{y12}\cos\delta_{12} + F_{y21} + F_{y22} + F_{wy} \quad (2)$$

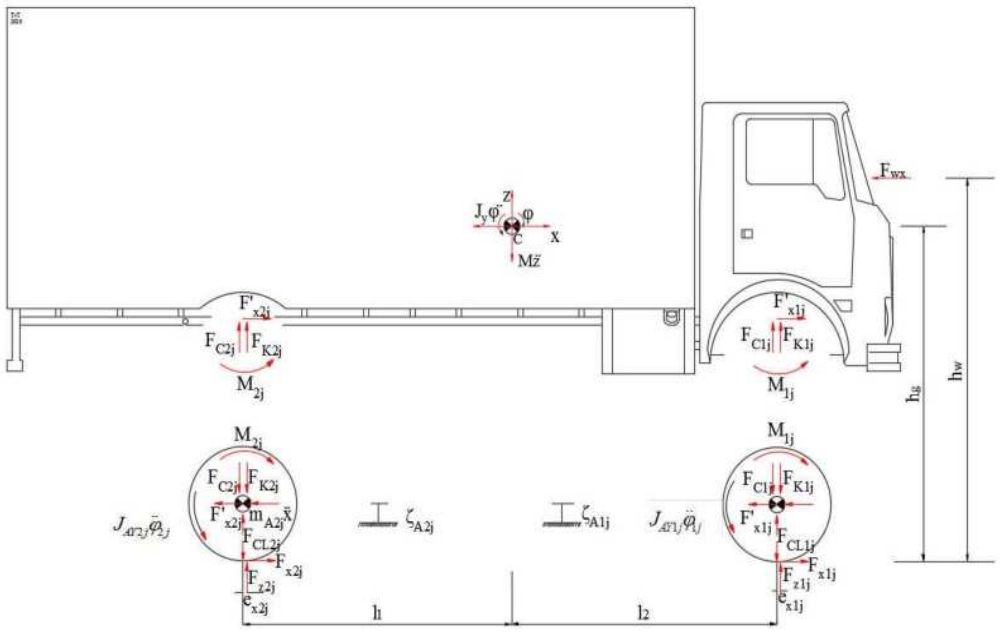
$$J_z\ddot{\psi} = [(F_{x12}\cos\delta_{12} - F_{y12}\sin\delta_{12}) - (F_{x11}\cos\delta_{11} - F_{y11}\sin\delta_{11})]b_1 + (F_{x22} - F_{x21})b_2 + [(F_{x11}\sin\delta_{11} + F_{y11}\cos\delta_{11}) + (F_{x12}\sin\delta_{12} + F_{y12}\cos\delta_{12})]l_1 - (F_{y21} + F_{y22})l_2 + F_{wy}l_{wy} \quad (3)$$

Trong đó: δ_{11} , δ_{12} : Góc quay bánh xe dẫn hướng bên trái và bên phải; F_{xij} : Phản lực từ mặt đường tác dụng lên bánh xe thứ ij (i=1÷2, j=1÷2) theo phương dọc; F_{yij}: Phản lực từ mặt đường tác dụng lên bánh xe thứ ij (i=1÷2, j=1÷2) theo phương ngang; F_{zij}: Phản lực từ mặt đường tác dụng lên bánh xe thứ ij (i=1÷2, j=1÷2) theo phương thẳng đứng; F_{wx}: Lực khí động theo phương dọc *(gió dọc)*; F_{wy}: Lực khí động theo phương ngang *(gió ngang)*.

Áp dụng hệ phương trình Newton Euler trong mặt phẳng dọc (Cxz) cho phần khối lượng được treo đặc trưng bởi khối lượng m đặt tại trọng tâm thân xe. Trọng tâm này thực hiện hai chuyển động là dao động thẳng đứng (z) và góc lắc dọc (φ) *(hình 3)*.



Hình 2. Mô hình lực tác động lên xe trong mặt phẳng song song



Hình 3. Mô hình các lực tác động trong mặt phẳng dọc

Phương trình vi phân mô tả dao động thẳng đứng của trọng tâm phần khối lượng được treo được viết như sau:

$$m\ddot{z} = F_{C11} + F_{K11} + F_{C12} + F_{K12} + F_{C21} + F_{K21} + F_{C22} + F_{K22} \quad (4)$$

Đối với góc lắc dọc thân xe ta cần xác định các thành phần mô men gây ra góc này. Các thành phần này gồm có các lực liên kết hệ treo trước sau, các lực dọc tại điểm treo trên của xe. Phương trình xác định góc lắc dọc được viết như sau:

$$\begin{aligned} J_y\ddot{\varphi} &= (F_{C21} + F_{K21} + F_{C22} + F_{K22})l_2 - (F_{C11} + F_{K11} + F_{C12} + F_{K12})l_1 \\ &-(F_{x11}\cos\delta_{11} + F_{x12}\cos\delta_{12} - F_{y11}\sin\delta_{11} - F_{y12}\sin\delta_{12})(h_g - r_1) \\ &-(h_g - r_2)(F_{x21} + F_{x22}) - (M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}) - F_{wx}(h_w - h_g) \end{aligned}$$

Trong đó:

- F_{Cij} và F_{Kij} là lực đàn hồi và lực cản giảm chấn của hệ thống treo gần bánh xe thứ ij (i=1÷2, j=1÷2). Các lực này được xác định từ các chuyển vị trên và dưới của hệ thống treo. M_{ij}: Mô men quay bánh xe thứ ij quanh trục y (i=1÷2, j=1÷2); F_{CLij}: Lực đàn hồi lốp bánh xe thứ ij (i=1÷2, j=1÷2); r_1, r_2: Bán kính động lực học của các bánh xe trước và sau; h_w: Chiều cao tâm khí động; h_g: Chiều cao trọng tâm xe; l_{wx}: Khoảng cách từ tâm khí động đến trọng tâm xe theo phương x; F_{wz}: Lực nâng do không khí tạo ra theo phương thẳng đứng; M_{wy}: Mô men quay của lực khí động quanh trục y;

Xét trong mặt phẳng ngang (Cyz), phần khối lượng được treo thêm một chuyển động là lắc ngang. Mỗi khối lượng không được treo i (trước/sau) có 2 chuyển động là thẳng đứng (ξ_{A1}) và lắc ngang (β_{A1}).

Góc lắc ngang của khối lượng được treo được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} J_x\ddot{\beta} &= (F_{C11} + F_{K11} - F_{C12} - F_{K12})w_1 + (F_{C21} + F_{K21} - F_{C22} - F_{K22})w_2 \\ &-F_{wy}(h_w - h_g) - M_{wx} + F_{R1}(h_g - h_{R1}) + F_{R2}(h_g - h_{R2}) - M_{T1} - M_{T2} \end{aligned} \quad (6)$$

Đối với các cầu trước và cầu sau được xét hai bậc tự do là dao động thẳng đứng (ξ_{Ai}) và góc lắc ngang (β_{Ai}). Đối với cầu trước được viết như sau:

$$m_{A1}\ddot{\xi}_{A1} = (F_{CL11} + F_{CL12}) - (F_{C11} + F_{K11} + F_{C12} + F_{K12}) \quad (7)$$

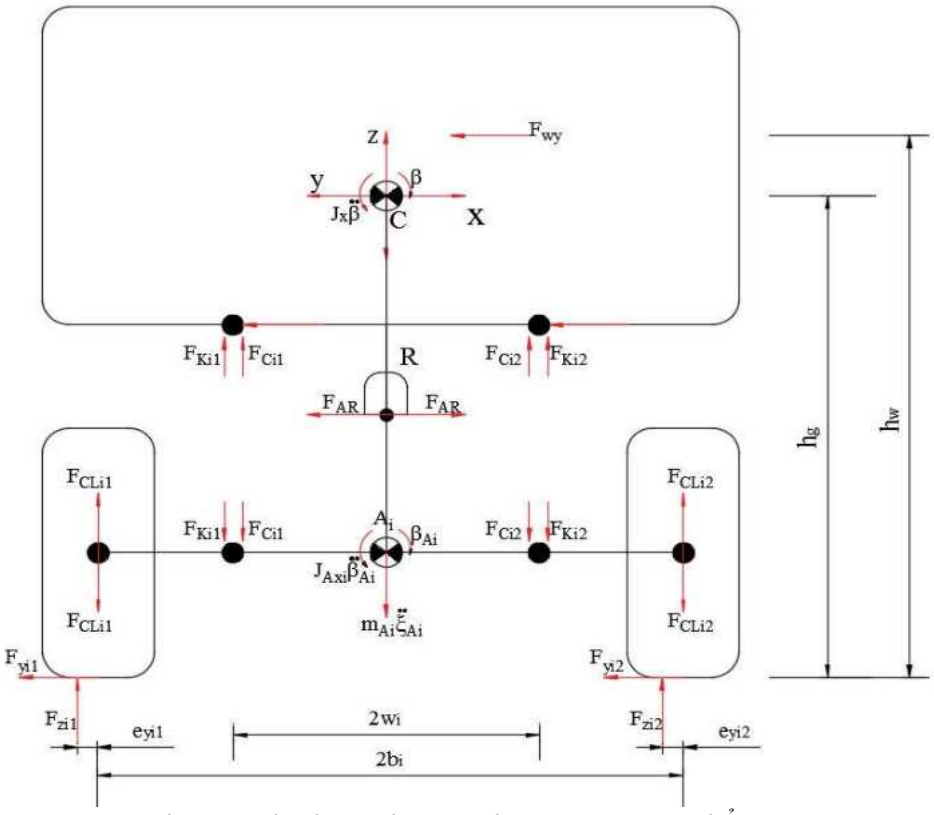
$$J_{Ax1}\ddot{\beta}_{A1} = (F_{C12} + F_{K12} - F_{C11} - F_{K11})w_1 + (F_{CL11} - F_{CL12})b_1 + (F_{y11}\cos\delta_{11} + F_{x11}\sin\delta_{11} + F_{y12}\cos\delta_{12} + F_{x12}\cos\delta_{12})r_1 - F_{R1}(h_{R1} - r_1) + M_{T1} \quad (8)$$

Đối với cầu sau được viết như sau:

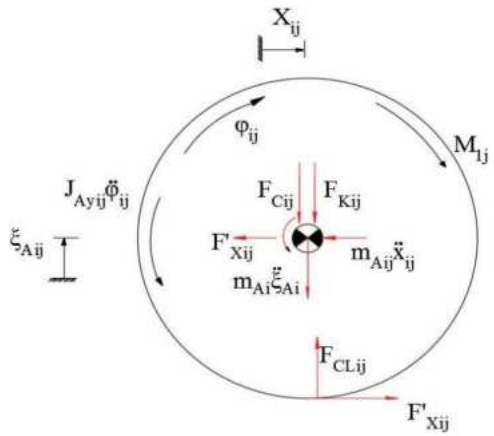
$$m_{A2}\ddot{\xi}_{A2} = (F_{CL21} + F_{CL22}) - (F_{C21} + F_{K21} + F_{C22} + F_{K22}) \quad (9)$$

$$J_{Ax2}\ddot{\beta}_{A2} = (F_{C22} + F_{K22} - F_{C21} - F_{K21})w_2 + (F_{CL21} - F_{CL21})b_2 + (F_{y21} + F_{y22})r_2 - F_{R2}(h_{R2} - r_2) + M_{T2} \quad (10)$$

Nghiên cứu động lực học ô tô cần thiết phải xác định được tính chất liên kết giữa lốp và đường bởi các các lực này trực tiếp gây ra chuyển động của ô tô. Chuyển động xe được xác định bởi các lực tương tác bánh xe với đường F_{xij}, F_{yij}, F_{zij}. Chuyển động của bánh xe có được nhờ mô men Mij *(mô men kéo hoặc mô men phanh)* và trạng thái mặt đường *(hệ số bám dọc* $\varphi_{x\max}$ *và hệ số bám ngang* $\varphi_{y\max}$*).* Mô men M_{ij} làm cho bánh xe quay quanh trục y của bánh xe. Tuy nhiên, do tương tác bánh xe với đường là có trượt nên chuyển động quay của bánh xe độc lập với chuyển động tịnh tiến của nó, nghĩa là khi lăn, bánh xe có trượt và tổn hao vận tốc. Do đó khi mô phỏng cần thiết lập mô hình động lực học bánh xe *(hình 5)*.



Hình 4. Mô hình các lực tác động trong mặt phẳng ngang



Hình 5. Mô hình động lực học bánh xe đàn hồi

Từ mô hình động lực học bánh xe trong mặt phẳng thẳng đứng, phương trình tổng quát về cân bằng mô men theo trục y để xác định góc xoay của bốn bánh xe.

Phương trình cân bằng mô men theo trục y của bánh xe 11:

$$J_{Ay11}\ddot{\varphi}_{11} = M_{11} - (F_{x11} + fF_{z11})r_{11} \quad (11)$$

Phương trình cân bằng mô men theo trục y của bánh xe 12:

$$J_{Ay12}\ddot{\varphi}_{12} = M_{12} - (F_{x12} + fF_{z12})r_{12} \quad (12)$$

Phương trình cân bằng mô men theo trục y của bánh xe 21:

$$J_{Ay21}\ddot{\varphi}_{21} = M_{21} - (F_{x21} + fF_{z21})r_{21} \quad (13)$$

Phương trình cân bằng mô men theo trục y của bánh xe 22:

$$J_{Ay22}\ddot{\varphi}_{22} = M_{22} - (F_{x22} + fF_{z22})r_{22} \quad (14)$$

3. Mô phỏng động lực học quay vòng bằng matlab-simulink

Bài báo lựa chọn loại xe Kamaz-43253 làm đối tượng khảo sát với các thông số khảo sát theo bảng 1. Một số thông số kích thước được trích dẫn từ thông số trong sách [5] và tài liệu [6] có kết hợp với việc đo đạc trực tiếp. Một số thông số kết cấu như hệ thống treo, độ cứng lốp xe... được tham khảo từ các xe có tải trọng tương đương [2]. Mô hình động lực học gồm 14 phương trình được mô hình hóa trong Simulink như hình vẽ:



Hình 6. Mô hình mô phỏng trong Matlab-Simulink

Bảng 1. Các thông số đầu vào xe khảo sát

TT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Hệ số cản lăn	f		0,015
2	Gia tốc trọng trường	g	m/s^2	9,81
3	Kích thước bao xe	DxRxC	m	8,95x2,5x3,2
4	Chiều dài cơ sở	L_1	m	5,58
5	Khoảng cách từ trọng tâm xe đến cầu trước	l_1	m	3,787
6	Khoảng cách từ trọng tâm xe đến cầu sau	l_2	m	1,793
7	Vết bánh trước	$2b_1$	m	1,85
8	Vết bánh sau	$2b_2$	m	2,1
9	Khoảng cách hai chốt nhíp trước	$2w_1$	m	1,0
10	Khoảng cách hai chốt nhíp sau	$2w_2$	m	1,2
11	Loại lốp			10.00 - R20
12	Trọng lượng toàn bộ *(tổng tải trọng)*	M	kg	16500
13	Khối lượng được treo	m	kg	15205
14	Khối lượng không được treo cầu trước	m_{A1}	kg	530
15	Khối lượng không được treo cầu sau	m_{A2}	kg	765
16	Độ cứng của nhíp trước	C_{11}, C_{12}	N/m	250000
17	Độ cứng của nhíp sau	C_{21}, C_{22}	N/m	700000
18	Hệ số cản giảm chấn của hệ thống treo trước	K_{11}, K_{12}	Ns/m	15000
19	Độ cứng hướng kính lốp trước	C_{L11},C_{L12}	N/m	980000
20	Độ cứng hướng kính lốp sau	C_{L21},C_{L22}	N/m	1960000
21	Mô men quán tính trục x của khối lượng được treo	J_x	kgm^2	12695
22	Mô men quán tính trục y của khối lượng được treo	J_y	kgm^2	49084
23	Mô men quán tính trục z của khối lượng được treo	J_z	kgm^2	55650
24	Mô men quán tính trục x của khối lượng không được treo cầu trước	J_{Ax1}	kgm^2	335
25	Mô men quán tính trục x của khối lượng không được treo cầu sau	J_{Ax2}	kgm^2	305

Với mục tiêu nghiên cứu xác định khả năng quay vòng của xe, chuyên đề mô phỏng mô hình động lực học xe khi quay vòng trong một điều kiện đường có hệ số bám là 0,8 theo điều kiện với mô hình lốp Pacejka.

Bảng 2. Các phương án mô phỏng

Thông số / *Phương án*	$\delta_A(^0)$	$\Delta t(s)$	v(km/h)
Phương án 1: *Mô phỏng khi xe quay vòng với góc quay bánh xe dẫn hướng không đổi*	5	2	50
Phương án 2: *Mô phỏng khi xe quay vòng với góc quay bánh xe dẫn hướng thay đổi*	[1....3]	2	50

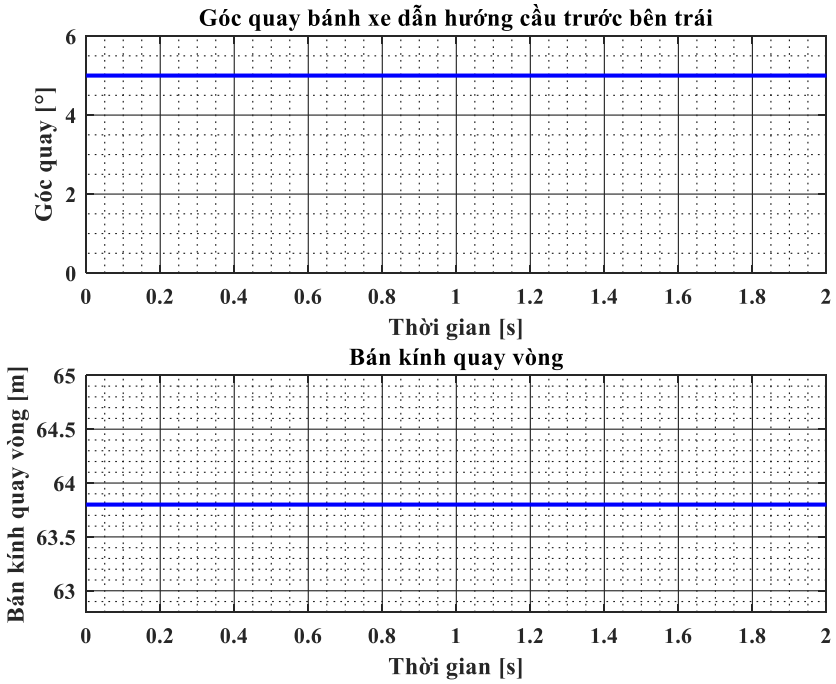
Một số phương án được đưa ra bao gồm:

+ Trong phương án 1, mô phỏng khi ô tô chuyển động với vận tốc 50 km/h với góc quay bánh xe dẫn hướng cầu trước $\delta_A=5^0$ không đổi trong quá trình quay vòng.

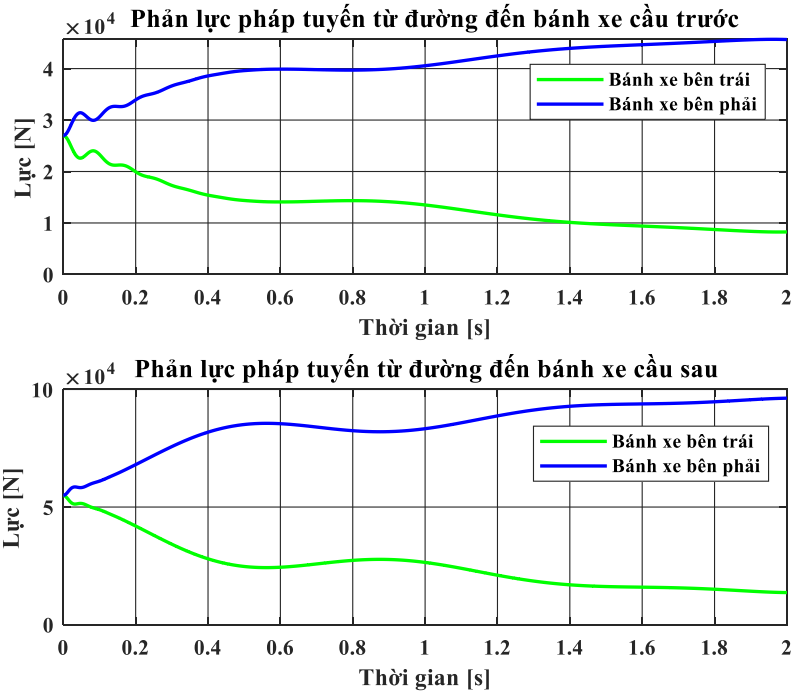
+ Trong phương án 2, mô phỏng với góc quay bánh xe dẫn hướng cầu trước $\delta_A = [1^0...3^0]$ ở vận tốc v=50km/h.

*** Trường hợp 1**

Khảo sát với góc lái không đổi với δ_A bằng 5^0, tần số đánh lái trên đường có hệ số bám φ_{xmax} bằng 0,8; ở vận tốc 50 km/h. Kết quả khảo sát cho thấy, theo thời gian thì các thông số phản ứng như gia tốc ngang a_y, vận tốc góc quay thân xe $\dot{\psi}$,... biến đổi tương ứng *(hình 7, 8, 9)*.

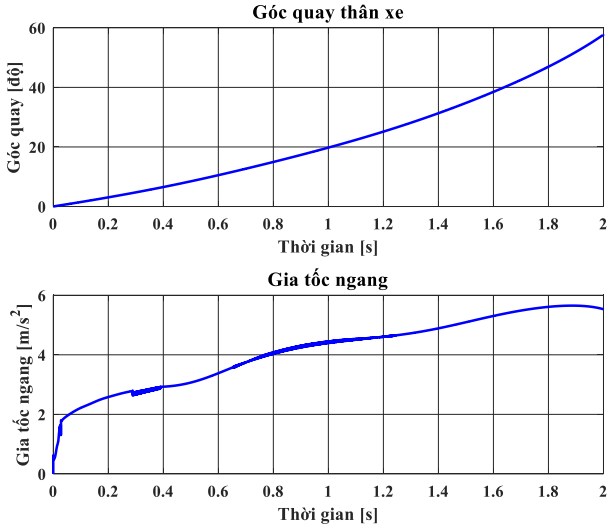


Hình 7. Đồ thị góc δ_{11} và bán kính quay vòng



Hình 8. Đồ thị phản lực pháp tuyến từ đường

Đồng thời, phản lực pháp tuyến ở các bánh xe có sự thay đổi *(hình 8)*. Phản lực pháp tuyến của các bánh xe cầu sau lớn hơn bánh xe cầu trước, là điều hiển nhiên với ô tô vận tải. Phản lực pháp tuyến ở các bánh xe cầu bên phải tăng theo thời gian, ở các bánh xe bên trái giảm theo thời gian, thể hiện xu hướng xe quay vòng hướng bên phải. Khi phản lực pháp tuyến bằng 0 thì xe có xu hướng tách bánh và có khả năng lật.

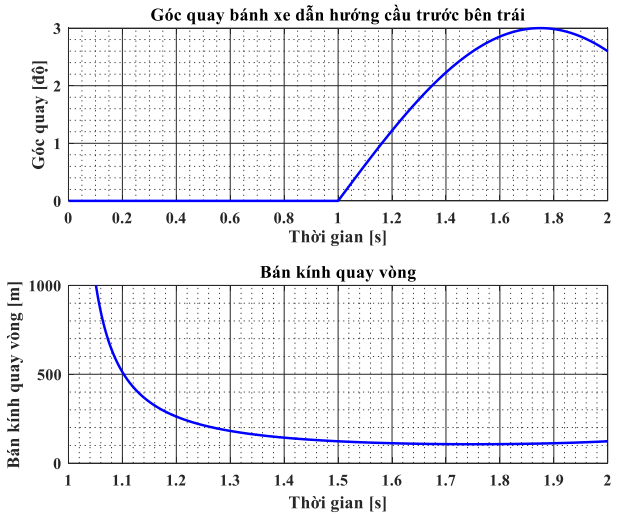


Hình 9. Đồ thị gia tốc ngang và góc quay thân xe

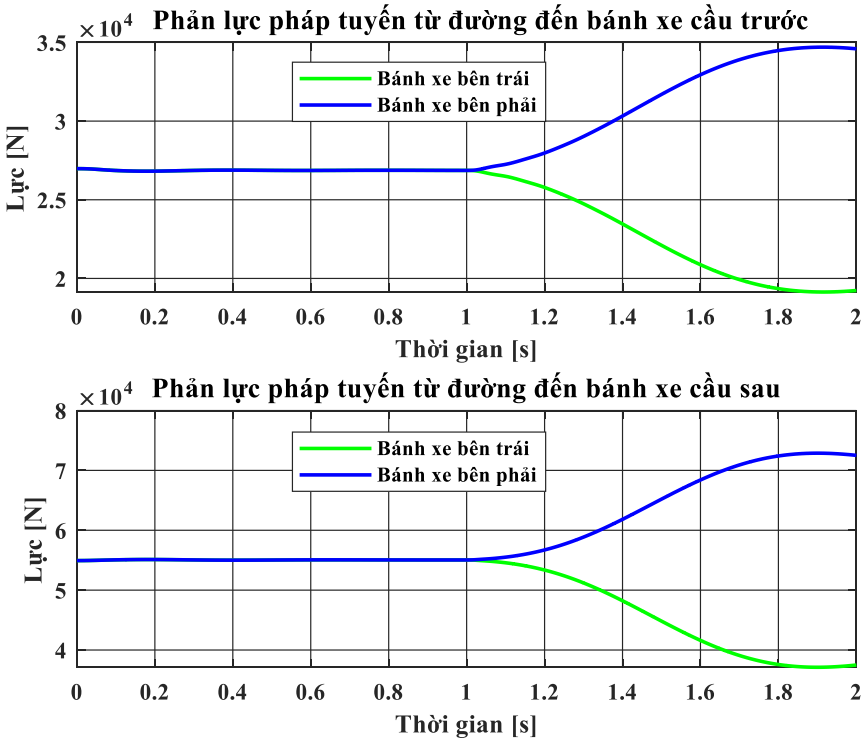
Khi góc quay bánh xe dẫn hướng δ_{11} không đổi, thì gia tốc ngang ay tăng lên tương ứng theo thời gian, kéo theo lực ly tâm cũng tăng lên tương ứng. Từ đồ thị nhận thấy chỉ sau 2 giây, giá trị của gia tốc ngang đã xấp xỉ 6 m/s^2 sau đó giảm xuống theo quy luật góc lái. Sự thay đổi của góc xoay thân xe ψ được thể hiện trong đồ thị *(hình 9)*. Từ đồ thị có thể thấy rằng giá trị này thay đổi liên tục theo thời gian.

*** Trường hợp 2**

Mô phỏng trường hợp xe đi thẳng rồi bắt đầu quay vòng đến góc đánh lái lớn nhất $\delta_A=3^0$ với tần số đánh lái f bằng 0,33Hz *(thời gian đánh lái Δt bằng 2s)* khi xe chuyển động với vận tốc v bằng 50 km/h trong điều kiện đường có hệ số bám thấp với φ_{xmax} bằng 0,8. Quy luật đánh lái được thể hiện như *hình 10*. Bán kính quay vòng thay đổi từ vô cùng lớn đến một giá trị khoảng 100m.

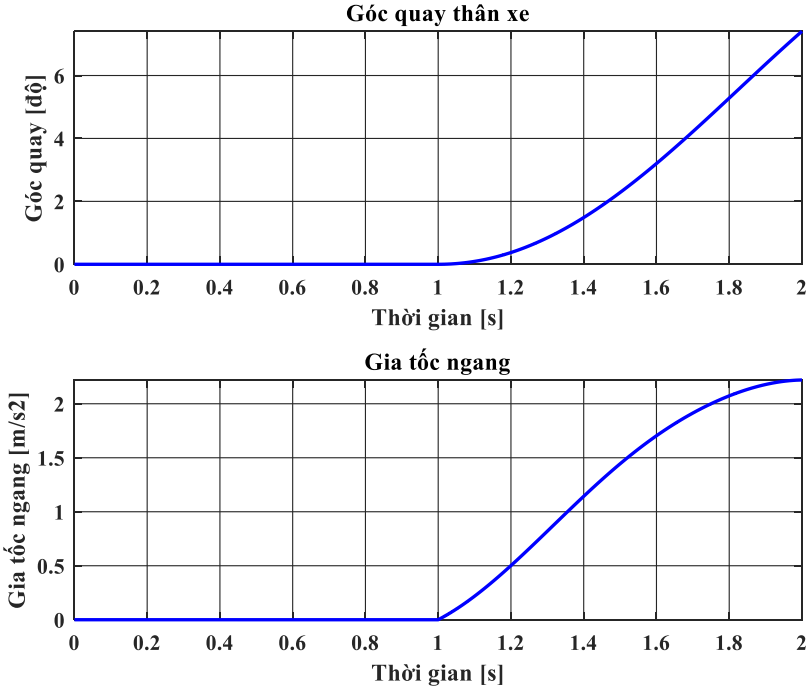


Hình 10. Đồ thị góc δ_{11} và bán kính quay vòng



Hình 11. Đồ thị phản lực pháp tuyến từ đường

Đồng thời, phản lực pháp tuyến ở các bánh xe có sự thay đổi *(hình 11)*. Phản lực pháp tuyến của các bánh xe cầu sau lớn hơn bánh xe cầu trước, là điều hiển nhiên với ô tô vận tải. Phản lực pháp tuyến ở các bánh xe cầu bên phải tăng theo thời gian, ở các bánh xe bên trái giảm theo thời gian, thể hiện xu hướng xe quay vòng hướng bên phải. Khi phản lực pháp tuyến bằng 0 thì xe có xu hướng tách bánh và có khả năng lật.



Hình 12. Đồ thị gia tốc ngang và góc quay thân xe

Các kết quả khảo sát cho thấy, sự biến đổi tương ứng về quy luật của gia tốc ngang a_y và góc quay thân xe theo biên độ góc lái. Các giá trị này thay đổi liên tục theo thời gian.

4. Kết luận

Nghiên cứu với ưu thế là không cần xe mẫu, không cần hệ thống thí nghiệm, có thể dễ dàng thay đổi tham số, khảo sát được các trạng thái chuyển động mất ổn định và có thể xây dựng được quan hệ nội hàm của quá trình động lực học xe, mô hình hóa xe theo phương pháp hệ nhiều vật. Ngoài ra cũng có thể khảo sát ảnh hưởng của điều kiện chuyển động thông qua việc thay đổi tần số và biên độ kích thích đầu vào.

Bài báo đã chọn xe Kamaz-43253 để khảo sát ảnh hưởng của các thông số khác nhau đến quá trình quay vòng của xe. Đưa ra kết quả và đánh giá quá trình quay vòng của xe trong các trường hợp khác nhau *(góc đánh lái)* từ đó lựa chọn các phương pháp khắc phục tình trạng không mong muốn khi chuyển động trong quá trình quay vòng.

* Hướng phát triển tiếp theo: Có thể mở rộng vùng khảo sát các thông số khác ảnh hưởng như các phần tử đàn hồi, giảm chấn, thời gian đánh lái, ô tô 2 cầu, 3 cầu. Từ các kết quả khảo sát có thể đề xuất, thiết kế các hệ thống cảnh báo và điều khiển nhằm tăng tính ổn định quỹ đạo chuyển động an toàn của xe ô tô trong điều kiện sử dụng thực tế.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Phúc Hiểu, Vũ Đức Lập, Lý thuyết ô tô quân sự, NXB HVKTQS, 1999.
2. Vũ Đức Lập *(2004)*, *Sổ tay tra cứu tính năng kỹ thuật ôtô,* HVKTQS.
3. Phan Thanh Tạo *(2006)*, *Giáo trình Matlab*, Đại học Đà Nẵng.
4. Nguyễn Hoài Thanh, Nguyễn Thanh Việt, Bùi Xuân Lâm, *Ứng dụng Matlab trong tính toán kỹ thuật*, Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. Hồ Chí Minh, 2002.
5. Vũ Đức Lập, Nguyễn Sĩ Đỉnh, Cấu tạo ô tô quân sự, tập 2, NXB HVKTQS, 2015.
6. Cục Xe-Máy/Tổng Cục Kỹ Thuật *(2020)*, *Cấu tạo xe ô tô Kamaz-43253, Kamaz-43266*

Automotive rotation dynamics simulation kamaz-43253 with matlab-simulink software

Abstract: *The rotational dynamics model of the Kamaz-43253 vehicle was built using Matlab-Simulink to simulate the actual operating conditions when the vehicle rotates. Thereby, analyzing parameters that affect stability and safety. The results of the study show that the change of parameters has a great impact on rotation, which serves as a basis for improving performance and proposing the optimal solution. This is an effective method to improve the design and adjust specifications, improve performance as well as safety when operating the vehicle.*

Keywords: Rotational Dynamics, Matlab-Simulink, Steering Angle, Specifications, Vehicle Acceleration, Vehicle Stability, Vehicle Safety.

❑

Nghiên cứu động lực học hệ thống treo bán tích cực với mô hình ¼ xe sử dụng bộ điều khiển pid, lqr và fuzzy logic

Đỗ Văn Tứ[1], Trần Thành Lam[1], Lại Việt Anh[1], Lê Văn Trung[1]

[1]Học viện Kỹ thuật Quân sự

[*] Email: tu.dovan@lqdtu.edu.vn, Số điện thoại: 0966683391

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng động lực học của hệ thống treo bán tích cực với mô hình ¼ xe sử dụng bộ điều khiển tuyến tính (LQR), kiểm soát tính phân đạo hàm theo tỉ lệ (PID) và bộ điều khiển Fuzzy logic. Mô hình nghiên cứu được sử dụng là mô hình tuyến tính. Kết quả mô phỏng cho phép khảo sát các thông số động lực học của hệ thống treo bao gồm: Dịch chuyển thân xe; Gia tốc thân xe; Lực điều khiển giảm chấn. Bài báo đưa ra cơ sở lý thuyết về động lực học hệ thống treo, từ đó xây dựng mô hình tính toán và ứng dụng phần mềm MATLAB/ SIMULINK để khảo sát động lực học hệ thống treo bán tích cực. Từ kết quả mô phỏng, tác giả tiến hành so sánh và đánh giá hiệu quả của hệ thống treo khi áp dụng các phương pháp điều khiển nêu trên.

Từ khóa: *Mô hình dao động ô tô, hệ thống treo, LQR, PID, Fuzzy logic*.

1. Đặt vấn đề

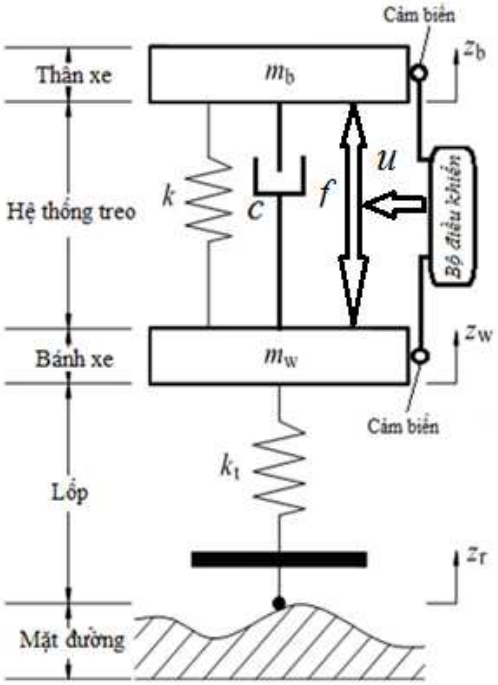
Hệ thống treo trên ô tô là hệ thống rất quan trọng. Hệ thống treo có nhiệm vụ nối đàn hồi giữa phần khối lượng được treo và phần khối lượng không được treo. Ngoài ra nó còn làm giảm tải trọng động và dập tắt dao động của các phần tử trong hệ thống treo và của thân xe. Dao động ảnh hưởng trực tiếp đến con người, hàng hóa trên ô tô. Nhằm nâng cao độ êm dịu và an toàn chuyển động người ta cần bố trí hệ thống treo trên ô tô. Đối với hệ thống treo bị động thì chỉ có thể đáp ứng được phần nào về tính êm dịu và khả năng dập tắt dao động trong một số loại đường nhất định. Như vậy để đáp ứng các chỉ tiêu về độ êm dịu và độ an toàn trên các loại đường khác nhau thì các đặc tính của hệ thống treo cần phải thay đổi trong quá trình chuyển động để phù hợp với đặc tính của đường. Một trong những phương án đó ta có thể thay thế hệ thống treo bị động bằng hệ thống treo bán tích cực. Hiện nay, có nhiều phương pháp điều khiển hệ thống treo bán tích cực khác nhau như: điều khiển PID, điều khiển toàn phương tuyến tính lặp (LQR), thuật toán điều khiển logic mờ, …. Với mục đích so sánh động lực học giữa hai hệ thống treo bị động với hệ thống treo bán tích cực kết hợp các phương pháp khác nhau. Qua đó, nhằm so sánh, đánh giá khả năng điều khiển của từng phương pháp nêu trên.

2. Xây dựng mô hình toán và phương pháp điều khiển hệ thống treo

2.1. Mô hình hệ thống treo ¼ bán tích cực

Mô hình hệ thống treo ¼ bao gồm phần khối lượng được treo (*thay thế cho khối lượng thân xe*) và phần khối lượng không được treo (*thay thế cho khối lượng bánh xe và các thành phần liên kết*). Phần khối lượng được treo và khối lượng không được treo liên kết với nhau thông qua các phần tử đàn hồi (độ cứng là k) và phần tử giảm chấn (hệ số cản giảm chấn c) của hệ thống treo được thể hiện trong hình 1.

Quá trình nghiên cứu trong mô hình hệ thống treo ¼ tác giả xét dao động của hệ là nhỏ, tuyến tính, xung quanh vị trí cân bằng tĩnh. Bánh xe lăn không trượt và luôn tiếp xúc với đường. Chí xét chuyển động theo phương thẳng đứng, bỏ qua các chuyển động theo các phương khác như góc lắc ngang, lắc dọc của xe.



Hình 1. Mô hình hệ thống treo ¼ bán tích cực

Sử dụng nguyên lý Dalampe ta tiến hành tách các khối lượng được treo và không được treo. Thay thế các liên kết giữa các phần bằng các phản lực, áp dụng định luật II Newton cho khối lượng được treo và không được treo. Lấy cân bằng theo phương Oz ta được hệ phương trình vi phân mô tả động lực học của hệ thống treo như sau:

$$\begin{cases} m_b\ddot{z}_b + c(\dot{z}_b - \dot{z}_w) + k(z_b - z_w) = f \\ m_w\ddot{z}_w - c(\dot{z}_b - \dot{z}_w) - k(z_b - z_w) + k_t(z_w - z_r) = -f \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

$z_b, \dot{z}_b, \ddot{z}_b$: dịch chuyển, vận tốc và gia tốc của phần khối lượng được treo;

$z_w, \dot{z}_w, \ddot{z}_w$: dịch chuyển, vận tốc và gia tốc của phần khối lượng không được treo;

z_r: biên dạng mặt đường;

Các thông số kết cấu hệ thống treo bao gồm:

k, k_t: độ cứng của phần tử lò xo và độ cứng của lốp;

c: hệ số cản giảm chấn;

f: lực điều khiển cần thiết do bộ điều khiển tính toán

Nếu coi mặt đường là nhiễu đầu vào, không phải là biến trạng thái thì phương trình (1) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} m_b\ddot{z}_b + c(\dot{z}_b - \dot{z}_w) + k(z_b - z_w) = f \\ m_w\ddot{z}_w - c(\dot{z}_b - \dot{z}_w) - k(z_b - z_w) + k_t z_w = -f + k_t z_r \end{cases} \quad (2)$$

Trong phương trình (2) sẽ chỉ còn 4 biến trạng thái. Để thiết kế bộ điều khiển bằng phương pháp toàn phương tuyến tính hoá thì phương trình (2) phải được viết dưới dạng phương trình không gian trạng thái.

Ta đặt:

$$[x]=\begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix}=\begin{vmatrix} z_b \\ \dot{z}_b \\ z_{\mathrm{w}} \\ \dot{z}_{\mathrm{w}} \end{vmatrix} \tag{3}$$

Từ phương trình (2) và cách đặt (3), chúng ta có:

$$\begin{cases} x_1 = z_b \\ x_2 = \dot{z}_b \\ x_3 = z_{\mathrm{w}} \\ x_4 = \dot{z}_{\mathrm{w}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{z}_b = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{z}_b = -\dfrac{k}{m_b}x_1 - \dfrac{c}{m_b}x_2 + \dfrac{k}{m_b}x_3 + \dfrac{c}{m_b}x_4 + \dfrac{1}{m_b}f \\ \dot{x}_3 = \dot{z}_{\mathrm{w}} = x_4 \\ \dot{x}_4 = \ddot{z}_{\mathrm{w}} = \dfrac{k}{m_{\mathrm{w}}}x_1 + \dfrac{c}{m_{\mathrm{w}}}x_2 - \dfrac{k+k_t}{m_{\mathrm{w}}}x_3 - \dfrac{c}{m_{\mathrm{w}}}x_4 + \dfrac{k_t}{m_{\mathrm{w}}}z_r - \dfrac{1}{m_{\mathrm{w}}}f \end{cases}$$

Lúc này phương trình không gian trạng thái được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bf + Gz_{\mathrm{r}} \\ y = Cx \end{cases} \tag{4}$$

Với

x: là vecto trạng thái;

y: là tín hiệu đầu ra;

A: Ma trận vật lý của hệ thống;

B: Ma trận điều khiển;

G: Ma trận tín hiệu nhiễu đầu vào;

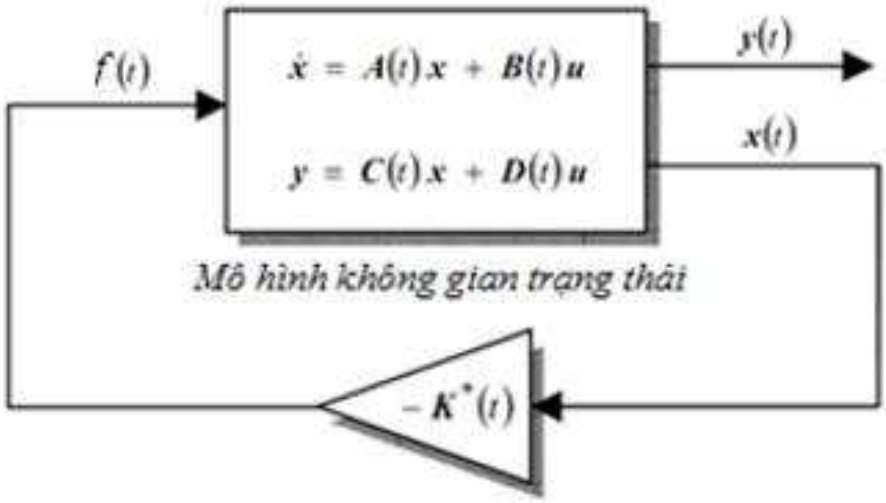
C: Ma trận tín hiệu đầu ra.

Các ma trận vật lý theo hệ phương trình (4) được biểu thị cụ thể như sau:

$$A=\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\dfrac{k}{m_b} & -\dfrac{c}{m_b} & \dfrac{k}{m_b} & \dfrac{c}{m_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dfrac{k}{m_w} & \dfrac{c}{m_w} & -\dfrac{k+k_t}{m_w} & -\dfrac{c}{m_w} \end{vmatrix} \quad B=\begin{vmatrix} 0 \\ \dfrac{1}{m_b} \\ 0 \\ -\dfrac{1}{m_{\mathrm{w}}} \end{vmatrix} \quad C=\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad G=\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dfrac{k_t}{m_{\mathrm{w}}} \end{vmatrix}$$

2.2. Cơ sở lý thuyết điều khiển LQR

Phương pháp điều khiển LQR là một phương pháp điều khiển mạnh để điều khiển hệ thống tuyến tính, được mô tả bằng phương trình không gian trạng thái. Kỹ thuật LQR tạo ra bộ điều khiển vòng kín ổn định với năng lượng cung cấp cho hệ thống là nhỏ nhất. Sơ đồ bộ điều khiển LQR trong các hệ thống điều khiển được thể hiện như hình 2.



Hình 2. Mô hình không gian trạng thái kết hợp điều khiển LQR

Trong đó.

f(t): tín hiệu điều khiển

y(t): tín hiệu đầu ra

x(t): biến trạng thái

-K(t):* Giá trị tính toán theo thuật tối ưu

Xét đối tượng tuyến tính hoá được mô tả bởi phương trình không gian trạng thái:

$$\dot{x}(t) = \mathrm{A}x(t) + Bf(t) \tag{5}$$

Thông thường nếu hệ ổn định thì khi không bị kích thích hệ luôn có xu hướng tiến về điểm trạng thái cân bằng, tức là điểm mà khi không có tác động từ bên ngoài ($u=0$) hệ sẽ luôn nằm tại đó $\left(\frac{dx}{dt} = 0\right)$. Như vậy điểm trạng thái cân bằng phải là nghiệm của phương trình trạng thái: $\mathrm{A}x = 0$. Và nếu giả thiết A là ma trận không suy biến thì hệ tuyến tính $\frac{dx}{dt} = \mathrm{A}x + \mathrm{B}f$ luôn chỉ có một điểm cân bằng

Phương pháp điều khiển LQR được dùng cho mô hình của hệ đã tuyến tính hoá tại vị trí cân bằng. Bộ điều khiển phản hồi trạng thái được xác định thông qua việc giải phương trình Ricatti để có được ma trận phản hồi trạng thái *K*, nhằm kéo hệ từ điểm bị nhiễu tác động về lại vị trí cân bằng sao cho quá trình này tiêu tốn năng lượng là thấp nhất.

Thuật toán LQR xác định tín hiệu điều khiển *f* sao cho thỏa mãn hàm mục tiêu có dạng toàn phương như sau:

$$J = \int_0^\infty (x^T Q\, x + f^T R\, f)dt \tag{6}$$

Trong đó *Q* và *R* là các ma trận trọng số dựa trên sự cân nhắc giữa thời gian làm cho hệ ổn định chất lượng và tiêu hao năng lượng điều khiển. Ma trận *Q* là ma trận đường chéo, thể hiện mức độ ảnh hưởng của tín hiệu trạng thái từ mô hình hệ thống treo ¼ đến bộ điều khiển.

Tức là, vị trí tương ứng của trạng thái đó được nâng lên so với các trạng thái khác, còn ma trận *R* thể hiện mức độ tiêu hao năng lượng trong hệ thống, nên thông thường, ma trận *R* thường chọn có giá trị nhỏ.

Theo sơ đồ thì bộ điều khiển LQR được thay thế bằng ma trận *K*. Luật điều khiển có dạng:

$$f = -Kx = -(K_1x_1 + K_2x_2 + K_3x_3 + K_4x_4) \quad (7)$$

Trong đó

f: Lực giảm chấn cần thiết.

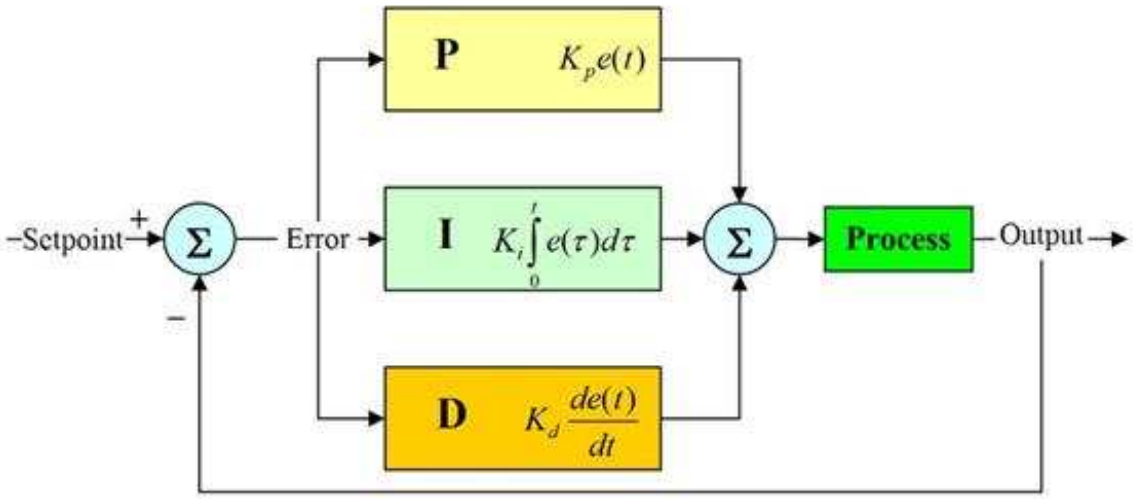
x_i *(i=1÷4):* các biến trạng thái;

K: ma trận phản hồi trạng thái; *K* được xác định từ phương trình sau:

$$-KA - A^TK - Q + KBR^{-1}B^TK = 0 \quad (8)$$

2.3. Cơ sở lý thuyết điều khiển PID

Bộ điều khiển PID xem xét một giá trị sai số là hiệu số giữa giá trị đo của thông số biến đổi thực tế và giá trị đặt mong muốn. Bộ điều khiển sẽ thực hiện giảm tối đa sai số này bằng cách điều chỉnh các giá trị đầu vào. Trong trường hợp kiến thức cơ bản về quá trình bị hạn chế thì bộ điều khiển PID là bộ điều khiển đơn giản nhất để áp dụng. Tuy nhiên, để đạt được kết quả tốt nhất, các thông số cơ bản của PID gồm K_I, K_P, K_D cần phải điều chỉnh theo tính chất của hệ thống. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển PID được thể hiện trong hình 3. Bằng cách lựa chọn các giá trị của K_I, K_P, K_D khác nhau thì các biến thể thường xuất hiện của bộ điều khiển này có thể là bộ điều khiển P hay PI. Các hệ số này có thể xác định tự động từ phần mềm Matlab để đạt được hiệu quả tốt nhất.



Hình 3. Mô hình cấu trúc điều khiển PID

Sơ đồ điều khiển PID được đặt tên theo ba khâu hiệu chỉnh của nó, tổng của ba khâu này tạo thành tín hiệu điều khiển, được xác định như sau:

$$u(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t)dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Trong đó:

- K_P: Hệ số tỉ lệ;

- K_I: Hệ số tích phân.

- K_D: Hệ số vi phân;

- e: là sai số; $e(t) = y(t) - y_s(t)$

Với

y(t): là tín hiệu đầu ra của hệ thống. Trong nghiên cứu này, tín hiệu đầu ra được xét đến là giá trị của chuyển vị thân xe.

$y_s(t)$: là ngưỡng mong muốn của bộ điều khiển. Tín hiệu này được giả thiết bằng không.

2.4. Cơ sở lý thuyết điều khiển Fuzzy Logic

Bộ điều khiển Fuzzy Logic (Điều khiển mờ) sử dụng lý thuyết tập mờ để xử lý thông tin không chính xác hoặc mơ hồ, giúp hệ thống ra quyết định dựa trên kinh nghiệm thực tiễn. Bộ điều khiển Fuzzy logic biến các thông số đầu vào thành các lực đầu ra cần thiết để điều khiển hệ thống treo thông qua bảng luật điều khiển.

Chọn các hệ số tiền xử lý và hậu xử lý:

- Gọi K1 là hệ số tiền xử lý của tín hiệu đầu vào E (độ dịch chuyển thân xe), chọn K1 = 1/0,05 tức là miền dịch chuyển thân xe được xác định khi có dao động trong khoảng -0,05 đến 0,05m.

- Gọi K2 là hệ số tiền xử lý của tín hiệu đầu vào CE (vận tốc của dịch chuyển thân xe), chọn K2 = 1 tức là miền dịch chuyển vận tốc được xác định khi có dao động trong khoảng -1 đến 1m/s. Đây cũng là một trong phương pháp rất phù hợp để điều khiển hệ thống treo.

Vận tốc \ Dịch chuyển thân xe	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

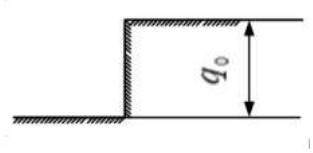
Hình 4. Luật giải mờ điều khiển hệ thống treo

Với các ký hiệu NB=Negative Big, NM=Negative Medium, NS=Negative Small, ZE=Zero, PS=Positive Small, PM=Positive Medium, PB=Positive Big.

3. Kết quả mô phỏng

Trong bài báo này tác giả sử dụng hàm mấp mô có dạng bậc với biên độ bằng 0,1 mét là hàm kích thích đầu vào của hệ thống treo bán tích cực.

Biên dạng của mấp mô được biểu thị bằng hàm bậc, có phương trình:



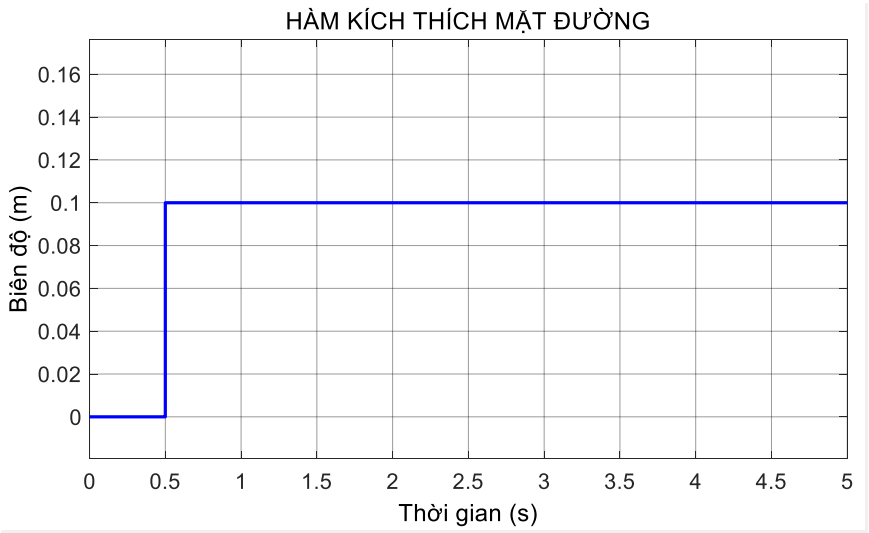
$$q_1(S)=\begin{cases}0 & (S<0)\\ q_0 & (S\geq 0)\end{cases}$$

Trong đó: S - Chiều dài quãng đường ô tô đi được.

P_0 - Chiều cao của mấp mô.

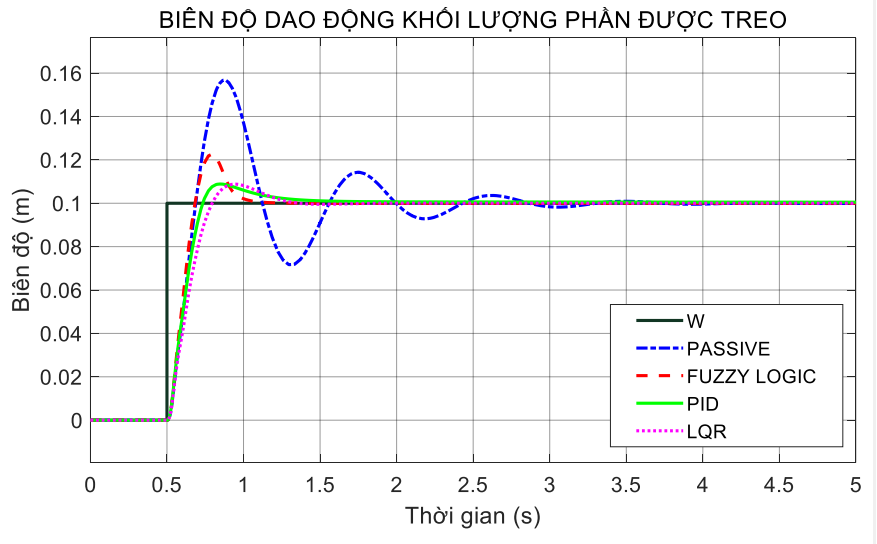
Áp dụng phương trình chuyển động tịnh tiến của ô tô trong trường hợp chuyển động đều ($S=v.t$), hàm kích thích mặt đường thay đổi theo thời gian có thể biểu thị:

$$q_1(t)=\begin{cases}0 & (t<0)\\ q_0 & (t\geq 0)\end{cases}$$



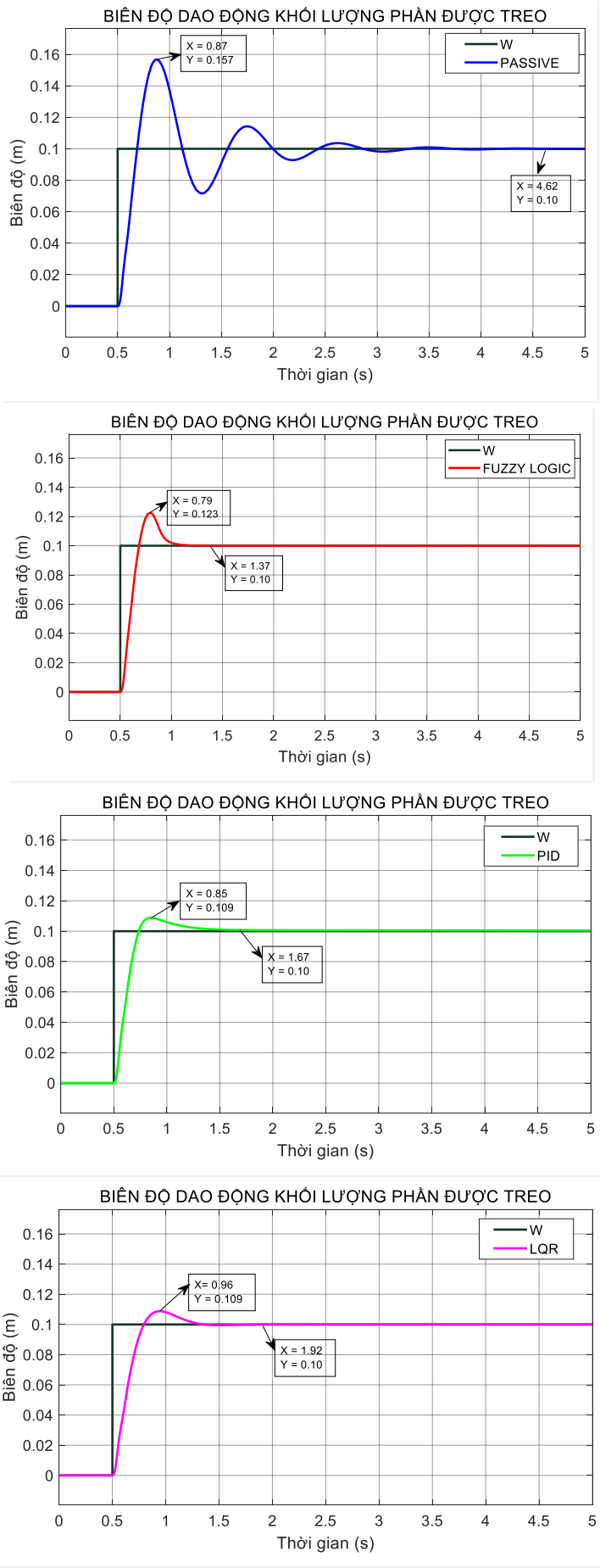
Hình 5. Hàm kích thích từ mặt đường

Kết quả mô phỏng



Hình 6. Biên độ dao động của khối lượng được treo

Từ hình 6 ta thấy, khi sử dụng các phương pháp điều khiển khác nhau thì biên độ dao động của khối lượng phần được treo nhỏ hơn rất nhiều so với hệ thống treo bị động. Thời gian dập tắt dao động cũng giảm đi rất nhiều, như vậy sử dụng hệ thống treo điều khiển sẽ giúp xe êm dịu hơn khi chuyển động. Kết quả cụ thể của từng phương pháp điều khiển được thể hiện trong hình 7.



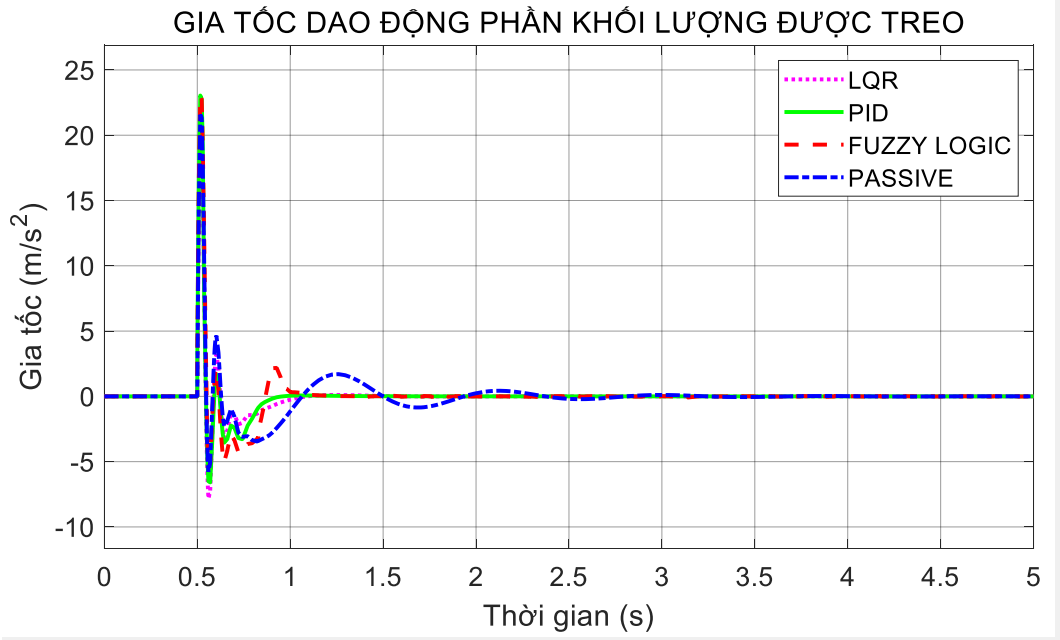
Hình 7. Biên độ dao động của khối lượng được treo với các phương pháp điều khiển

Từ hình 7 ta có, khi kích thích tại bánh xe là hàm bậc với biên độ là 0,1 mét. Biên độ dao động của khối lượng được treo với các phương pháp điều khiển khác nhau được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Biên độ dao động của khối lượng được treo

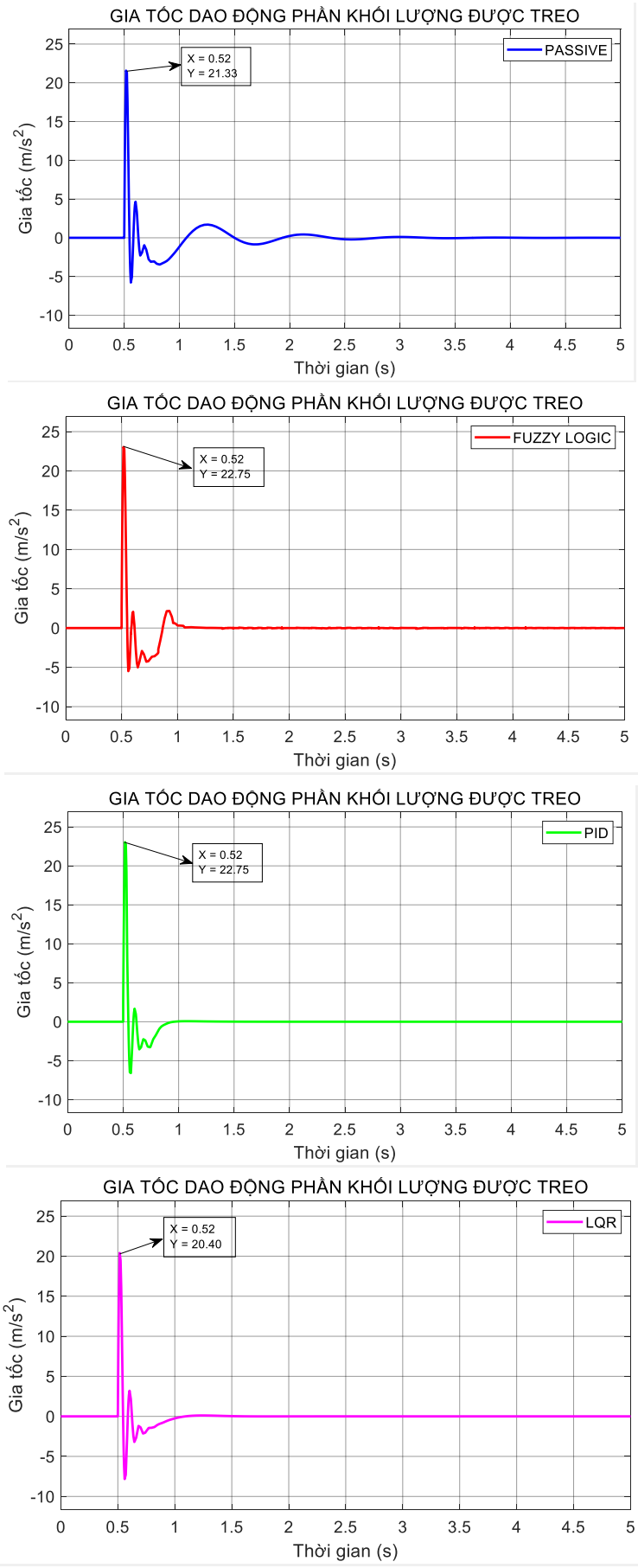
Bộ điều khiển	**Biên độ dao động lớn nhất (m)**	**Thời gian biên độ dạo động đạt giá trị lớn nhất (s)**	**Thời gian dập tắt dao động (s)**
Bị động	0,057	0,37	4,12
Fuzzy logic	0,023	0,29	0,87
PID	0,009	0,35	1,17
LQR	0,009	0,46	1,42

Như vậy, có thể thấy trong 3 phương pháp điều khiển nêu trên bộ điều khiển Fuzzy logic có thời gian dập dắt dao động là nhanh nhất, sau đó đến bộ điều khiển LQR và cuối cùng là bộ điều khiển PID. Biên độ dao động của 2 bộ điều khiển PID và LQR là như nhau chỉ khác nhau về thời gian đạt giá trị lớn nhất, còn bộ điều khiển Fuzzy logic thì biên độ lớn hơn 2 bộ điều khiển PID và LQR.



Hình 8. Gia tốc dao động khối lượng được treo

Trên hình 8 thể hiện gia tốc dao động của khối lượng được treo. Kết quả cụ thể của từng phương pháp điều khiển được thể hiện trong hình 9.



Hình 9. Gia tốc dao động của khối lượng được treo với các phương pháp điều khiển

Từ hình 9 ta có gia tốc dao động của khối lượng được treo với các phương pháp điều khiển khác nhau được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Gia tốc dao động của khối lượng được treo

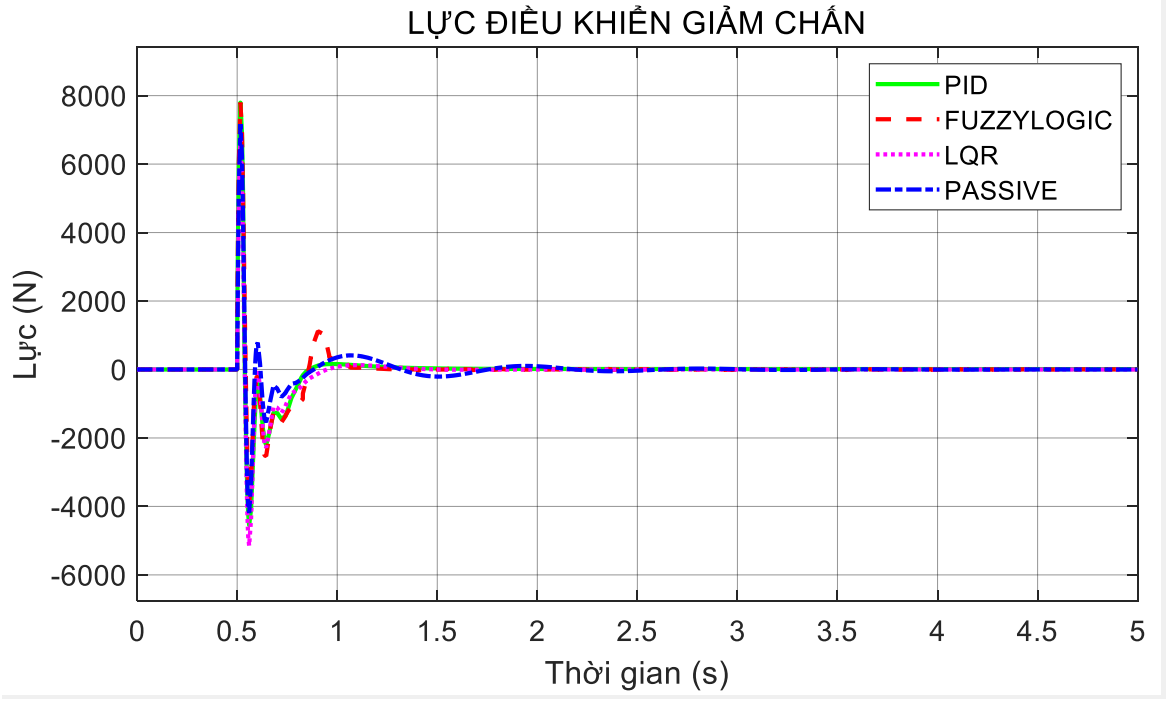
Bộ điều khiển	**Gia tốc dao động lớn nhất (m/s^2)**	**Thời gian đạt giá trị lớn nhất (s)**
Bị động	21,33	0,52
Fuzzy logic	22,75	0,52
PID	22,75	0,52
LQR	20,40	0,52

Từ bảng 2 ta thấy, đối với hệ thống treo có bộ điều khiển Fuzzy logic và PID có gia tốc dao động lớn nhất lớn hơn hệ thống treo bị động. Còn hệ thống treo có bộ điều khiển LQR gia tốc dao động lớn nhất nhỏ hơn hệ thống treo bị động.

Gia tốc trung bình của phần khối lượng được treo trong thời gian mô phỏng là 5 giây thể hiện trong bảng 3.

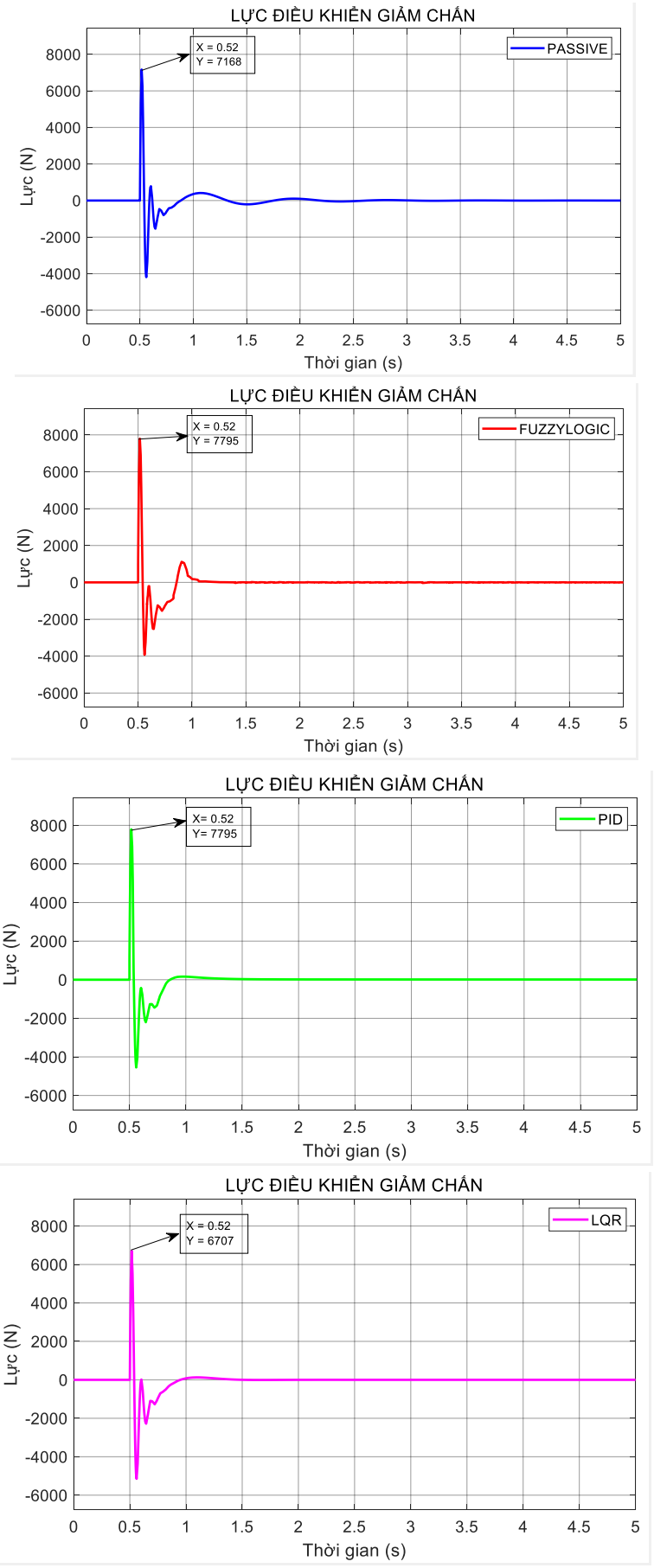
Bảng 3. Gia tốc trung bình của khối lượng được treo

Bộ điều khiển	**Gia tốc trung bình**
Bị động	0.5637
Fuzzy logic	0.3875
PID	0.2937
LQR	0.2818



Hình 10. Lực điều khiển giảm chấn

Trên hình 10 thể hiện lực điều khiển giảm chấn. Kết quả cụ thể của từng phương pháp điều khiển được thể hiện trong hình 11.



Hình 11. Lực điều khiển giảm chấn với các phương pháp điều khiển

Lực điều khiển giảm chấn với các phương pháp điều khiển khác nhau được thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4. Lực điều khiển giảm chấn

Bộ điều khiển	Lực điều khiển giảm chấn lớn nhất (N)	Thời gian đạt giá trị lớn nhất (s)
Bị động	7168	0,52
Fuzzy logic	7795	0,52
PID	7795	0,52
LQR	6707	0,52

Như vậy có thể thấy lực điều khiển giảm chấn đối với hệ thống treo có bộ điều khiển Fuzzy logic và PID là lớn nhất, sau đó đến hệ thống treo bị động và cuối cùng là hệ thống treo có bộ điều khiển LQR.

4. Kết luận

Từ kết quả phân tích ở trên ta thấy, đối với hệ thống treo bị động sau 4,12 giây sau khi kích thích thì mới dập tắt được dao động của khối lượng được treo. Đối với bộ điều khiển Fuzzy logic là 0,87 giây. Bộ điều khiển PID là 1,17 giây. Bộ điều khiển LQR là 1,42 giây. Như vậy, về khả năng dập tắt dao động thì bộ điều khiểu Fuzzy logic là nhanh nhất.

Gia tốc dao động trung bình của phần khối lượng được treo, đối với hệ thống treo có bộ điều khiển LQR là a_{tb} = 0.2818 m/s^2. Bộ điều khiển PID là a_{tb} = 0.2937 m/s^2. Bộ điều khiển Fuzzy logic a_{tb} = 0.3875 m/s^2. Hệ thống treo bị động là a_{tb} = 0.5637 m/s^2. Như vậy, xét về tính êm dịu thì hệ thống treo áp dụng bộ điều khiển LQR là tối ưu nhất.

Kết luận: khi cần dập tắt dao động nhanh chóng chúng ta có thể sử dụng hệ thống treo có bộ điều khiển Fuzzy logic, còn muốn xe chuyển động êm dịu thì có thể sử dụng hệ thống treo có bộ điều khiển LQR.

Tài liệu tham khảo

1. Vũ Hải Quân, Trịnh Duy Hùng, 2019. Xây dựng mô hình nghiên cứu hệ thống treo có điều khiển cho mô hình toàn xe. Tạp chí KHKT Thuỷ lợi và Môi trường, ISSN 1859-3941, trang 72-77, số 10.
2. Vũ Hải Quân, Hoàng Quang Tuấn, 2019. Mô hình hóa và điều khiển hệ thống treo tích cực cho mô hình ¼ xe. Hội thảo Quốc gia: Đào tạo nguồn nhân lực Công nghiệp Ô tô gắn với nhu cầu sử dụng lao động của xã hội. Khu vực Bắc Bộ: Thực trạng và giải pháp trong bối cảnh hội nhập và cách mạnh công nghiệp 4.0" ISSN 0866 – 7056, Đại học Thái Nguyên.
3. Rosheila Darus, Yahaya Md Sam, 2008. Modeling and Control Active Suspension System for a Full Car Model. 5th International CSP A, 2008. pg. 13-18.
4. Sam Y.M., Ghani M.R.A, Ahmad N., 2000. LQR Controller for Active Car Suspension. IEEE Control System 2000 I441-I444.
5. Hespanhna J.P., 2007. Undergraduate Lecture Note on LQG/LGR controller Design. University of California Santa Barbara.
6. Wu S.J., Chiang H.H., Chen J.H., Lee T.T., Optimal Fuzzy Control Design for Half-Car Active Suspension Systems. IEEE Proceeding of the International Conference on Networking, Sensing and Control. March, Taipei, Taiwan: IEEE. 2004. 21-23.

7. Astrom K.J., Wittenmark B., 1995. Adaptive Control. Second Editon, Addison- Wesley Pub.
8. Chen H.Y., Huang S.J., 2005. Adaptive Control for Active Suspension System. International Conference on Control and Automatic. June. Budapest, Hungary.
9. Ikenaga S., Lewis F.L., Campos J., Davis L., 2000. Active Suspension Control of Ground Vehicle Based on a Full Car Model. Proceeding of America Control Conference. June. Chicago, Illinois.
10. Shariati A., Taghirad H.D., Fatehi A, 2004. Decentralized Robust H-∞ Controller Design for a Full Car Active Suspension System Control. University of Bath, United Kingdom.
11. William D.L., Hadad W.M., 1997. Active Suspension Control to Improve Vehicle Ride and Handling. Vehicle System Dynamic. 28: 1-24 70
12. Sam Y.M, 2004. Proportional Integral Sliding Mode Control of an Active Suspension System. Malaysia University of Technology, PHD Dissertation, Malaysia University of Technology.
13. Hyvarinen J.P., 2004. The Improvement of Full Vehicle Semi-Active Suspension through Kenimatical Model. Master Science Disertation. Oulu of University Findland.

Dynamic study of semi-active suspension system with ¼ car model using PID, LQR, and Fuzzy logic controllers

Abstract. *The article presents the results of the dynamic simulation of a semi-active suspension system with ¼ vehicle model using linear controller (LQR), proportional derivative control (PID), and fuzzy logic controller. The research model used is a linear model. The simulation results allow us to investigate the dynamic parameters of the suspension system including Vehicle body displacement; Vehicle body acceleration; and amping control force. The article provides the theoretical basis of suspension system dynamics, from which to build a computational model and apply MATLAB/ SIMULINK software to investigate the dynamics of a semi-active suspension system. From the simulation results, the author compares and evaluates the effectiveness of the suspension system when applying the above control methods.*

Keywords: Car vibration model, suspension system, LQR, PID, and Fuzzy logic.

❑

Xây dựng mô hình dao động ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc

Nguyễn Quang Thân[1], Nguyễn Văn Trà[1]

Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự
* Email: thannguyen140399@gmail.com, SĐT: 0359044869

Tóm tắt

Trong lĩnh vực quân sự, ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc được sử dụng rất phổ biến với kết cấu đơn giản, độ tin cậy cao và tính năng thông qua cao. Nên bài báo trình bày việc xây dựng mô hình dao động của ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc. Mô hình được phát triển dựa trên các phương trình vi phân dao động, xem xét tác động của tải trọng, độ cứng và hệ số giảm chấn của hệ thống treo, nhằm đưa ra kết quả mô phỏng cho thấy sự ảnh hưởng của các yếu tố này đến độ êm dịu của xe và độ thoải mái khi lái xe. Nghiên cứu cung cấp cơ sở lý thuyết cho việc tối ưu hóa thiết kế hệ thống treo, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành của ô tô.

Từ khóa: *hệ thống treo phụ thuộc; ô tô 2 cầu; dao động ½ ngang xe.*

1. Đặt vấn đề

Trong ngành công nghiệp ô tô, một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng vận hành và sự thoải mái của người sử dụng là hệ thống treo. Bên cạnh đó, xe ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc được sử dụng rất phổ biến. Nhưng khi nghiên cứu về dao động, hệ thống treo độc lập đã được nghiên cứu nhiều, còn việc áp dụng các mô hình cho ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc vẫn gặp nhiều thách thức do hệ thống treo phụ thuộc có đặc điểm là các cầu trước và cầu sau không hoàn toàn độc lập với nhau, dẫn đến những ảnh hưởng qua lại giữa các bộ phận của hệ thống treo, làm cho việc mô phỏng trở nên phức tạp hơn. Điều này yêu cầu việc xây dựng một mô hình động học có thể phản ánh chính xác các đặc tính dao động của toàn bộ ô tô, từ đó tối ưu hóa thiết kế hệ thống treo để cải thiện hiệu suất và sự ổn định của ô tô trong các điều kiện vận hành khác nhau. Nên trong bài báo sẽ xây dựng mô hình dao động ½ ngang xe để vừa đánh giá được độ ổn định của xe và vừa đơn giản hóa quá trình xây dựng cũng như vẫn tính toán đến sự tác động qua lại giữa 2 bánh xe hai bên cầu xe.

Mục tiêu của bài báo này là xây dựng và phân tích mô hình dao động ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc, từ đó đánh giá sự ảnh hưởng của các yếu tố như độ cứng của hệ thống treo, khối lượng của xe, các yếu tố động học khác đến tính ổn định và khả năng vận hành của phương tiện. Thông qua mô hình này, bài báo hy vọng sẽ cung cấp những cơ sở khoa học vững chắc cho việc cải tiến thiết kế hệ thống treo ô tô trong tương lai.

2. Xây dựng mô hình dao động ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc

a. Giả thiết

Để thiết lập mô hình động lực học hệ dao động 1/2 ngang xe và đơn giản cho việc tính toán ta đưa ra các giải thiết sau:

- Đường cứng tuyệt đối, nằm ngang, có lớp phủ mặt đường đồng nhất.

- Biên dạng đường dạng điều hòa hàm sin, mấp mô mặt đường 2 bên bánh xe khác nhau (xét trường hợp độ lệch pha là pi/2). (bỏ qua các tác nhân gây dao động khác như động cơ, gió,..)

- Coi phần treo của ô tô là vật rắn và cứng tuyệt đối, trọng tâm thân xe ở mặt phẳng dọc đối xứng của xe, xe chuyển động với vận tốc không đổi v = 60km/h.

- Đặc tính của phần tử đàn hồi và giảm chấn là tuyến tính và ở hai bên cầu xe là lốp xe là như nhau.

- Coi 2 cầu như nhau và chịu kích thích mặt được như nhau, nên được gộp thành 1 cầu với khối lượng là tổng khối lượng ô tô.

- Coi khối lượng phần không treo là phân bố đều.

- Bánh xe lăn không trượt và luôn tiếp xúc với mặt đường (tiếp xúc điểm).

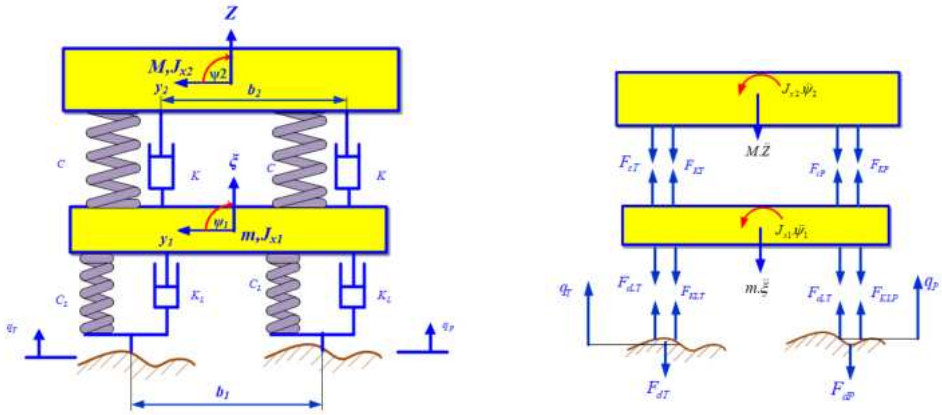
- Coi lốp tác động với mặt đường qua phần tử đàn hồi lốp và phần tử giảm chấn lốp.

- Bỏ qua sự mất cân bằng và mô men hiệu ứng con quay.

Ta coi toàn bộ phần treo là 1 vật rắn. Khối lượng treo được quy dẫn về trọng tâm phần treo, và mô men quán tính khối lượng phần treo đối với trục ngang Ox đi qua trọng tâm phần treo là J_{x2}. Khối lượng treo M được liên kết với khối lượng không treo qua phần tử đàn hồi của hệ thống treo có hệ số độ cứng là C và giảm chấn có hệ số cản K giống nhau ở cả cầu trước và cầu sau. Khối lượng phần không treo được quy dẫn về trọng tâm phần không treo là m và mô men quán tính khối lượng phần không treo đối với trục ngang Ox đi qua trọng tâm phần không treo là J_{x2} được liên hệ với đường thông qua phần tử đàn hồi có độ cứng là C_L và giảm chấn có hệ số cản K_L giống nhau ở cả lốp trái và lốp phải. Các thông số này đặc trưng cho sự đàn hồi và dập tắt dao động của lốp.

b. Mô hình khảo sát

Từ các giả thiết ở trên, mô hình khảo sát dao động của cơ hệ như hình 1.



Hình 1. Mô hình dao động phẳng ngang xe

Trong đó:

- Z, ξ, Ψ_2, Ψ_1 **-** Chuyển dịch vị trí thẳng đứng của trọng tâm và góc lắc trong mặt phẳng ngang phần treo và phần không treo;

- M, m, J_{x2}, J_{x1}**-** Khối lượng và mô men quán tính khối lượng đối với trục Ox phần treo và phần không treo của ô tô đối với trục dọc;

- C, C_L, K, K_L - Độ cứng và hệ số cản của giảm chấn của nhíp, của lốp;

- F_{CP}, F_{KP} - Lực đàn hồi và lực cản giảm chấn của hệ thống treo bên phải tác dụng lên phần không treo và phần treo;

- F_{CT}, F_{KT} - Lực đàn hồi và lực cản giảm chấn của hệ thống treo bên trái tác dụng lên phần không treo và phần treo;

F_{CLP}, F_{KLP} **-** Lực đàn hồi và lực cản giảm chấn lốp xe bên phải tác dụng lên phần không treo;

F_{CLT}, F_{KLT} - Lực đàn hồi và lực cản giảm chấn của lốp xe bên trái tác dụng lên phần không treo;

b_1, b_2 - Khoảng cách giữa hai bánh xe và khoảng cách giữa phần tử hệ thống treo hai bên cầu xe;

c. Hệ phương trình vi phân của dao động

Trong mô hình này, nhằm đơn giản hóa quá trình tính toán, tôi lựa chọn phương pháp tách hệ và áp dụng nguyên lý D'Alembert, ta được hệ phương trình vi phân bao gồm 4 phương trình sau:

$$\begin{cases} M.\ddot{Z} + F_{KT} + F_{KP} + F_{CT} + F_{CP} = 0 \\ J_{x2}\ddot{\psi}_2 + (F_{KT} + F_{CT})\dfrac{b_2}{2} - (F_{KP} + F_{CP})\dfrac{b_2}{2} = 0 \\ m.\ddot{\xi} - (F_{KT} + F_{CT}) - (F_{KP} + F_{CP}) + (F_{KLT} + F_{CLT}) + (F_{KLP} + F_{CLP}) = 0 \\ J_{x1}\ddot{\psi}_1 - (F_{KT} + F_{CT})\dfrac{b_2}{2} + (F_{KP} + F_{CP})\dfrac{b_2}{2} + (F_{KLT} + F_{CLT} - F_{KLP} - F_{CLP})\dfrac{b_1}{2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Với $F_{KT} = K.(\dot{Z} - \dot{\xi} + \dot{\psi}_2.\frac{b_2}{2} - \dot{\psi}_1.\frac{b_2}{2})$; $F_{KP} = K.(\dot{Z} - \dot{\xi} - \dot{\psi}_2.\frac{b_2}{2} + \dot{\psi}_1\frac{b_2}{2})$;

$F_{CT} = C.(Z - \xi + \psi_2.\frac{b_2}{2} - \psi_1.\frac{b_2}{2})$; $F_{CP} = C.(Z - \xi - \psi_2.\frac{b_2}{2} + \psi_1.\frac{b_2}{2})$;

$F_{KLT} = K_L.(\dot{\xi} - \dot{q}_T + \dot{\psi}_1.\frac{b_1}{2})$; $F_{KLP} = K_L.(\dot{\xi} - \dot{q}_P - \dot{\psi}_1.\frac{b_1}{2})$;

$F_{CLT} = C.(\xi - q_T + \psi_1.\frac{b_1}{2})$; $F_{CLP} = C.(\xi - q_P - \psi_1.\frac{b_1}{2})$;

Từ đó ta được hệ phương trình vi phân bao gồm 4 phương trình cho 4 bậc tự Z, ξ, Ψ_1, Ψ_2

$$\begin{cases} M.\ddot{Z} + 2K(\dot{Z} - \dot{\xi}) + 2C(Z - \xi) = 0 \\ J_{x2}\ddot{\psi}_2 + K.\dfrac{b_2^2}{2}(\dot{\psi}_2 - \dot{\psi}_1) + C\dfrac{b_2^2}{2}(\psi_2 - \psi_1) = 0 \\ m.\ddot{\xi} - 2K(\dot{Z} - \dot{\xi}) - 2C(Z - \xi) + C_L(2\xi - q_T - q_P) + K_L(2\dot{\xi} - \dot{q}_T - \dot{q}_P) = 0 \\ J_{x1}\ddot{\psi}_1 - K.\dfrac{b_2^2}{2}(\dot{\psi}_2 - \dot{\psi}_1) - C.\dfrac{b_2^2}{2}(\psi_2 - \psi_1) + C_L.\dfrac{b_1}{2}(-q_T + q_P + b_1\psi_1) + K_L.\dfrac{b_1}{2}(-\dot{q}_T + \dot{q}_P + b_1\dot{\psi}_1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

** Cơ sở lý thuyết của phương pháp hàm ảnh Laplace*

Nếu $f(t)$ là một hàm gốc, thì hàm F(p) xác định bởi tích phân:

$$\int_0^{+\infty} e^{-p.t}.f(t)dt$$

Ta gọi nó là ảnh của f(t) qua phép biến đổi Laplace hoặc gọi tắt là biến đổi Laplace của f(t). Ta ký hiệu: $F(p) = L\{f(t)\} = \int_0^{+\infty} e^{-p.t}.f(t)dt$ hoặc $f(t) \rightarrow$F(p)

Theo định lý đạo hàm gốc: $f'(t)$ cũng là hàm gốc và nếu $f(t)$ =F(p) thì:

$$f''(t) = p2.F(p) - p.f(0) - f'(0)$$

$$f'(t) = p.F(p) - f(0)$$

Hay tổng quát ta có:

$$f^{(n)}(t) = p^{(n)}.F(p) - p^{(n-1)}.f(0) - p^{(n-2)}.f'(0) - ... - f^{(n-1)}(0)$$

Cơ hệ ta xét là hệ dao động, tại thời điểm t = 0, ta quy ước các chuyển dịch, và vận tốc chuyển dịch đều bằng 0, do đó thay vào công thức trên ta sẽ có:

$$f'(t) = p.F(p)$$

$$f''(t) = p^2.F(p)$$

Áp dụng vào (3) tức là dùng biến đổi Laplace để đưa hệ phương trình vi phân về hệ phương trình có các ẩn dưới dạng hàm ảnh, ta được hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} (M.p^2 + 2.K.p + 2.C).Z(p) - 2.(K.p + C).\xi(p) = 0 \\ (J_{x2}.p^2 + K.\frac{b_2^2}{2}.p + C\frac{b_2^2}{2}).\psi_2(p) - (K.\frac{b_2^2}{2}.p + C\frac{b_2^2}{2}).\psi_1(p) = 0 \\ -2.(K.p + C).Z(p) + [m.p^2 + 2.(K + K_L).p + 2C + 2C_L].\xi(p) \\ \quad = (K_L.p + C_L).q_T(p) + (K_L.p + C_L).q_P(p) \\ [J_{x1}.p^2 + \left(K.\frac{b_2^2}{2} + K_L.\frac{b_1^2}{2}\right).p + \left(C\frac{b_2^2}{2} + C_L\frac{b_2^2}{2}\right)].\psi_1(p) - (K.\frac{b_2^2}{2}.p + C\frac{b_2^2}{2}).\psi_2(p) \\ \quad = (K_L.\frac{b_1}{2}.p + C_L.\frac{b_1}{2}).q_T(p) - (K_L.\frac{b_1}{2}.p + C_L.\frac{b_1}{2}).q_P(p) \end{cases} \quad (3)$$

Đặt các hệ số:

$a_{11} = M.p^2 + 2.K.p + 2.C$; $a_{12} = 0$;

$a_{13} = -2.(K.p + C)$; $a_{14} = 0$;

$a_{21} = 0$; $a_{22} = J_{x2}.p^2 + K.\frac{b_2^2}{2}.p + C\frac{b_2^2}{2}$;

$a_{23} = 0$; $a_{24} = -(K.\frac{b_2^2}{2}.p + C\frac{b_2^2}{2})$;

$a_{31} = -2.(K.p + C)$; $a_{32} = 0$;

$a_{33} = m.p^2 + 2.(K + K_L).p + 2C + 2C_L$; $a_{34} = 0$;

$a_{41} = 0$; $a_{42} = -(K.\frac{b_2^2}{2}.p + C\frac{b_2^2}{2})$

$a_{43} = 0$; $a_{44} = J_{x1}.p^2 + \left(K.\frac{b_2^2}{2} + K_L.\frac{b_1^2}{2}\right).p + \left(C\frac{b_2^2}{2} + C_L\frac{b_2^2}{2}\right)$;

Chia hai vế của các phương trình (3) cho $q_1(p)$

$$\begin{cases} a_{11}.WZ(p) + a_{12}.W\psi_2(p) + a_{13}.W\xi(p) + a_{14}.W\psi_1(p) = 0 \\ a_{21}.WZ(p) + a_{22}.W\psi_2(p) + a_{23}.W\xi(p) + a_{24}.W\psi_1(p) = 0 \\ a_{31}.WZ(p) + a_{32}.W\psi_2(p) + a_{33}.W\xi(p) + a_{34}.W\psi_1(p) \\ \quad = (K_L.p + C_L).(1 + \frac{q_P(p)}{q_T(p)}) \\ a_{41}.WZ(p) + a_{42}.W\psi_2(p) + a_{43}.W\xi(p) + a_{44}.W\psi_1(p) \\ \quad = (K_L.\frac{b_1}{2}.p + C_L.\frac{b_1}{2}).(1 - \frac{q_2(p)}{q_1(p)}) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó:

$WZ(p)$là hàm truyền từ mặt đường tới chuyển dịch khối lượng treo;

$W\psi_2(p)$là hàm truyền từ mặt đường tới góc lắc khối lượng treo;

$W\xi(p)$là hàm truyền từ mặt đường tới chuyển dịch khối lượng không treo;

$W\psi_1(p)$là hàm truyền từ mặt đường tới góc lắc khối lượng không treo;

Hệ phương trình (4) viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} WZ(p) \\ W\psi_2(p) \\ W\xi(p) \\ W\psi_1(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (K_L.p + C_L).(1 + \frac{q_P(p)}{q_T(p)}) \\ (K_L.\frac{b_1}{2}.p + C_L.\frac{b_1}{2}).(1 - \frac{q_2(p)}{q_1(p)}) \end{bmatrix}$$

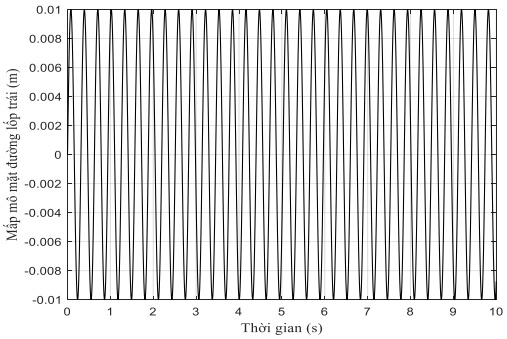
Sử dụng phần mềm matlab Simulink để giải cфыс hệ phương trình vi phân (2) Thông số được sử dụng dựa vào thông số kỹ thuật của xe chỉ huy Uaz-31512.

Bảng 1. Các thông số đầu vào

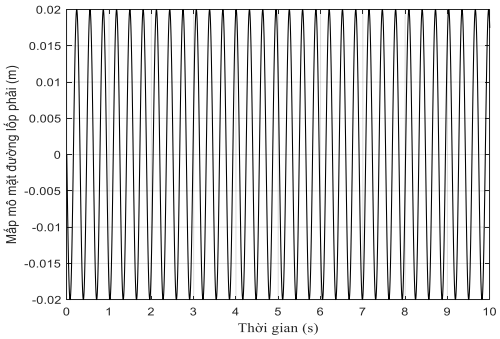
TT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Khối lượng phần treo khi xe đủ tải	M	kg	2480
2	Khoảng cách giữa 2 giảm chấn	b_2	m	1,3
3	Khoảng cách 2 bánh xe	b_1	m	1,45
4	Khối lượng không treo	m	kg	410
5	Độ cứng nhíp phần treo	C	N/m	70000
6	Độ cứng lốp	C_L	N/m	750000
7	Hệ số cản giảm chấn phần treo	K	Ns/m	7800
8	Hệ số cản của lốp	K_L	Ns/m	42000
9	Mô men quán tính khối lượng phần treo đối với trục Ox	J_{x2}	$N.m^2$	2535
10	Mô men quán tính khối lượng không treo đối với trục Ox	J_{x1}	$N.m^2$	385

3. Kết quả nghiên cứu

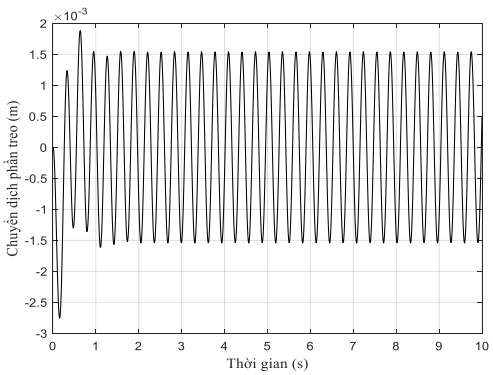
Quá trình mô phỏng kết quả với mấp mô mặt đường dạng hình sin, độ lệch pha giữa 2 bên lốp là pi và biên độ 2 bên lốp là không như nhau.

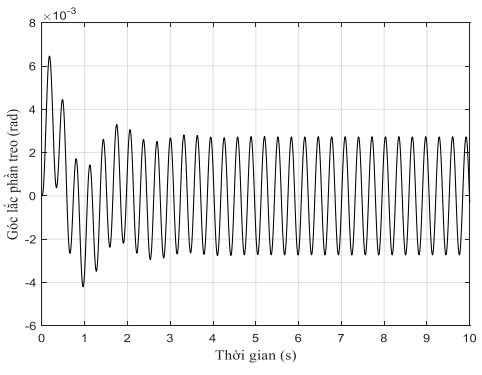


Hình 2. Đồ thị mấp mô mặt đường lốp trái

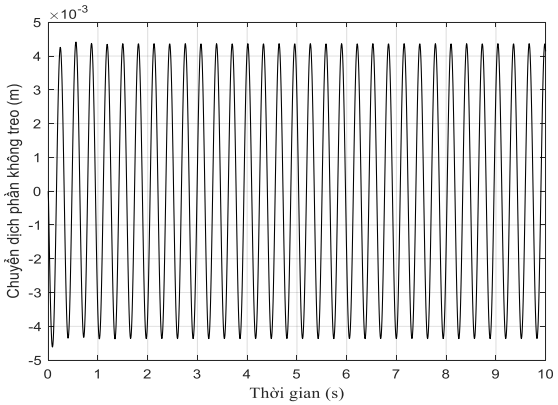


Hình 3. Đồ thị mấp mô mặt đường lốp phải

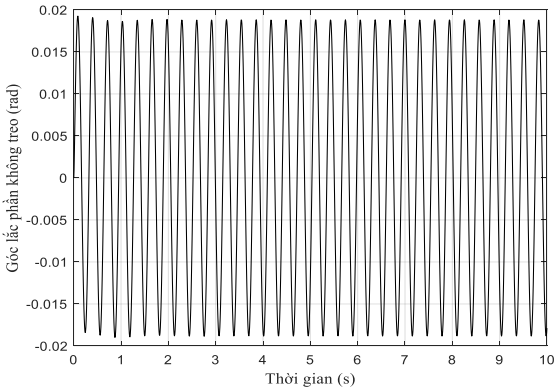




Hình 4. Đồ thị chuyển dịch phần treo

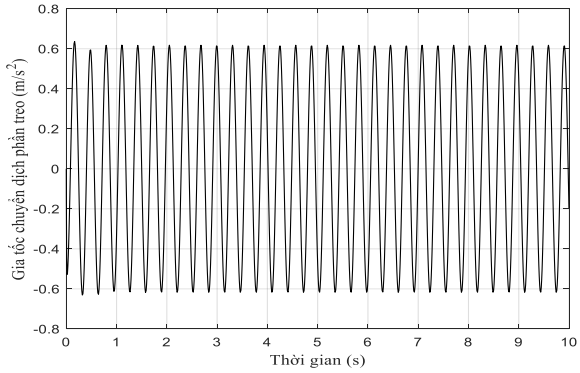


Hình 5. Đồ thị góc lắc phần treo

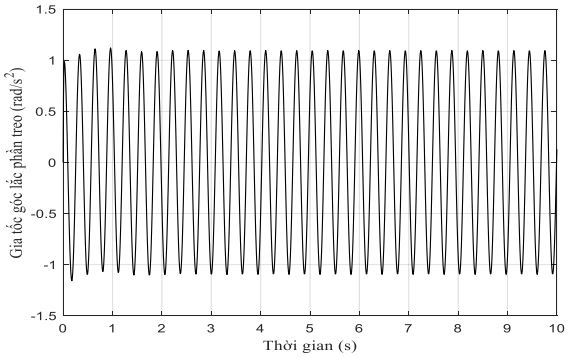


Do hệ thống treo phụ thuộc nên khi mấp mô mặt đường 2 bên lốp khác nhau (phức tạp) thì đồ thị chuyển dịch phần treo vẫn rất đơn giản do sự bù trừ lẫn nhau, nhưng đồ thị góc lắc sẽ rất phức tạp và lâu ổn định hơn do tính chất bị tác dụng 2 bên khác nhau.

Hình 6. Đồ thị chuyển dịch phần không treo

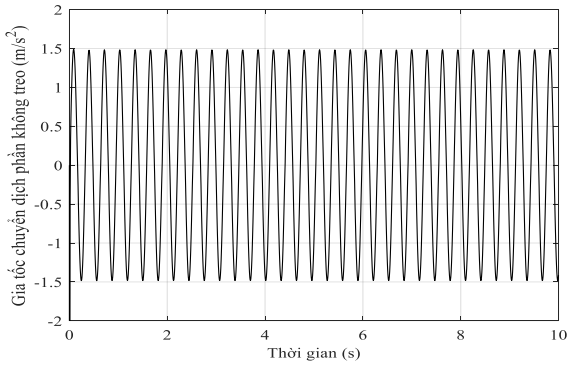


Hình 7. Đồ thị góc lắc phần không treo

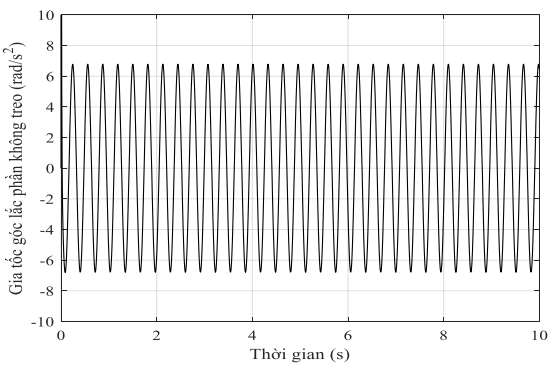


Từ đồ thị phần không treo ta nhận thấy các góc lắc và chuyển dịch đều lớn hơn phần treo rất nhiều còn chuyển dịch phần không treo cũng do có sự bù trừ ở độ lệch pha pi nên cũng khá nhỏ.

Hình 8. Gia tốc chuyển dịch phần treo



Hình 9. Gia tốc góc lắc phần treo



Do hệ thống treo phụ thuộc nên gia tốc góc lắc sẽ lớn hơn nhiều so với gia tốc chuyển dich và gia tốc chuyển dịch cũng sẽ khá cao.

Hình 10. Gia tốc chuyển dịch phần không treo

Hình 11. Gia tốc góc lắc phần không treo

Do sự phức tạp của hệ thống treo và tác động qua lại ở hệ thống treo phụ thuộc nên dù chuyển dịch nhỏ nhưng gia tốc chuyển dịch và gia tốc lắc ở phần không treo cực kì cao, ảnh hưởng lớn đến tuổi thọ.

Nhận xét: Từ đồ kết quả đồ thị ta nhận thấy:

Các đồ thị kết quả phản ánh rõ sự thay đổi trong dao động của ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc được đưa vào mô hình. Đặc biệt, có thể nhận thấy sự thay đổi rõ rệt về biên độ dao động của các bộ phận khác nhau của xe, như chuyển dịch và góc lắc phần treo và không treo dưới tác động của các ngoại lực (mấp mô mặt đường).

Thường thì hệ thống treo phụ thuộc có thể làm tăng biên độ, gia tốc dao động của các bộ phận xe, đặc biệt là khi xe di chuyển qua những đoạn đường không bằng phẳng.

Từ đồ thị kết quả, bạn có thể nhận xét về tính khả thi của mô hình trong việc ứng dụng vào thiết kế và tối ưu hóa các hệ thống treo cho ô tô thực tế. Những phát hiện từ mô hình dao động ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc có thể giúp cải thiện hiệu quả và an toàn của các hệ thống treo phụ thuộc trong các điều kiện vận hành cụ thể.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình dao động ô tô 2 cầu với hệ thống treo phụ thuộc, từ đó đánh giá được sự ảnh hưởng của hệ thống treo phụ thuộc đến đặc tính dao động của xe. Các kết quả này đóng vai trò quan trọng trong việc phát triển các phương án tối ưu hóa hệ thống treo cho ô tô, nhằm nâng cao sự ổn định và an toàn khi vận hành. Nghiên cứu cũng mở ra hướng đi cho việc ứng dụng mô hình trong thiết kế và cải tiến các loại xe, đặc biệt là trong các điều kiện vận hành khắc nghiệt.

Tài liệu tham khảo

1. Vũ Đức Lập. (2004), *Sổ tay tra cứu tính năng kỹ thuật ôtô,* HVKTQS.
2. Nguyễn Hoài Thanh, Nguyễn Thanh Việt, Bùi Xuân Lâm. (2002). *Ứng dụng Matlab trong tính toán kỹ thuật*, Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. Hồ Chí Minh.
3. Phan Thanh Tạo. (2006). *Giáo trình Matlab*, ĐH Đà Nẵng.
4. Vũ Đức Lập. (2011), *Dao động ô tô*, Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, Hà Nội.
5. А.В.Волков, А.Н.Иванцов, *Автомобили УАЗ-3151, УАЗ-31512, УАЗ-31514, УАЗ-31519 и их модификации,* завода Макаров А.И.

Development of a Two-Axle Automotive Vibration Model with a Dependent Suspension System

Abstract: *In the military field, two-axle vehicles with dependent suspension systems are widely used due to their simple structure, high reliability, and superior off-road capability. This paper presents the development of a vibration model for a two-axle vehicle with a dependent suspension system. The model is formulated based on differential equations of motion, taking into account the effects of load, suspension stiffness, and damping coefficient to simulate their impact on ride comfort and driving smoothness. The study provides a theoretical foundation for optimizing suspension system design, contributing to improved vehicle performance.*

Keywords: dependent suspension system, two-axle vehicle, half-car vibration model

❑

Mô phỏng động lực học trợ lực thủy lực hệ thống lái ô tô KAMAZ bằng phần mềm Matlab - Simulink

Nguyễn Hữu Quyết[1], TS.Vũ Mạnh Dũng[2]

[1]Hệ 2, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2]Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: nguyenquyetmta1986@gmail.com, Tel: 0867938558

Tóm tắt

Hệ thống lái trên ô tô là một hệ thống quan trọng, nó đảm bảo cho yếu tố an toàn cho người và phương tiện tham gia giao thông. Chính vì vậy, hệ thống lái trên ô tô ngày càng được cải tiến, hoàn thiện với trợ lực thủy lực giúp giảm nhẹ cường độ lao động cho lái xe, nâng cao an toàn chuyển động. Bài báo này tập trung nghiên cứu cấu tạo của hệ thống lái có trợ lực thủy lực trên xe tải KAMAZ. Bên cạnh đó tính toán động lực học của trợ lực thủy lực hệ thống lái và ứng dụng phần mềm Matlab - Simulink vào tính toán, mô phỏng động lực học. Kết quả của bài báo là cơ sở khoa học để xác định các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng động lực học của dẫn động điều khiển hệ thống lái trợ lực. Thêm vào đó, mô hình động lực học chính xác có thể hỗ trợ trong việc dự đoán và chẩn đoán hư hỏng sớm, giúp ngăn ngừa các tình huống nguy hiểm.

Từ khóa: *Mô phỏng động lực học; Trợ lực lái thủy lực; Hệ thống lái; Mô phỏng Matlab - Simulink*

1. Đặt vấn đề

Hệ thống lái đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn, độ chính xác và sự thoải mái khi vận hành ô tô. Trong đó, hệ thống trợ lực thủy lực đóng vai trò then chốt, nhất là đối với những phương tiện có kích thước lớn như ô tô KAMAZ, giúp giảm thiểu đáng kể lực tác dụng lên vô lăng. Tuy nhiên, trong thực tế khai thác, hiệu quả hoạt động của hệ thống này vẫn còn những hạn chế, bao gồm độ nhạy thấp, tuổi thọ linh kiện chưa cao và nguy cơ ảnh hưởng tới độ an toàn khi vận hành trong điều kiện phức tạp.

Trong xu thế hiện nay, việc ứng dụng các công cụ tính toán hiện đại như Matlab - Simulink để mô phỏng và phân tích đặc tính động lực học của hệ thống trợ lực thủy lực đang trở thành hướng đi đáng quan tâm. Phần mềm Matlab - Simulink cung cấp môi trường linh hoạt, giúp xây dựng các mô hình mô phỏng tính toán, đánh giá và tối ưu hóa hiệu quả hoạt động của hệ thống.

Mục tiêu của đề tài này là nghiên cứu, xây dựng mô hình mô phỏng động lực học của hệ thống trợ lực thủy lực trên ô tô KAMAZ bằng Matlab - Simulink. Thông qua mô hình này, tác giả sẽ phân tích, đánh giá những yếu tố tác động tới hiệu quả trợ lực của trợ lực thủy lực sử dụng trên xe. Từ đó làm cơ sở cho khai thác xe hiệu quả và đảm bảo an toàn.

2. Cơ sở lý thuyết mô hình động lực học trợ lực thủy lực hệ thống lái ô tô KAMAZ

2.1. Giả thiết mô hình

Các hệ thống dẫn động thuỷ lực trên ô tô đều là phi tuyến, nghĩa là chúng được mô tả bởi hệ các phương trình tuyến tính và phi tuyến. Việc giải các hệ phương trình này thường gặp rất nhiều khó khăn. Do đó, để đơn giản cho quá trình mô phỏng động lực học trợ lực thủy lực hệ thống lái trên ô tô KAMAZ chúng ta sử dụng một số giả thiết sau:

- Các tính chất của chất lỏng làm việc (nhiệt độ, mật độ, số lượng không khí không hoà tan) không bị thay đổi trong suốt quá trình chuyển tiếp.

- Dòng chảy chất lỏng trong hệ thống là chế độ chảy tầng.

- Không có sự mất mát rò rỉ của môi trường làm việc.

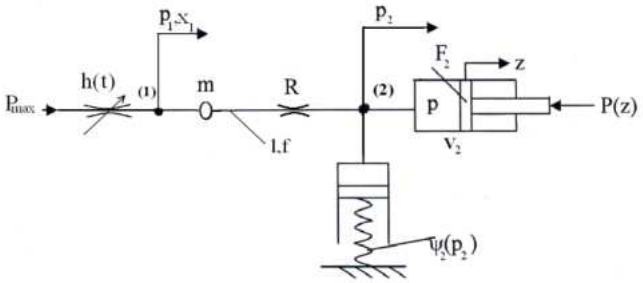
- Bỏ qua ảnh hưởng của các quá trình sóng tới động lực học của hệ thống (ống dẫn ngắn).

- Bỏ qua các lực ma sát, khối lượng của pít tông của xy lanh lực. Bỏ qua độ nhám tương đối của đường ống dẫn thuỷ lực.

- Khối lượng chất lỏng trong hệ thống tập trung toàn bộ tại xy lanh lực.

2.2. Xây dựng mô hình khảo sát

Để thiết lập được hệ phương trình vi phân mô tả động lực học dẫn động hệ thống lái có trợ lực bằng thuỷ lực phải sử dụng phương trình cân bằng áp suất của đoạn mạch thuỷ lực, phương trình lưu lượng dòng chảy tại mỗi nút mạch, phương trình chuyển động của pít tông xi lanh công tác.



Hình 1. Sơ đồ mô hình khảo sát dẫn động trợ lực thủy lực hệ thống lái trên ô tô

Trong đó: Pmax - Lực đặt lên con trượt của van phân phối [N];

h(t)- Quy luật dịch chuyển của con trượt (hoặc độ mở của van) theo thời gian;

x_1- Chuyển dịch của cột chất lỏng tại điểm (1), [m];

p_1, p_2, p - Áp suất chất lỏng tại đường ống tại điểm, (1), (2) và xy lanh công tác [N/m^2];

m - Khối lượng chất lỏng trong đường ống dẫn, [Kg];

L, f- chiều dài, tiết diện đường ống dẫn, [m], [m^2];

R- sức cản thuỷ lực trên đường ống dẫn;

F_2- Diện tích pít tông xi lanh công tác (Xilanh lực), [m^2];

z- Dịch chuyển của pít tông trong xi lanh công tác, [m];

$\Psi_2(p_2)$- Hệ số đàn hồi của chất lỏng phụ thuộc p_2;

p(z)- Phản lực tác dụng lên cần pít tông xi lanh công tác, [N].

Phương trình cân bằng áp suất tại đoạn ống (1) của hệ thống thuỷ lực khi tính đến các tổn thất được viết như sau[1]:

$$p_j + p_l + p_m + p_2 = p_1 \quad (1)$$

Trong đó: p_j- Tổn thất quán tính của chất lỏng.

p_l- Tổn thất trên đường ống tiết diện tròn.

p_m- Tổn thất cục bộ.

Bỏ qua khả năng đàn hồi và tính chịu nén của chất lỏng thì ta có lượng chất lỏng đi qua nút (1) đúng bằng lượng chất lỏng đi vào xi lanh công tác và làm dịch chuyển pít tông. Nghĩa là đối với x_1 ta có:

$$fx_1 = F_2 z_1$$

ở đây z_1 chính là dịch chuyển x_1 quy về pít tông công tác.

Vậy ta có:

$$x_1 = \frac{F_2}{f} z_1; \frac{dx_1}{dt} = \frac{F_2}{f}\frac{dz_1}{dt}; \quad \frac{d^2x_1}{dt^2} = \frac{F_2}{f}\frac{d^2z_1}{dt^2};$$

Khi đó ta có:

$$p_j = \frac{\rho l}{f}\frac{F_2}{dt^2}\frac{d^2z_1}{dt^2}; \; p_l = 27.5\frac{\rho v l F_2}{f^2}\frac{dz_1}{dt} + 0{,}443\frac{k_э \rho l}{\sqrt{f}}\left(\frac{F_2}{f}\right)^2\left(\frac{dz_1}{dt}\right)^2 \operatorname{sgn}\frac{dz_1}{dt}$$

$$p_M = 0{,}5\zeta\rho\left(\frac{F_2}{f}\right)^2\left(\frac{dz_1}{dt}\right)^2 \operatorname{sgn}\frac{dz_1}{dt}$$

Phương trình vi phân mô tả sự chuyển động của chất lỏng trong đoạn (1-2) ta có [1]:

$$a_1\frac{d^2z_1}{dt^2} + a_2\frac{dz_1}{dt} + a_3\left(\frac{dz_1}{dt}\right)^2 \operatorname{sgn}\frac{dz_1}{dt} + p_2 = p_1 \qquad (2)$$

Trong đó:

$$a_1 = \rho l\frac{F_2}{f}; a_2 = 27{,}5\rho v l\frac{F_2}{f^2}; a = \left(0{,}433\frac{k_\varepsilon \rho l}{\sqrt{f}} + 0{,}5\zeta\rho\right)\left(\frac{F_2}{f}\right)^2$$

Với: ξ - Hệ số của sức cản cục bộ; F_2- Diện tích pít tông xi lanh công tác (xilanh lực) [m^2];

L - Chiều dài đường ống dẫn [m]; f- Diện tích mặt cắt ống dẫn [m^2];

ρ - Khối lượng riêng của chất lỏng công tác [Kg/m^3];

ν - Độ nhớt động học của chất lỏng công tác [m^2/s];

z_1 - Dịch chuyển x_1 quy về pít tông công tác [m].

Phương trình lưu lượng đối với mạch thủy lực tại các nút (1), (2) như sau:

$Q_1 = Q_2 + Q_1d$; $Q_2 = Q_3 + Q_2d$

Do thể tích V_1 ở van phân phối rất nhỏ nên nói chung người ta bỏ qua hệ số $\psi_1(p_1)$ nên ta chỉ tính lưu lượng qua nút (2) ta có:

$$Q_2 = f\frac{dx_1}{dt}; Q_3 = F_2\frac{dz}{dt}; Q_{2d} = V_2\psi_2(p_2)\frac{dp_2}{dt};$$

Thay các giá trị ta có: $$\frac{f dx_1}{dt} = \frac{F_2 dx_1}{dt} + \frac{V_2\,\psi_2(p_2)dp_2}{dt} \qquad (3)$$

Trong đó:

V - Thể tích của chất lỏng trong mạch thủy lực;

$\psi_2(p_2)$ - hệ số tính đến tính chịu nén của các bộ phận của lái thuỷ lực.

Hệ số chịu nén: Theo [Metlink] thì có thể tính theo công thức thực nghiệm sau:

$\psi(p_0) = b_1 \exp[-0{,}0165(P_0 - P_{01})]$.

Trong đó:

$$b_1 = 0{,}0182\left(\frac{1-a}{A_a}\ln\left|\frac{E_{a0} + A_a P_{\max}}{E_{a0} + A_a P_1}\right| - \frac{a}{P_{\max}^{1/n}} + a\right)$$

A_a, E_a - Các thông số cho loại chất lỏng và nhiệt độ của nó;

a - Thể tích tương đối ban đầu của khí trong chất lỏng;

Pmax, Po, và P- áp suất chất lỏng lớn nhất; N = 1.4 - Chỉ số đa biến.

Phương trình chuyển động của pít tông xi lanh công tác được viết như sau [1] :

$$m_{td}\frac{d^2z}{dt^2}+k_b\frac{dz}{dt}+P_{(z)}+P_{ms}\,\mathrm{sgn}\frac{dz}{dt}-p_2F_2=0.$$

Khi bỏ qua khối lượng của các phần tử chuyển động qui về pít tông và lực ma sát, ta có:

$$P_2=\frac{P_{(z)}}{F_2},\ \text{Suy ra:}\ \frac{dP_2}{dt}=\frac{dP_{(z)}}{F_2dt}. \quad (4)$$

Phương trình lưu lượng qua nút (1). Phương trình này được viết như sau [1]:

$$\mu bh(t)\sqrt{\frac{2(p_{\max}-p_1)}{\rho}}=F_2\frac{dz_1}{dt} \quad (5)$$

Trong đó:

μ - hệ số lưu lượng; b- bề rộng cửa sổ của con trượt phân phối;

h(t) - dịch chuyển của con trượt.

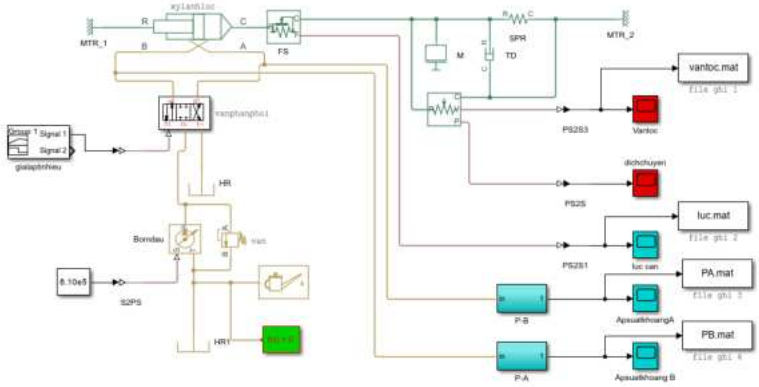
Trong phương trình này, ứng với h(t) cho trước ta có thể xác đinh được p_1.

Hệ phương trình vi phân mô tả động lực học dẫn động trợ lực thuỷ lực theo sơ đồ hình 1 gồm các phương trình vi phân từ (1) đến (5).

2.3. Xây dựng chương trình mô phỏng

Chương trình mô phỏng được xây dựng trên phần mềm Matlab - Simulink. Bằng việc sử dụng modul chức năng đã được tích hợp trong thư viện SimHydraulics ta tiến hành xây dựng các khối trong hệ thống để mô phỏng các phương trình vi phân từ (1) đến (5) [2, 3].

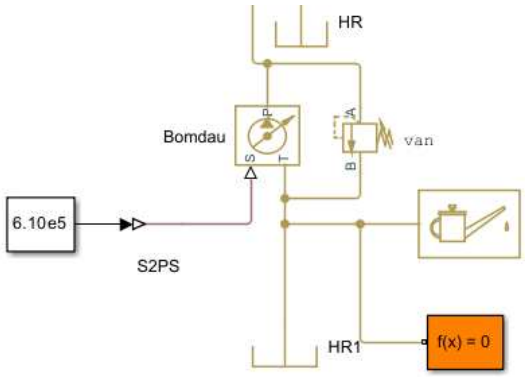
Hình 2 thể hiện sơ đồ mô phỏng mạch thủy lực của hệ thống lái có trợ lực bằng thủy lực.



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng hệ thống lái có trợ lực bằng thủy lực

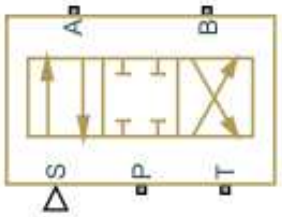
Sơ đồ mô phỏng gồm có các khối chính sau:

- *Khối cụm bơm thủy lực*: Trên hình 3 mô tả mô hình khối cụm bơm thủy lực gồm: Bơm thuỷ lực, trên thân bơm có đặt van an toàn và van thông qua. Van an toàn sẽ khống chế áp suất trong giới hạn 6 - 6,5 Mpa. Bơm thuỷ lực trong hệ thống lái trên xe KAMAZ là bơm cánh gạt.



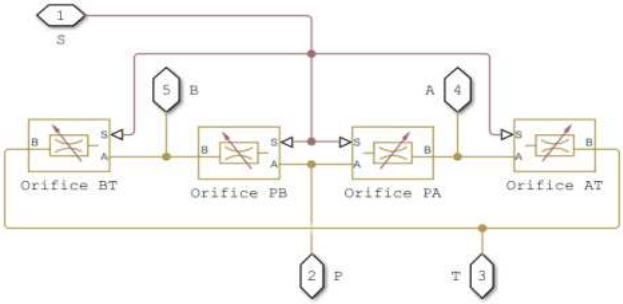
Hình 3. Mô hình khối cụm bơm thủy lực

- *Khối cụm van phân phối*: Van phân phối ở hệ thống lái của KAMAZ là van kiểu con trượt 4 cửa 3 trạng thái. Hình 4 mô tả khối van phân phối trên tools box – SimHydraulics.



Hình 4. Mô hình cụm van phân phối

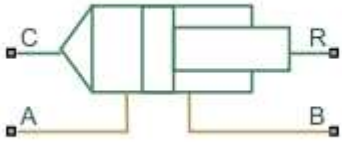
Sơ đồ bố trí cụm van tiết lưu được bố trí như hình 5. Các khối van tiết lưu được lắp đặt như sau: Cửa PA nằm trên đường P-A, cửa PB nằm trên đường P-B, cửa AT nằm trên đường A-T và cửa BT nằm trên đường B-T. Tất cả các khối này được điều khiển bởi tín hiệu vị trí như nhau, được cung cấp thông qua cửa tín hiệu vật lý S. Khối van phân phối thoả mãn các phương trình (1), (2) và (5).



Hình 5. Sơ đồ cụm van phân phối

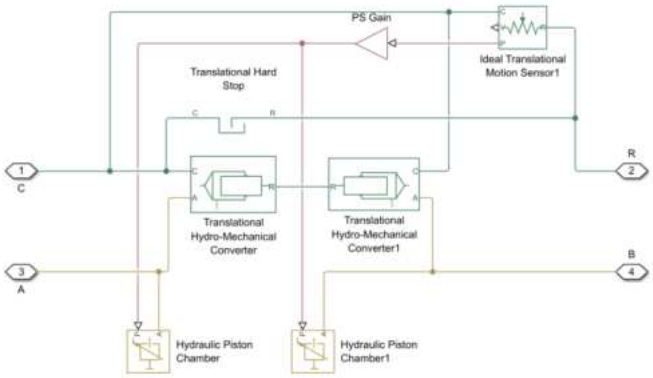
Đầu ra của cụm van phân phối là lưu lượng Q_A và Q_B tại các cửa A và B.

Trên hình 6 là mô hình cụm xi lanh thủy lực tác động kép.



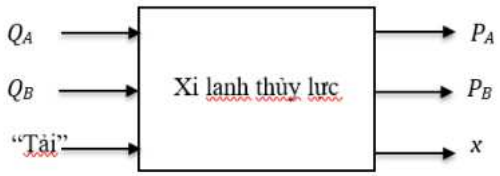
Hình 6. Mô hình cụm xi lanh thủy lực

Xi lanh thuỷ lực chuyển đổi năng lượng thuỷ lực thành cơ năng theo dạng chuyển động tịnh tiến để thực hiện công việc đó dầu thuỷ lực được bơm vào một trong hai buồng của xi lanh tác động làm pít tông di chuyển và tác dụng lực lên cung răng rẻ quạt tác động lên các cơ cấu dẫn động làm quay bánh xe. Xi lanh thuỷ lực của hệ thống lái trên xe KAMAZ là xi lanh thuỷ lực tác động kép nghĩa là pít tông có thể dịch chuyển tác động lên cơ cấu dẫn động làm bánh xe quay thì ngược lại bánh xe có thể tác động ngược trở lại khi bánh xe đi vào đường mấp mô có mô men cản lớn. Xi lanh thuỷ lực tác động kép có sơ đồ như hình 7 thỏa mãn các phương trình sau (3) và (4).



Hình 7. Sơ đồ cụm xi lanh thủy lực

Khối xi lanh thủy lực gồm ba tín hiệu đầu vào và ba tín hiệu đầu ra được thể hiện trên hình 8



Hình 8. Các tín hiệu vào, ra của xi lanh thủy lực

Trong đó các tín hiệu vào bao gồm:

- Lưu lượng dầu vào khoang A của xi lanh thủy lực: Q_A.
- Lưu lượng dầu vào khoang B của xi lanh thủy lực: Q_B.
- Tải trọng tác dụng của xi lanh thủy lực.

Các tín hiệu ra của cụm xi lanh thủy lực gồm:- Chuyển vị của pít tông: x.

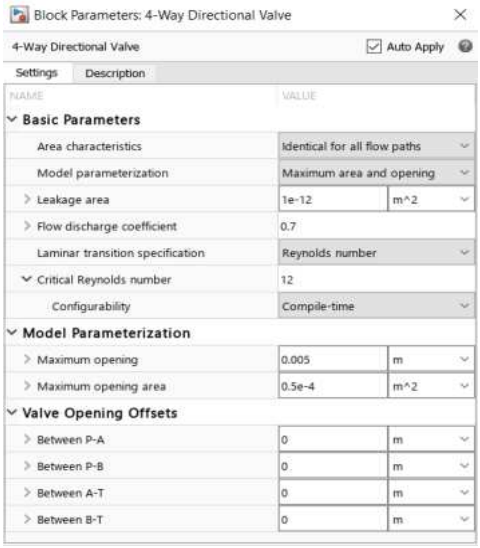
- Áp suất dầu trong khoang A của xi lanh thủy lực: p_A.
- Áp suất dầu trong khoang B của xi lanh thủy lực: p_B.

Đề tài sử dụng phương pháp nhập số liệu trực tiếp từ các khối trong trong Simulink. Các thông số đầu vào được tra cứu và tham khảo trong các tài liệu tham khảo [4-8].

+ Đối với bơm phiến gạt tác dụng kép sử dụng trong hệ thống lái trên ô tô KAMAZ, áp suất dầu trợ lực tại đầu ra vào khoảng 6 ÷ 6.5 Mpa. Ta chọn giá trị đầu vào là 6 Mpa.

+ Xi lanh công tác là loại xi lanh tác dụng 2 chiều, khi đó pít tông của xi lanh công tác có thể dịch chuyển theo hai chiều. Ta đặt giá trị diện tích của các khoang trong xi lanh A và B là như nhau và bằng là 40 cm^2. Lực cản đặt lên pít tông xi lanh công tác là 1500 N tương ứng với 150 kg.

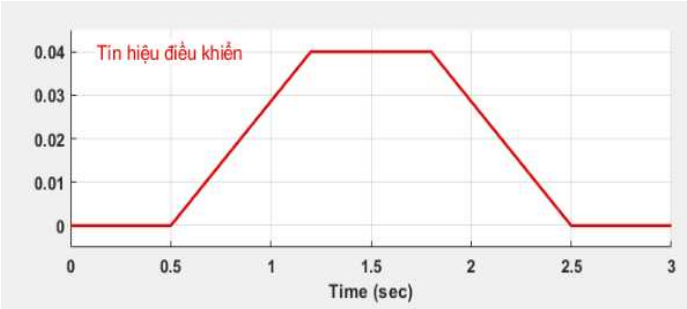
+ Thông số của van phân phối được thể hiện trên hình 9.



Hình 9. Hộp thoại và các thông số của van phân phối

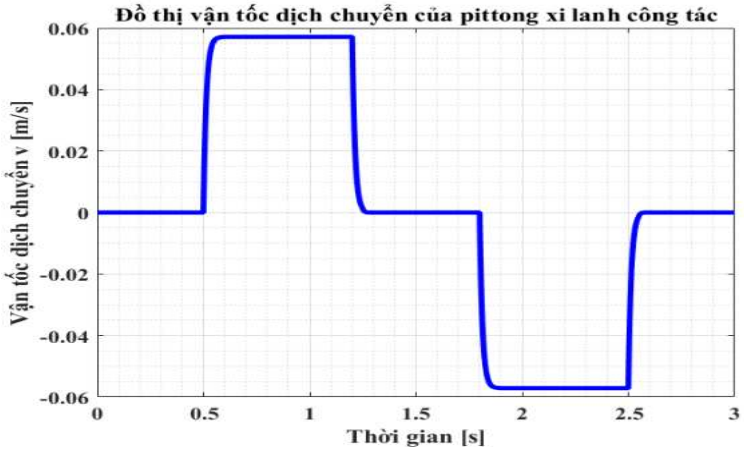
3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Tín hiệu điều khiển van phân phối được chọn giống với quá trình đánh lái trong thực tế. Ban đầu tiến hành đánh lái sang một phía, sau đó giữ vành tay lái, khi xe đã thực hiện xong quá trình chuyển hướng, người lái tiến hành đánh lái về vị trí như khi chuyển động thẳng (hình 10).



Hình 10. Tín hiệu điều khiển van phân phối

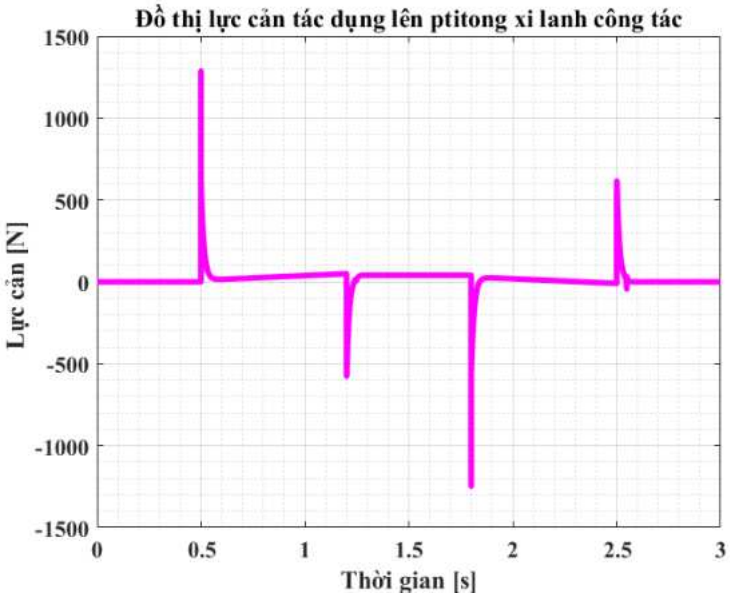
Hình 11 thể hiện vận tốc dịch chuyển của pít tông xi lanh công tác.



Hình 11. Đồ thị vận tốc dịch chuyển của pít tông xi lanh công tác

Nhận xét: Khi xe đang chuyển động thẳng, pít-tông của xi lanh công tác không dịch chuyển. Khi lái xe bắt đầu xoay vô - lăng, vận tốc của xi lanh công tác tăng nhanh, đạt gần 0,06 m/s và duy trì ổn định trong khoảng gần 1 giây. Khi lái xe dừng xoay vô - lăng, vận tốc giảm nhanh về 0 m/s và giữ nguyên khi vành tay lái được giữ cố định. Trong quá trình trả lái, vận tốc thay đổi tương tự như lúc đánh lái nhưng mang giá trị âm. Cuối cùng, vận tốc trở về 0 m/s khi xe hoàn tất quá trình chuyển hướng.

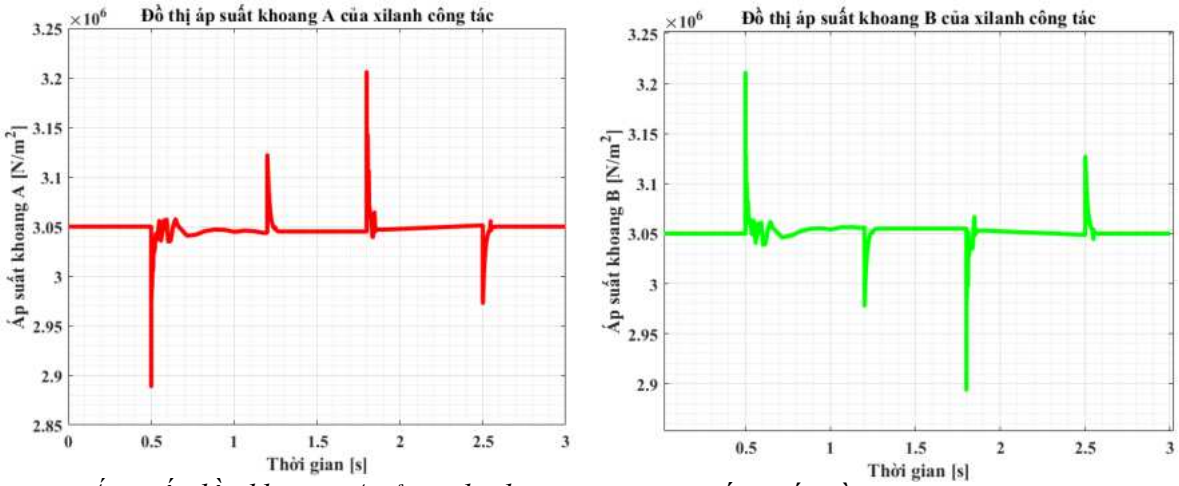
Đồ thị lực cản tác dụng lên pít tông của xi lanh công tác được thể hiện trên hình 12.



Hình 12. Đồ thị lực cản tác dụng lên pít tông xi lanh công tác

Nhận xét: Nhìn trên đồ thị ta có thể thấy rằng ban đầu khi xe đang trong trạng thái chuyển động thẳng, lực cản bằng "0". Khi bắt đầu đánh lái lực cản tăng nhanh lên gần 1500 N và giảm sau đó tăng trong quá trình đánh lái. Khi giữ vành tay lái giá trị lực này mang dấu âm, và khi kết thúc quá trình quay vòng lực cản tăng lên và dần trở về giá trị "0".

Các đồ thị biểu diễn áp suất dầu trợ lực trong các khoang của xi lanh công tác được thể hiện như trên các hình 13.



a. Áp suất dầu khoang A của xi lanh *b. Áp suất dầu khoang B của xi lanh*

Hình 13. Áp suất dầu khoang A,B của xi lanh công tác

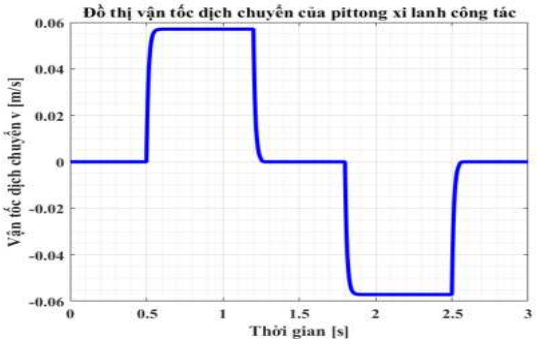
Nhận xét: Đồ thị thể hiện áp suất trong hai khoang của xi lanh có sự thay đổi. Ở mỗi trạng thái chuyển tiếp của quá trình đánh lái sự biến thiên của áp suất giữa hai khoang là trái ngược nhau đó là có cùng giá trị về độ lớn nhưng ngược dấu nhau. Khi xe chuyển động thẳng áp suất giữa hai khoang bằng nhau và bằng khoảng 3,05 N/m^2, đảm bảo tính năng ổn định chuyển động thẳng của xe.

***Ảnh hưởng của các thông số dẫn động**

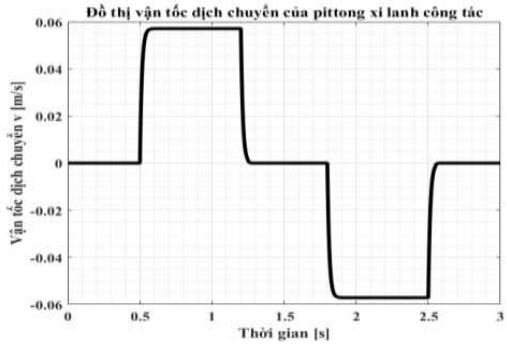
Các thông số dẫn động như: Áp suất dầu trợ lực, tiết diện đường ống, độ nhớt động học của dầu trợ lực lái…, có ảnh hưởng nhất định đến các thông số động lực học của hệ thống lái. Trong nội dung, đề tài sẽ tiến hành khảo sát sự thay đổi của thông số áp suất dầu trợ lực lái đến các thông số động lực học của hệ thống lái có trợ lực bằng thủy lực.

Việc thay đổi áp suất dầu trợ lực lái trên sơ đồ mô phỏng được thực hiện bằng cách thay đổi thông số đầu vào của bơm. Tiến hành giảm áp suất bơm dầu từ 6 Mpa xuống 4 Mpa và so sánh kết quả với nhau..

Trên hình 14 thể hiện vận tốc dịch chuyển của xi lanh công tác khi giảm áp suất dầu trợ lực lái.



a. Khi áp suất dầu trợ lực là 6 Mpa

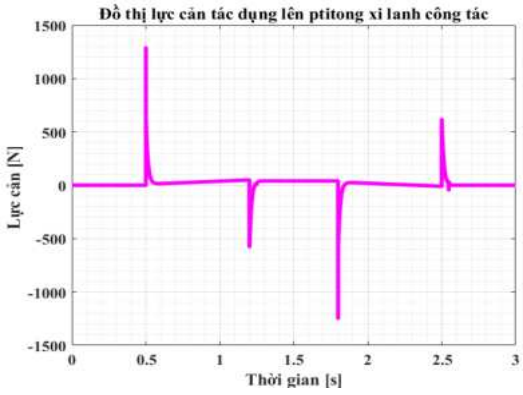


b. Khi áp suất dầu trợ lực là 4 Mpa

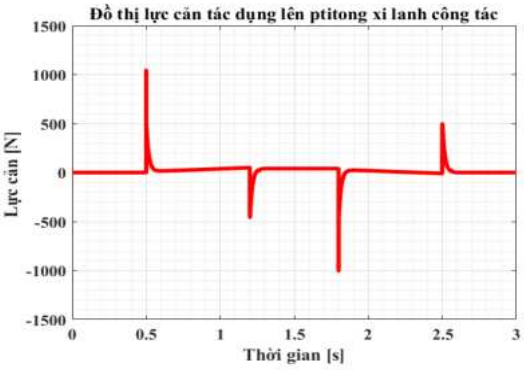
Hình 14. Đồ thị vận tốc dịch chuyển của pít tông xi lanh công tác

Nhận xét: Nhìn vào đồ thị ta thấy rằng quy luật biến thiên vận tốc dịch chuyển của pít tông xi lanh công tác trong hai trường hợp là tương tự nhau và không có sự khác nhau nhiều về mặt trị số.

Hình 15 thể hiện lực cản tác dụng lên pít tông xi lanh công tác khi giảm áp suất dầu trợ lực lái.



a. Khi áp suất dầu trợ lực là 6 Mpa

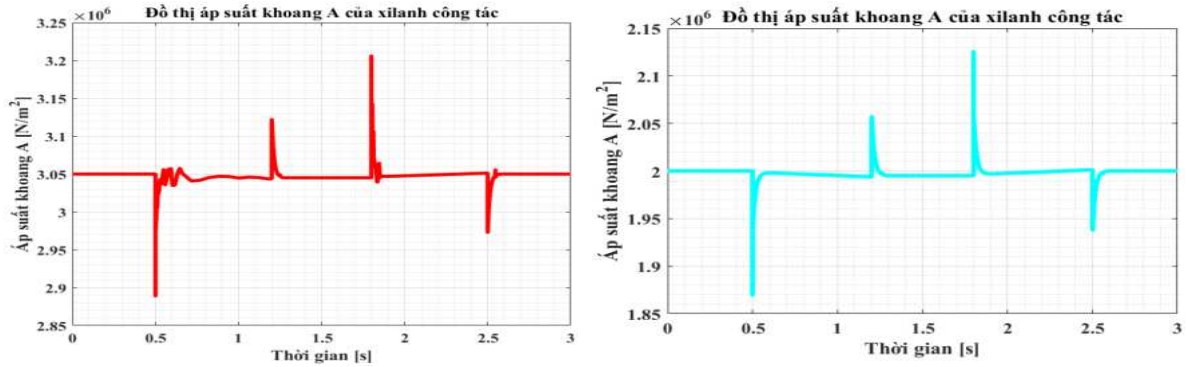


b. Khi áp suất dầu trợ lực là 4 Mpa

Hình 15. Đồ thị lực cản tác dụng lên pít tông xi lanh công tác

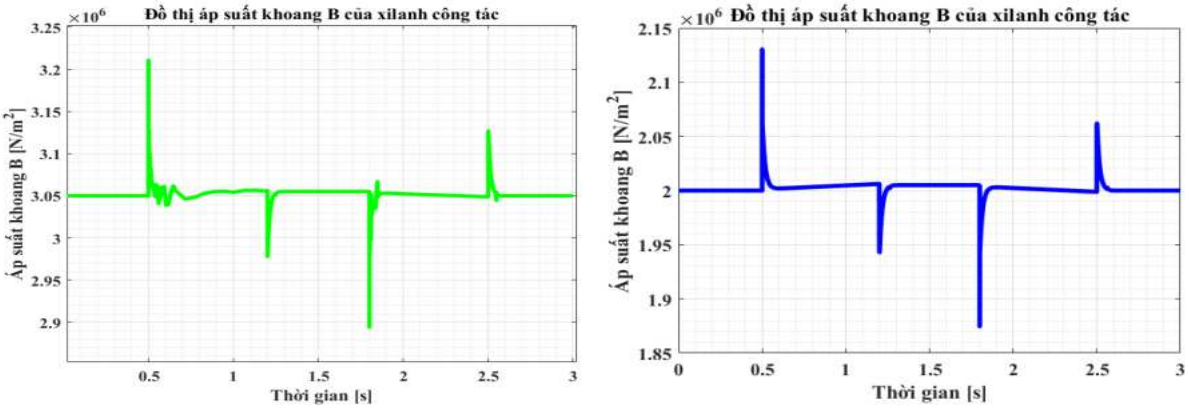
Nhận xét: Khi thay đổi áp suất dầu trợ lực lái thì lực cản tác dụng lên pít tông cũng thay đổi tỉ lệ thuận với sự thay đổi của áp suất bơm dầu tại các vị trí chuyển tiếp của quá trình đánh lái. Cụ thể là tại các vị trí chuyển tiếp của quá trình đánh lái khi áp suất dầu 6 Mpa lực cản này có trị số lớn hơn. Ta có thể thấy trên 2 đồ thị, tại vị trí bắt đầu đánh lái, lực cản khi áp suất dầu 6 Mpa là gần 1500 N, khi áp suất dầu là 4 Mpa lực cản là hơn 1000 N.

Hình 16 và hình 17 thể hiện áp suất dầu trợ lực lái trong các khoang của xi lanh công tác khi giảm áp suất dầu trợ lực lái.



a. Khi áp suất dầu trợ lực là 6 Mpa *b. Khi áp suất dầu trợ lực là 4 Mpa*

Hình 16. Đồ thị áp suất khoang A của xi lanh công tác khi giảm áp suất dầu trợ lực lái



a. Khi áp suất dầu trợ lực là 6 Mpa *b. Khi áp suất dầu trợ lực là 4 Mpa*

Hình 17. Đồ thị áp suất khoang B của xi lanh công tác khi giảm áp suất dầu trợ lực lái

Nhận xét: Khi thay đổi áp suất dầu trợ lực, thông số áp suất của dầu trợ lực trong các khoang của xi lanh công tác cũng có sự thay đổi tương tự giống thông số lực cản tác dụng lên pít tông xi lanh công tác.

4. Kết luận

Bài báo đã tiến hành nghiên cứu xây dựng mô hình động lực học trợ lực thủy lực hệ thống lái trên ô tô KAMAZ. Bên cạnh đó tiến hành mô phỏng động lực học của trợ lực thủy lực bằng phần mềm Matlab - Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình mô phỏng cho kết quả phù hợp với chuyển động thực tế của trợ lực thủy lực hệ thống lái trên xe. Mô hình có thể được sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số dẫn động ngoài thông số áp suất như độ nhớt động học của dầu trợ lực, tiết diện đường ống, tiết diện khoang xi lanh công tác… Trong khuôn

khổ của bài báo này tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của sự thay đổi áp suất của bơm dầu trợ lực đến động lực học của trợ lực thỷ lực và kết quả thể hiện cụ thể đó là: sự thay đổi thông số áp suất của dầu trợ lực cấp đến xi lanh công tác ta thấy rằng thông số động lực học của hệ thống lái cũng có sự thay đổi tương ứng. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong khai thác giúp nâng cao hiệu quả trợ lực và độ bền làm việc của hệ thống lái. Trong nghiên cứu để cải tiến, thiết kế mới cơ cấu trợ lực lái thủy lực trên các loại xe ô tô.

Tài liệu tham khảo

1. Trần Ngọc Hải (2019), *Giáo trình hệ thống thủy lực và khí nén*, Hà Nội, Nhà xuất bản Xây Dựng.
2. Nguyễn Phùng Quang (2006), Matlab và Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động, Hà Nội, NXB Khoa học kỹ thuật.
3. Nguyễn Xuân Tuấn, Nguyễn Thế Anh (2018), Ứng dụng Matlab/Simulink mô hình hóa và mô phỏng động lực học hệ thống thủy lực trợ lực lái ô tô,Tạp chí Khoa học và công nghệ xây dựng, số 47.2018, Hà Nội, Đại học Xây dựng Hà Nội,p155-159.
4. Tổng Cục Kỹ thuật (2020), *Tài liệu cấu tạo xe ô tô KAMAZ-43253, KAMAZ-43266 tập 1,* Tổng cục Kỹ thuật.
5. Cục xe - máy (2019), *Hướng dẫn sử dụng xe ô tô KAMAZ*, Tổng cục Kỹ thuật.
6. Vũ Đức Lập, Nguyễn Sĩ Đỉnh (2015), *Cấu tạo ô tô tập II*, Hà Nội, Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân.
7. Vũ Đức Lập (2015), *Kết cấu và tính toán tập II*, Hà Nội, Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân.
8. Nguyễn Phúc Hiểu, Vũ Đức Lập (2002), *Lý thuyết ô tô quân sự*, Hà Nội, Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân.

Dynamic Simulation of the Hydraulic Power Steering System in KAMAZ Trucks Using Matlab - Simulink

Abstract: *The steering system in automobiles is a crucial component that ensures the safety of both drivers and vehicles in traffic. As a result, modern steering systems are continuously improved and refined, with hydraulic power assistance helping to reduce the driver's workload and enhance vehicle maneuverability and safety. This paper focuses on studying the structure of the hydraulic power-assisted steering system in KAMAZ trucks. Additionally, it conducts dynamic analysis of the hydraulic power steering system and applies Matlab - Simulink software for dynamic calculation and simulation. The results of this study provide a scientific basis for identifying factors that affect the dynamic performance of the power-assisted steering control system. Furthermore, an accurate dynamic model can assist in predicting and diagnosing early failures, helping to prevent hazardous situations.*

Keywords: Dynamic simulation; Hydraulic power steering; Steering system; Matlab - Simulink simulation.

❑

Nghiên cứu các phương pháp lựa chọn tập thông số chẩn đoán

Trần Ngọc Quang[1], PGS.TS. Nguyễn Văn Dũng[1]

[1]Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

* Email: tranquangtn96ntky@gmail.com, Số điện thoại: 0982826814

Tóm tắt

Phương pháp lựa chọn tập thông số chẩn đoán được xây dựng dựa trên nền tảng các lý thuyết khoa học như lý thuyết thông tin, xác suất, và tập mờ, nhằm tối ưu hóa quá trình chẩn đoán tình trạng kỹ thuật của hệ thống. Dựa trên đặc điểm của từng hệ thống và đối tượng nghiên cứu, có thể áp dụng các phương pháp khác nhau để tối ưu hóa quá trình chẩn đoán và phân tích. Áp dụng vào hệ thống phanh khí nén của xe Kamaz - 43261, nghiên cứu minh họa hiệu quả của phương pháp áp dụng lý thuyết thông tin chọn ra tập thông số chẩn đoán hợp lý, giảm bớt thông tin dư thừa, đảm bảo phản ánh đầy đủ trạng thái kỹ thuật. Kết quả thực nghiệm không chỉ chứng minh tính khả thi của phương pháp mà còn mở ra hướng ứng dụng rộng rãi trong chẩn đoán kỹ thuật các hệ thống tương tự.

Từ khóa: *Thông số chẩn đoán; chẩn đoán hệ thống phanh; lý thuyết thông tin.*

1. Đặt vấn đề

Trên cơ sở mô hình chẩn đoán ta sẽ xác định được một số tập hữu hạn các hư hỏng - sự cố $X=\{Xj\}\,(j=1,2,...,m)$ và tập các thông số chẩn đoán: $S=\{Si\}(i=1,2,...,n)$. Tình trạng kỹ thuật của hệ thống được phản ánh thông qua tập các thông số chẩn đoán (S_i). Việc kiểm tra, xác định và phân tích toàn bộ các thông số đó là một việc làm hết sức phức tạp, có khi dẫn đến hiện tượng dư thừa thông tin, đồng thời nó sẽ tăng khối tượng dụng cụ đo, tăng độ phức tạp của thiết bị biến đổi và xử lý thông tin, tăng giá thành chẩn đoán. Do đó việc hợp lý hoá tập các thông số chẩn đoán có ý nghĩa lớn về mặt thực tế cũng như lý thuyết. Nghĩa là chúng ta cần phải giới hạn số thông số chẩn đoán đến mức độ hợp lý, nhưng vẫn đảm bảo chứa đựng đầy đủ thông tin về tình trạng kỹ thuật của hệ thống, làm cơ sở cho việc dự báo hành trình dự trữ của hệ thống trong khai thác.

2. Cơ sở lý thuyết

Trong lĩnh vực kỹ thuật ô tô, chẩn đoán tình trạng kỹ thuật của các hệ thống cơ khí là yếu tố quan trọng nhằm đảm bảo hiệu suất và an toàn cho phương tiện [3]. Việc lựa chọn tập thông số chẩn đoán hợp lý là bước quan trọng để đảm bảo quá trình chẩn đoán hiệu quả và chính xác, với các phương pháp lựa chọn tập thông số chẩn đoán bao gồm:

* Phương pháp kết hợp giữa lý thuyết thông tin và lý thuyết xác suất;

* Phương pháp lựa chọn theo cách kiểm tra tối thiểu;

* Phương pháp áp dụng lý thuyết thông tin;

* Phương pháp đánh giá thông qua tiêu chuẩn "trọng lượng" của các thông số;

* Phương pháp áp dụng lý thuyết tập mờ.

2.1. Phương pháp kết hợp giữa lý thuyết thông tin với lý thuyết xác suất

Giữa các hư hỏng và các thông số chẩn đoán của hệ thống có mối liên hệ phức tạp. Để tiện cho việc nghiên cứu - xem xét các quan hệ đó ta lập ma trận chẩn đoán [5]. Với các cột biểu diễn tập các hư hỏng sự cố (X_j) và các hàng biểu diễn tập các thông số chẩn đoán (S_i). Giá trị của các phần từ trong ma trận: $a[i,j]$ sẽ nhận giá trị là 1 nếu tham số thứ S_i có phản ứng

với hư hỏng X_j, biểu hiện bằng sự vượt quá giới hạn cho phép, và nhận giá trị bằng 0 nếu tham số thứ S_i không có phản ứng với hư hỏng X_j (bảng 1).

Bảng 1. Ma trận logic

S_i \ X_j	X_1	X_2	X_3
S_1	1	1	0
S_2	1	0	1
S_3	1	1	1
S_4	0	0	1

Nếu gọi:

P_{ij} - là xác xuất không điều kiện, như vậy hệ thống các hư hỏng X sẽ nằm trong X_j, còn hệ thống các thông số S sẽ nằm trong S_i.

$P(x_j)$ - là xác suất hư hỏng đã xuất hiện X_j hoặc xác suất hệ thống X trong trạng thái X_j.

$P(s_i)$ - là xác suất triệu chứng đã rõ ràng S_i hoặc xác suất hệ thống S trong trạng thái S_i.

H_i - là phần tin tức nhận được về hệ thống từ thông số S_i.

n_j - là số lượng các triệu chứng đặc trưng cho hư hỏng X_j.

Ta sẽ có: $P(x_j)=\frac{1}{m}$ (Nếu các hư hỏng có đồng xác suất); $P_{ij}=\frac{1}{m}.\frac{1}{n_j}$;

$$P(s_i)=\frac{1}{m}.\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{n_j};\ H_i=\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{n_j\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{n_j}}.\log_2\frac{m}{n_j\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{n_j}}$$

Trên cơ sở kết quả tính toán được ta sẽ thiết lập ma trận xác suất và thông tin như bảng 2. Từ kết quả ta thấy tin tức nhỏ nhất nhận được từ trạng thái có xác suất lớn nhất, điều đó hoàn toàn phù hợp với lý thuyết thông tin.

Thông số S_3 có lượng thông tin nhỏ nhất, tức là không đủ để xác định một hư hỏng cụ thể nào, nên thông số này sẽ bị loại khỏi tập thông số chẩn đoán. Theo cách này, bộ thông số chẩn đoán hợp lý đặc trưng cho tình trạng kỹ thuật của toàn bộ đối tượng cần chẩn đoán gồm k thông số (với k < n) sẽ được lựa chọn.

Bảng 2. Ma trận xác suất và thông tin

S	P_{ij}			$P(s_i)$	H_i
	X_1	X_2	X_3		
S_1	1/9	1/6	0	5/18	0,614
S_2	1/9	0	1/9	4/18	0,485
S_3	1/9	1/6	1/9	7/18	0,028
S_4	0	0	1/9	2/18	1,585
$P(x_j)$	1/3	1/3	1/3	1	

2.2. Phương pháp lựa chọn theo cách kiểm tra tối thiểu

Độ lớn thông tin của một triệu chứng S_i nào đó trong ma trận chẩn đoán sẽ được các định thông qua biểu thức sau:

$$J_{si} = m_i.n_i$$

Trong đó: m_i – số các số 1 có trong hàng thứ i; n_i – số các số 0 trong hàng thứ i.

Giả sử ta có ma trận chẩn đoán và giá trị thông tin của các thông số như bảng 3a. So sánh giá trị thông tin của các thông số vừa xác định (J_{si}) để chọn ra thông số có giá trị thông tin lớn nhất, đưa vào bộ thông số chẩn đoán hợp lý. Khi so sánh có thể tồn tại nhiều thông số có giá trị thông tin lớn nhất, nhưng ta chỉ chọn lấy một thông số. Thông số được chọn phải đảm bảo dễ đo nhất và đặc trưng nhất.

Sau khi chọn xong thông số thứ nhất để chọn được thông số tiếp theo thì cấu trúc của bảng 3 sẽ phải thay đổi như sau: bảng được chia thành hai phần, phần đầu là những hư hỏng có phản ứng với thông số vừa chọn và phần thứ hai là những hư hỏng không có phản ứng với thông số vừa chọn. Giá trị thông tin của các thông số từ bảng 3 về sau sẽ được xác định thông số qua biểu thức sau:

$$J_{si} = \sum_{i=1}^{L} (m_i.n_i)$$

Trong đó: m_i - là số các số 1 của hàng thứ i thuộc nhóm L_i của bảng;

n_i - là số các số 0 của hàng thứ i thuộc nhóm L_i của bảng;

L - là số nhóm trong bảng.

Tương tự ta tiếp tục làm như vậy cho đến khi các thông số còn lại trong bảng mang giá trị thông tin bằng 0. Khi đó ta chọn được một tập các thông số chẩn đoán (k) đặc trưng cho tình trạng kỹ thuật của toàn bộ hệ thống (k < n). Ví dụ:

Bảng 3. Ma trận tính toán lựa chọn phương pháp tối thiểu

a

X_p / S_i	X_1	X_2	X_3	X_4	J_{si}
S_1	1	0	0	0	3
S_2	0	0	1	1	4
S_3	1	0	0	1	4
S_4	0	1	1	1	3

Chọn thông số S_2 với L = 1

b

X_p / S_i	X_1	X_2	X_3	X_4	J_{si}
S_2	1	1	0	0	0
S_1	0	0	1	0	1
S_3	0	1	1	0	2
S_4	1	1	0	1	1

Chọn thông số S_3 với L = 2

c

X_p / S_i	X_1	X_2	X_3	X_4	J_{si}
S_3	1	1	0	0	0
S_4	0	0	1	0	1
S_1	1	1	0	1	0

Chọn thông số S_3 với L = 4

d

X_p / S_i	X_1	X_2	X_3	X_4
S_2	0	0	1	1
S_3	1	0	0	1

Kết quả cuối cùng ta chọn được hai thông số S_2 và S_3 để đưa vào bộ thông số chẩn đoán hợp lý (bảng 3d).

2.3. Phương pháp ứng dụng lý thuyết thông tin

Dựa trên ma trận chẩn đoán được xây dựng thông qua mối quan hệ logic giữa các thông số chẩn đoán và các hư hỏng sự cố, cột cuối cùng biểu thị giá trị thông tin về trạng thái hệ thống, ký hiệu $I_1(S_i)$, chứa trong mỗi thông số S_i [3]. Giá trị thông tin này được xác định như sau:

Theo lý thuyết thông tin, độ không xác định của hệ thống được biểu diễn bằng hàm Entropi của tập tham số trạng thái, tính theo biểu thức:

$$H(Xj)=-\sum_{i=1}^{n} p_i.\log_2 p_i$$

Trong đó: p_i – là xác suất của đối tượng X ứng với trạng thái thứ I;

Dấu (-) để H(Xj) luôn (+) vì pi <1 nên $\log_2$pi <0.

Nếu xác suất xuất hiện các trạng thái là như nhau ($p_i = 1/n$) thì:

$$H(X_j)=-\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n}.\log_2\frac{1}{n}=\log_2 n=\phi$$

Trong trường hợp này, Entropi đạt giá trị tối đa, biểu thị mức độ không xác định cao nhất của hệ thống khi chưa có thông tin bổ sung từ các tham số chẩn đoán.

Sau khi xác định xong tham số S_i thì bậc không xác định của hệ thống sẽ thay đổi, và Entrôpi cũng thay đổi:

$$H(X_j/S_i)=p(S_i).H_{S_i}(X_j)+p(\overline{S}_i).H_{\overline{S}_i}(X_j)$$

Trong đó:

$H(X_j/S_i)$ - là Entropi có điều kiện trung bình của tập các trạng thái hư hỏng của hệ thống với điều kiện tham số S_i đã được kiểm tra.

$p(S_i)$, $p(\overline{S}_i)$ - là xác suất mà tham số S_i có phản ứng với trạng thái hư hỏng của hệ thống và xác suất không có phản ứng với trạng thái này.

$H_{S_i}(X_j), H_{\overline{S}_i}(X_j)$ - là Entropi có điều kiện của hệ thống sau khi đo tham số S_i của trường hợp tập con có phản ứng và không có phản ứng.

Nếu gọi: m – là số số 1 trong hàng thứ i và n – là số số 0 trong hàng thứ i.

Ta sẽ có:

$P(S_i) = m/n$; $p(\overline{S}\overline{i}) = 1/n$

$H_{Si}(X_j) = \log_2 m$; $H_{\overline{S}\overline{i}}(Xj) = \log_2 l$

Vậy: $$H(Xj/Si)=m/n.\log_2 m+l/n.\log_2 l$$

Hiệu giữa Entropi không điều kiện và Entropi có điều kiện trung bình sau khi kiểm tra thông số S_i chính là thông tin chẩn đoán I(Si) chứa trong thông số S_i của trạng thái hệ thống. Nghĩa là:

$$I_1(Si)=H(Xj)-H(Xj/Si)=\log_2 n-m/n.\log_2 m-l/n.\log_2 l$$

$$I_1(Si)=-(m/n.\log_2 m/n+l/n.\log_2 l/n)$$

Áp dụng quan hệ trên ta sẽ xác định được giá trị thông tin ban đầu của các thông số. Sau đó áp dụng tiêu chuẩn cực đại để chọn ra thông số có mức thông tin lớn nhất ($I_1(S_i)_{max}$). Đó là thông số đầu tiên đưa vào bộ thông số chẩn đoán hợp lý. Sau khi chọn được một thông số, để tìm kiếm những thông số tiếp theo, cấu trúc của bảng ban đầu sẽ phải thay đổi. Bảng mới sẽ được chia thành hai phần: phần đầu chứa những hư hỏng có phản ứng với thông số vừa chọn và phần sau là các hư hỏng không có phản ứng. Giá trị thông tin về hệ thống của các thông số còn lại từ bảng 2 trở đi sẽ được xác định nhờ quan hệ sau:

$$I_{in}(Si) = -\sum_{i=1}^{L} \frac{m_i + l_i}{n} \left(\frac{m_i}{m_i + l_i} . \log_2 \frac{m_i}{m_i + l_i} + \frac{l_i}{m_i + l_i} . \log_2 \frac{l_i}{m_i + l_i} \right)$$

Trong đó: L – số nhóm phân chia trong bảng;

m_i – số số 1 trong hàng thứ i thuộc nhóm L_i của bảng;

n_i – số số 0 trong hàng thứ i thuộc nhóm L_i của bảng.

Tương tự như vậy ta sẽ chọn ra được tập các thông số có giá trị thông tin lớn nhất ở các bước tính để đưa vào bộ các thông số chẩn đoán hợp lý. Việc tính toán đó chỉ dừng lại khi giá trị thông tin về hệ thống chứa trong các thông số chọn ra tương đương với giá trị thông tin của tập thông số chẩn đoán ban đầu.

Hay: $$\sum_{i=1}^{K} I_{i\max}(Si) = \log_2 n + \varepsilon$$

Với: K - là thông số chẩn đoán trong bộ thông số chẩn đoán hợp lý (k<n);

ε - là sai số cho phép.

2.4. Phương pháp đánh giá thông qua tiêu chuẩn "trọng lượng" của các thông số

Tiêu chuẩn để đánh giá các thông số chẩn đoán có thể được thiết lập thông qua trọng lượng của các thông số đó. Trọng lượng của thông số chẩn đoán S_i được xác định theo công thức sau [2]:

$$\lambda_i = a_i + b_i + c_i + d_i + \psi_i$$

Trong đó: a_i – tính cho phép của thông số;

b_i – thời gian cần thiết để kiểm tra, xác định thông số;

c_i – chi phí cần thiết cho tiến hành công việc kiểm tra, xác định;

d_i – tính khách quan của kết quả kiểm tra;

ψ_i – tính ý nghĩa của tiêu chuẩn theo quan điểm tổng của các yếu tố ảnh hưởng đến thông số đang xét.

Khi áp dụng phương pháp này, ta xác định các thành phần cần thiết để tính toán trọng lượng $_i$ của từng thông số. Dựa trên kết quả thu được, lập bảng rồi lựa chọn các thông số có trọng lượng cao và loại bỏ các thông số có trọng lượng thấp. Cuối cùng, quá trình này giúp hình thành một bộ thông số chẩn đoán hợp lý, đặc trưng cho tình trạng kỹ thuật của toàn bộ hệ thống.

2.5. Phương pháp ứng dụng lý thuyết tập mờ

Tập mờ A chứa phân tử $x_1, x_2,\ldots,x_n$ với giá trị hàm phụ thuộc $h_1,h_2,\ldots,h_n$ [6].

$A=\{x_1/h_1; x_2/h_2;...; x_n/h_n\}$

a) Thành lập ma trận G trong đó chỉ số hàng và cột được xếp cho tham số x_i. Phần tử v_{ij} <0,1> ma trận G là mức phụ thuộc của tham số x_i vào tham số x_j.

Ví dụ: j_4

x_i \ x_j	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	1	0,2	0	0,4	0	0	0,5
2	0	1	0,1	0,8	0,2	0	0,6
3	0,4	0	1	0	0	0,1	0
4	0	0,7	0	1	0	0,2	0
5	0	0	0	0,5	1	0,8	0
6	0	0,3	0	0	0,2	1	0,9
7	0,5	0,7	0	0	0,2	0,3	1

J4

I4

b) Cho mỗi tham số x_i ta xác định tập mờ và quan hệ mờ.

- Tập J_i chứa tất cả các phần tử khác 0 của hàng thứ i và các giá trị V_{ij} là các giá trị hàm phụ thuộc của phần tử thứ j vào tập J_i.

Ví dụ: $J_4=\{x_2/0,7; x_4/1; x_6/0,2\}$

- Tập I_i chứa tất cả các phần tử khác 0 của cột thứ i, ở đây các giá trị V_{ij} là các giá trị hàm phụ thuộc của phần tử thứ i vào tập I_i.

Ví dụ: $I_4=\{x_1/0,4; x_2/0,8; x_4/1; x_5/0,5\}$

- Tập $T_i = I_i$ J_i chứa tất cả các phần tử khác 0 của cột i và hàng i, lúc này giá trị hàm phụ thuộc được xác định theo công thức: $h_k(x)=\max[V_{ik},V_{ki}]$ khi đó ta được:

$T_4=\{x_1/0,4; x_2/0,8; x_4/1; x_5/0,5; x_6/0,2\}$

- Tập $P_i^{'}=I_iJ_i$ được tạo nên bởi việc xếp 2 phần tử sao cho mỗi phần tử tập I_i ta sắp xếp lần lượt tất cả các phần tử tập.

J_i: Giá trị hàm phụ thuộc được tính bằng công thức: $h(x,y)=\min[h_{Ii}(x),h_{Ji}(y)]$, ví dụ:

$P'_4=\{x_{1,2}/0,4; x_{1,4}/0,4; x_{1,6}/0,2; x_{2,2}/0,7; x_{2,4}/0,8; x_{2,6}/0,2; x_{4,2}/0,7; x_{4,4}/1; x_{4,6}/0,2; x_{5,2}/0,5; x_{5,4}/0,5; x_{5,6}/0,2\}$

- Tập $T_i^{''}\subseteq T_i * T_i$ chứa cặp đôi được tạo thành từ các phần tử sao cho cả 2 phần tử này cùng có giá trị như nhau và giá trị hàm phụ thuộc bằng 1.

Ví dụ: $P''_4=\{x_{1,1}/1; x_{2,2}/1; x_{4,4}/1; x_{5,5}/1; x_{6,6}/1\}$

- Tập $E_i=P_i^{'}\cap P_i^{''}$ chứa tất cả các đôi với 2 phần tử như nhau và chúng đồng thời xuất hiện trong tập P'$_i$. và P''$_i$. Giá trị hàm phụ thuộc được tính bằng công thức:

$h(x) = \min\left[h_{Pi}(x), h_{P_i''}(x)\right]$

Ví dụ: $E_4 = \{x_{2,2} / 0,7; x_{4,4} / 1\}$

c) Đánh giá tập R_i theo công thức (1), (2) bằng cách cộng giá trị hàm phụ thuộc của tất cả các phần tử thuộc tập P'_i và P_i rồi trừ giá trị hàm phụ thuộc của tập E_i.

Ví dụ: $d_{R4} = \sum h_{P_4'} + \sum h_{P_4''} - \sum h_{E_4} = 5,9 + 5 - 1,7 = 9,2$

d) Các giá trị đã tính toán d_{Ri} là trọng lượng của các thông số cần tìm. Giá trị càng lớn thông số càng có ý nghĩa xét về quan điểm đánh giá (giá trị), tức là các thông số mang tính đặc trưng nhất trong quá trình chẩn đoán.

**** Nhận xét:***

- Phương pháp kết hợp giữa lý thuyết thông tin và lý thuyết xác suất: Phương pháp này cho kết quả tương đối chính xác khi dự báo thời gian làm việc còn lại của thiết bị, tuy nhiên nó đòi hỏi phải xác định chính xác xác suất xuất hiện hư hỏng, điều này rất khó thực hiện trong thực tế do sự biến động của các yếu tố môi trường và điều kiện vận hành.

- Phương pháp lựa chọn theo cách kiểm tra tối thiểu: Phương pháp này xác định giá trị thông tin của các thông số mà không yêu cầu tìm độ bất định, nhưng độ chính xác bị hạn chế và chỉ thích hợp với chẩn đoán một hư hỏng cụ thể.

- Phương pháp áp dụng lý thuyết thông tin: Đây là phương pháp đơn giản, tiện lợi, đảm bảo độ chính xác cần thiết và có thể áp dụng cho cả hệ thống phức tạp. Bằng cách phân tích các giá trị thông tin, phương pháp này giúp lựa chọn các thông số có khả năng phát hiện hư hỏng cao nhất, từ đó tối ưu hóa quá trình chẩn đoán.

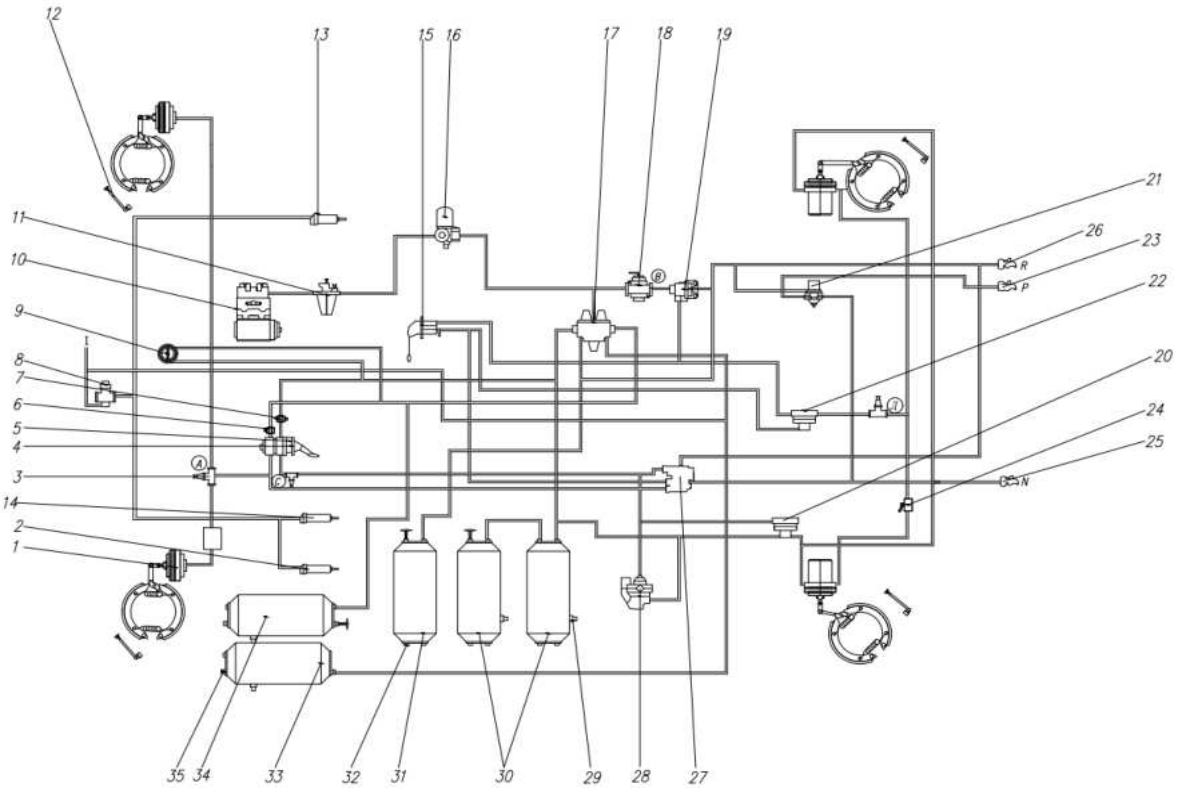
- Phương pháp đánh giá thông qua tiêu chuẩn "trọng lượng" của các thông số: Phương pháp này cho phép kết hợp kiến thức chuyên gia với các thiết bị hỗ trợ chẩn đoán để đạt được kết quả nhanh và chính xác. Tuy nhiên, việc gán trọng số cho từng tiêu chí mang tính chủ quan và có thể không phản ánh chính xác mối quan hệ thực tế giữa các TSCĐ và hư hỏng. Do vậy, với các hệ thống phức tạp, phương pháp này gặp hạn chế trong việc xác định tập TSCĐ phù hợp.

- Phương pháp áp dụng lý thuyết tập mờ: Phương pháp này cho phép chẩn đoán các hệ thống phức tạp với độ chính xác cao. Tuy nhiên, việc xác định giá trị của các hàm phụ thuộc rất khó khăn.

Từ phân tích trên, có thể thấy rằng đối với các hệ thống phức tạp có nhiều thông số đặc trưng khác nhau, điển hình như hệ thống phanh khí nén trên các dòng ô tô vận tải, phương pháp lý thuyết thông tin hoặc lý thuyết tập mờ là lựa chọn tối ưu để xác định tập TSCĐ, đảm bảo độ chính xác và hiệu quả trong chẩn đoán.

3. Áp dụng để lựa chọn tập thông số chẩn đoán cho hệ thống phanh xe KAMAZ -43261

Sơ đồ bố trí chung hệ thống phanh xe KAMAZ-43261 được biểu diễn trên hình 1 với hệ thống dẫn động khí nén bao gồm bốn mạch riêng biệt, được ngăn cách với nhau bằng van bảo vệ bốn ngả.



Hình 1. Sơ đồ bố trí chung hệ thống phanh xe KAMAZ-43261

1. Bầu phanh trước; 2. XL khí nén dẫn động van điều tiết cơ cấu phanh bổ trợ;3. A,B,C,D các đầu kiểm tra; 4. Van phanh 2 tầng; 5. Cảm biến tín hiệu dừng; 6. Cảm biến áp suất của đường phanh 1; 7. Cảm biến áp suất đường phanh 2;8. Van điều khiển phanh bổ trợ; 9. Áp kế hai kim; 10. Máy nén khí; 11. Bộ trao đổi nhiệt; 12. Cảm biến ABS; 13. XL khí nén dẫn dộng dừng động cơ; 14. XL khí nén dẫn động van phanh bổ trợ; 15. Van điều khiển phanh dừng; 16. Bầu hút ẩm khí nén có thiết bị điều chỉnh áp suất;17. Van bảo vệ 4 ngả; 18. Van xả phanh khẩn cấp; 19. Van bảo vệ 2 ngả; 20. Van tăng tốc; 21. Van điều khiển rơ - moóc; 22. Van tăng tốc; 23. Đầu nối loại A; 24. Công tắc của thiết bị báo hiệu của hệ thống phanh dừng; 25, 26. Đầu nối; 27. Van dẫn động phanh rơ – moóc với 2 đường dẫn; 28. Bộ điều hòa lực phanh; 29. Khóa xả cặn nước; 34,30,31,33. Bình chứa khí nén của mạch phanh I,II,III,IV; 32. Cảm biến áp suất trong mạch phanh III; 35. Cảm biến áp suất trong mạch phanh IV.

Sau khi phân tích hệ thống phanh xe KAMAZ- 43261, lựa chọn tập các hư hỏng sự cố gồm 13 hư hỏng cơ bản của hệ thống phanh xe KAMAZ-43261 như sau:

h1 - Hỏng máy nén khí;

h2 - Van điều áp hỏng;

h3 - Van bảo vệ bốn ngả hỏng;

h4 - Rò rỉ khí nén trước tổng van phanh;

h5 - Rò rỉ khí nén sau tổng van phanh;

h6 - Hỏng van tăng tốc;

h7 - Tổng van phanh hỏng;

h8 - Bầu phanh kiểu 30 (cầu trước) hỏng;

h9 - Bầu phanh kiểu 24/20 (cầu sau) hỏng;

h10 - Khe hở má phanh điều chỉnh chưa đúng, má phanh bị mòn, mất ma sát trong cơ cấu phanh;

h11 - Hỏng cam phanh;

h12 - Hỏng lò xo hồi vị guốc phanh;

h13 - Hỏng điều hòa lực phanh.

Dựa vào quá trình phân tích các biến đổi về tình trạng kỹ thuật của hệ thống phanh xe KAMAZ-43261 trong quá trình vận hành, các thông số biểu hiện kết cấu phù hợp được lựa chọn cho hệ thống như sau:

x1 - Quãng đường phanh (m);

x2 - Độ dài hành trình tự do của bàn đạp phanh (mm);

x3 - Áp suất khí nén tại đầu vào của tổng van phanh (MPa);

x4 - Áp suất khí nén tại đầu ra của tổng van phanh (MPa);

x5 - Độ lệch quỹ đạo chuyển động thẳng của xe khi phanh (Độ);

x6 - Lực phanh tại các bánh xe (N);

x7 - Thời gian phục hồi áp suất khí nén sau khi phanh (s);

x8 - Tiếng ồn, dao động hoặc va đập từ hệ thống phanh trong quá trình hoạt động (dB);

x9 - Nhiệt độ sinh ra tại cơ cấu phanh (°C);

x10 - Lực tác dụng lên bàn đạp phanh (N);

x11 - Thời gian chậm tác dụng khi phanh (s);

x12 - Áp suất khí nén tại đầu ra bộ điều hòa lực phanh (MPa);

3.1. Áp dụng phương pháp lý thuyết tập mờ

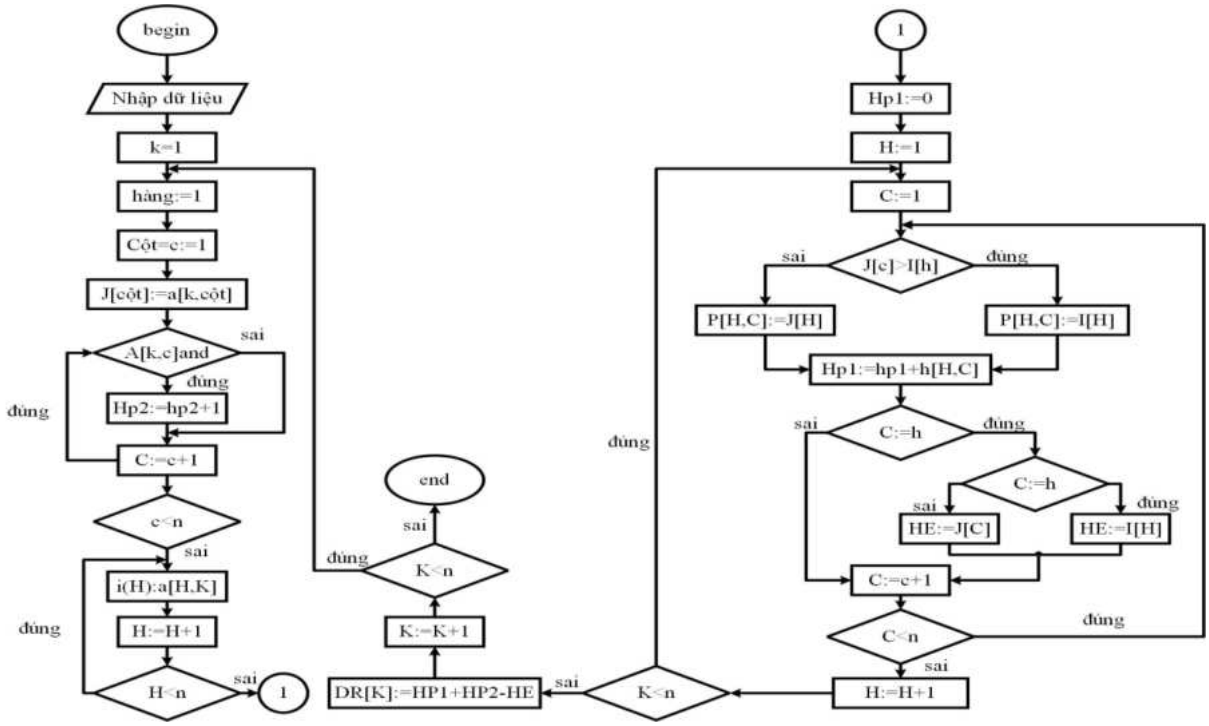
Để lựa chọn các thông số đại diện trong chẩn đoán hệ thống phanh, lý thuyết tập mờ được áp dụng thông qua phương pháp gán trọng lượng. Quá trình thực hiện bao gồm việc xây dựng ma trận với chỉ số hàng và cột tương ứng với các tham số x_i, trong đó V_{ij} là mức độ phụ thuộc của tham số x_i với tham số x_j. Ma trận đầu vào của hệ thống phanh xe KAMAZ-43261 thể hiện trên bảng 4.

Bảng 4. Ma trận thuật toán của phương pháp tập mờ

x_j / x_i	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1	0,2	0,3	0,5	0,2	0,6	0	0	0,3	0,3	0,4	0,3
2	0,4	1	0,2	0	0,2	0,4	0	0	0,2	0,6	0,3	0
3	0	0,2	1	0,8	0	0	0,2	0	0	0,2	0	0,2
4	0	0,3	0,8	1	0	0,2	0	0	0	0	0,3	0
5	0,5	0,2	0	0	1	0,6	0	0,2	0,3	0	0,3	0,3
6	0,2	0,4	0,2	0,3	0	1	0	0,1	0	0,5	0,2	0,3
7	0,5	0	0,2	0	0	0,4	1	0	0,2	0	0,6	0

x_j / x_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	0	0	0	0	0,2	0,1	0	1	0,1	0,1	0	0
9	0,3	0	0	0	0	0,3	0	0	1	0	0,2	0
10	0	0,4	0,2	0	0	0	0,2	0	0	1	0,4	0,2
11	0,1	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,6	0	0,3	0,4	1	0,2
12	0	0,1	0,4	0,5	0	0	0	0	0	0,3	0,2	1

Tiếp theo, thuật toán được thiết lập để xác định tập mờ và quan hệ mờ cho từng tham số x_i, đồng thời xây dựng lưu đồ thuật toán và chương trình tính toán nhằm xác định trọng số của các thông số chẩn đoán.



Hình 2. Lưu đồ thuật toán lựa chọn thông số chẩn đoán bằng lý thuyết thông tin

Kết quả tính toán thu được một tập mờ đã sắp xếp các thông số x_i theo mức độ quan trọng, trong đó giá trị trọng số càng lớn thì thông số càng có ý nghĩa trong chẩn đoán. Dựa trên kết quả này, 8 thông số chẩn đoán có trọng số lớn nhất được lựa chọn, bao gồm: x_1; x_3; x_4; x_5; x_6; x_7; x_9; x_{11} *(x_1 - Quãng đường phanh; x_3 - Áp suất khí nén tại đầu vào của tổng van phanh; x_4- Áp suất khí nén tại đầu ra của tổng van phanh; x5 - Độ lệch quỹ đạo chuyển động thẳng của xe khi phanh; x6 - Lực phanh tại các bánh xe x_7 - Thời gian phục hồi áp suất khí nén sau khi phanh; x_9 - Nhiệt độ sinh ra tại cơ cấu phanh; x_{11} - Thời gian chậm tác dụng khi phanh)* vào tập thông số chẩn đoán.

Ta thấy, phương pháp tập mờ phù hợp trong việc xử lý hệ thống phanh có đặc tính phi tuyến và mối quan hệ phức tạp giữa các thông số. Tuy nhiên, việc xác định giá trị hàm phụ thuộc và thiết lập quan hệ mờ rất khó khăn đòi hỏi quá trình tính toán phức tạp, yêu cầu sự chính xác cao trong quá trình xây dựng mô hình và thuật toán.

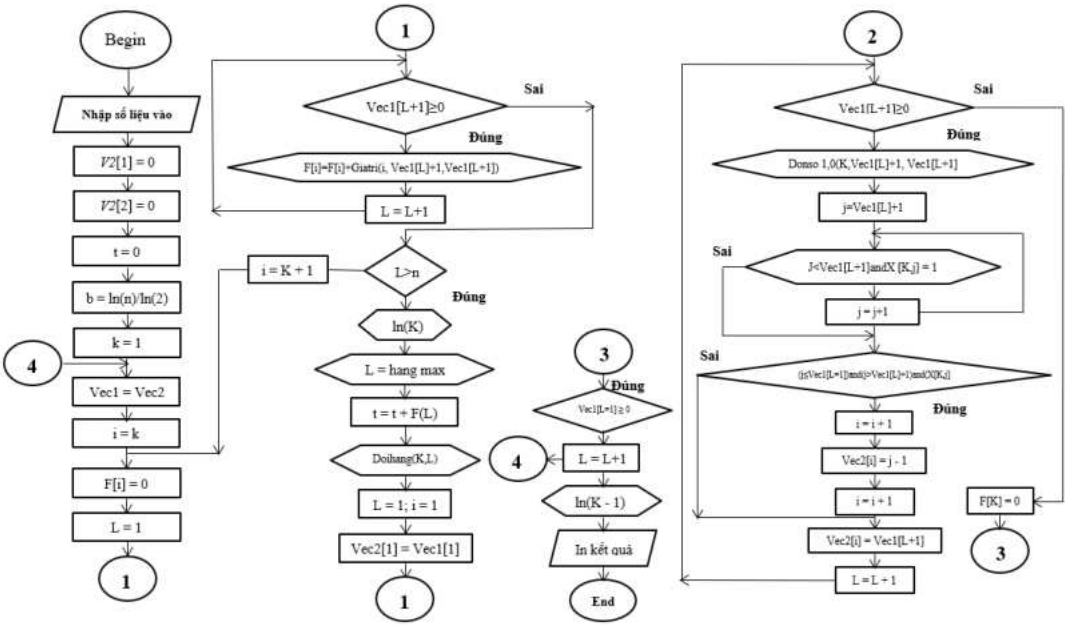
3.2. Áp dụng phương pháp lý thuyết thông tin

Để tìm kiếm thông tin về hệ thống cho từng thông số, ta sẽ lập ma trận chẩn đoán có các hàng biểu diễn tập các thông số biểu hiện kết cấu (x_i) và các cột biểu diễn tập các hư hỏng sự cố (h_j), các phần tử của ma trận: a[i,j] sẽ nhận giá trị là 1 nếu thông số x_i có phản ứng với hư hỏng h_j và nhận giá trị 0 nếu x_i không có phản ứng với h_j (Bảng 5).

Bảng 5. Ma trận đầu vào lựa chọn tập thông số theo lý thuyết thông tin

x/h	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13
x1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
x2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x3	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
x4	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
x5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
x6	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
x7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
x8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
x9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
x10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x11	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
x12	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Từ bảng ma trận đầu vào, dựa vào cơ sở lý thuyết thông tin đã phân tích ở trên, tiến hành xây dựng thuật toán, lưu đồ thuật toán và lập chương trình tính toán [1] để lựa chọn tập thông số chẩn đoán. Hình 3 thể hiện lưu đồ thuật toán bằng lý thuyết thông tin.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán lựa chọn thông số chẩn đoán bằng lý thuyết thông tin

Kết quả tính toán đã chọn ra được 7 thông số: x_1; x_3; x_4; x_5; x_7; x_9; x_{11} *(x_1 - Quãng đường phanh; x_3 - Áp suất khí nén tại đầu vào của tổng van phanh; x_4 - Áp suất khí nén tại đầu ra của tổng van phanh; x_5 - Độ lệch quỹ đạo chuyển động thẳng của xe khi phanh; x_7 - Thời gian phục hồi áp suất khí nén sau khi phanh; x_9 - Nhiệt độ sinh ra tại cơ cấu phanh; x_{11} - Thời gian chậm tác dụng khi phanh)* đưa vào tập thông số chẩn đoán.

Nghĩa là, khi chẩn đoán tình trạng kỹ thuật của dẫn động điều khiển hệ thống phanh xe KAMAZ-43261, thay vì kiểm tra, xác định 12 thông số chỉ cần đo 7 thông số, trên cơ sở các giá trị đo được, so sánh với các giá trị định mức để xác định tình trạng kỹ thuật của hệ thống. Hơn nữa, các thông số được xác định đảm bảo tính đại diện cao cho trạng thái kỹ thuật của hệ thống phanh, phản ánh một cách toàn diện và chính xác những biến đổi quan trọng trong quá trình vận hành, qua đó nâng cao độ tin cậy của hệ thống chẩn đoán.

4. Kết luận

Xác định và lựa chọn tập thông số chẩn đoán hợp lý cho các cụm, hệ thống trên xe ô tô là việc làm cần thiết và mang ý nghĩa thực tiễn cao. Để tiến hành công việc đó chúng ta có nhiều phương pháp khác nhau. Nhưng đối với các hệ thống phức tạp, khi chưa nắm rõ thông tin về chúng thì việc áp dụng lý thuyết thông tin là hợp lý hơn cả. Đồng thời, trên cơ sở các giá trị trên có thể áp dụng lý thuyết tập mờ để xác định được hành trình dự trữ của hệ thống, đó là hướng nghiên cứu tiếp của đề tài.

Tài liệu tham khảo

1. Phan Văn Khôi (2001), *Cơ sở đánh giá độ tin cậy*, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
2. Nguyễn Nông, Hoàng Ngọc Vinh (2000), *Độ tin cậy sửa chữa ô tô máy kéo*, NXB Giáo dục, Hà Nội.
3. Nguyễn Khắc Trai (2004), *Kỹ thuật chẩn đoán ô tô*, NXB Giao thông vận tải, Hà Nội
4. Ngô Thành Bắc, Nguyễn Đức Phú (1994), *Chẩn đoán trạng thái kỹ thuật ô tô*, NXB Khoa học kỹ thuật, Hà Nội.
5. Северцев Н.А. (1989), *Надёжность сложных систем в эксплуатации и отработке,* Высшая школа.
6. Харазов А.М. (1979), *Техническая диагностика гидроприводов машин*, Москва.

Research on Methods for Selecting Diagnostic Parameter Sets

Abstract: *The diagnostic parameter selection method is developed based on fundamental scientific theories, including information theory, probability theory, and fuzzy set theory, to optimize the process of diagnosing the technical condition of a system. Depending on the characteristics of each system and the research subject, different methods can be applied to enhance the efficiency and accuracy of the diagnostic and analytical process. Applied to the pneumatic braking system of the Kamaz-43261 vehicle, the study illustrates the effectiveness of utilizing information theory to select an optimal set of diagnostic parameters, minimizing redundant information while ensuring a comprehensive representation of the system's technical state. The experimental results not only validate the feasibility of the proposed method but also pave the way for broader applications in technical diagnostics of similar systems.*

Keywords: diagnostic parameters; brake system diagnostics; information theory.

❑

Động lực học dao động của ô tô có kể tới hiện tượng tách bánh trên mô hình ½ ngang xe

Vũ Ngọc Minh[1], Nguyễn Đăng Quý[1], Nguyễn Trường Sinh[1]
[1]Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự
[*] Email: ngocminhvu0706@gmail.com; Tel: 0979957225

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu dao động của mô hình ½ ngang xe có kể tới hiện tượng tách bánh xe dựa trên các đặc tính theo thời gian và đặc tính tần số. Các phương trình chuyển động được xây dựng và giải bằng phương pháp giải tích để xác định sự dịch chuyển của thân xe, hai bánh xe và góc lắc ngang. Hệ phương trình mô tả động lực học dao động của mô hình được phát triển nhằm mô tả các trường hợp tách rời giữa bánh xe và mặt đường. Điều kiện tách bánh xe được xây dựng cho từng bánh xe bên trái và bên phải. Sau đó, các dao động được khảo sát trên một dải rộng tần số kích thích từ mặt đường. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình này với giả thiết kể tới hiện tượng tách bánh xe có độ chính xác cao hơn so với các nghiên cứu trước đây. Do đó, nghiên cứu này có ý nghĩa khoa học trong việc cung cấp cơ sở lý thuyết cho việc thiết kế hệ thống treo của phương tiện cơ giới sát với điều kiện thực tế.

Từ khóa: *Dao động mô hình một phần hai, Dao động phương tiện cơ giới, Động lực học dao động, Tách bánh xe với mặt đường, An toàn chuyển động.*

1. Đặt vấn đề

Chuyển động của ô tô trên bề mặt đường không bằng phẳng sẽ phát sinh các dao động của các khối lượng phần treo và khối lượng phần không được treo của ô tô [1], gây ảnh hưởng đến hành khách và hàng hóa. Việc dự đoán và loại bỏ những dao động bất thường này là điều cần thiết để cải thiện không chỉ sự thoải mái khi di chuyển mà còn cả độ an toàn [2]. Khi xe di chuyển qua các đoạn đường có chướng ngại như gờ lớn hoặc bất thường đáng kể, bánh xe có thể bị mất tiếp xúc với mặt đường, dẫn đến việc bánh xe mất khả năng truyền lực kéo, lực phanh và lực ngang, đồng thời nếu là bánh xe dẫn hướng thì ở thời điểm đó ô tô sẽ mất tính điều khiển [1]. Quá trình mà bánh xe mất tiếp xúc với mặt đường được gọi là hiện tượng **tách bánh xe**. Hơn nữa, hiện tượng này thường xảy ra trong một khoảng thời gian ngắn, mang tính tạm thời và nhanh chóng ổn định lại [3]. Hiện tượng tách bánh xe được đưa vào phân tích dao động để tăng độ chính xác trong việc dự đoán phản ứng động lực học [4]. Tuy nhiên, tách bánh xe ít được đề cập trong các mô phỏng về khả năng vận hành và sự thoải mái khi di chuyển [5].

Để tiến hành nghiên cứu động học dao động ô tô, có thể sử dụng các mô hình đơn giản hoặc phức tạp. Các mức độ mô hình hệ thống treo được phân loại từ mô hình 1/4, 1/2 xe, đến mô hình toàn bộ xe. Hiện nay, dao động của xe đã được phân tích có kể tới hiện tượng tách bánh xe trong các mô hình 1/4 xe hoặc mô hình 1/2 dọc xe [6, 7]. Các nghiên cứu tập trung vào việc xác định ranh giới của hiện tượng tách bánh xe và đề xuất hệ thống treo chủ động nhằm giảm gia tốc thẳng đứng ảnh hưởng đến hành khách [8-10].

Các nghiên cứu trước đây đã đóng góp hữu ích cho việc đánh giá sự thoải mái và khả năng bám đường, tuy nhiên chúng chưa chú trọng đến các chuyển động lắc ngang của thân xe. Do đó, nghiên

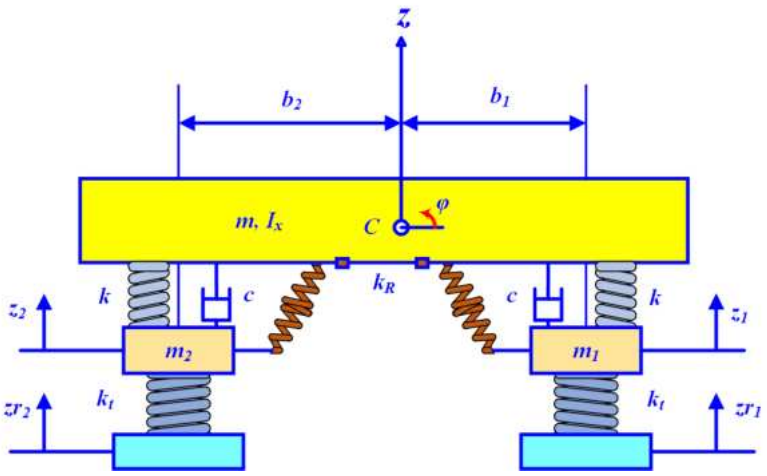
cứu chuyên sâu về mô hình 1/2 xe là cần thiết để có cái nhìn toàn diện về động lực học lắc ngang, vốn ảnh hưởng đáng kể đến sự ổn định của xe. Độ an toàn khi di chuyển của xe phụ thuộc vào hiệu suất ổn định tốt [11]. Nghiên cứu này tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của kích thích từ mặt đường đến cả động lực học lắc ngang và động học thẳng đứng của dao động ô tô.

Bài báo này được bố cục như sau: Trong Phần 2, mô hình ½ ngang xe có kể tới hiện tượng tách bánh được đưa ra, đồng thời trình bày các phương trình chuyển động của xe để phục vụ nghiên cứu chuyên sâu. Phần 3 sẽ thảo luận về các kết quả phân tích, sau đó là phần Kết luận.

2. Mô hình hóa phương tiện

Trong phần này, một mô hình ½ ngang xe được đưa ra cùng với các phương trình vi phân tương ứng, được minh họa trong Hình 1, bao gồm một khối lượng treo m có momen quán tính khối lượng đối với trục dọc X là I_x để mô phỏng một cầu của xe; hai khối lượng không treo m_1, m_2 để mô phỏng các bánh xe ở hai bên của một cầu và một phần tử ổn định ngang liên kết giữa khối lượng treo và các khối lượng không treo, có độ cứng k_R .

Mô hình này có 4 bậc tự do bao gồm: chuyển dịch thẳng đứng thân xe (z), chuyển dịch góc lắc ngang (φ), chuyển dịch thẳng đứng của bánh xe bên phải (z_1) và bánh xe bên trái (z_2). Kích thích từ mặt đường tương ứng ở hai bên bánh xe là z_{r1} và z_{r2}.



Hình 1. Mô hình dao động ½ ngang xe

2.1. Hệ phương trình cơ bản

Để đơn giản hóa việc phân tích dao động, nghiên cứu này đã quyết định bỏ qua ảnh hưởng của bộ giảm chấn bánh xe. Quyết định này được đưa ra do giảm chấn của bánh xe tương đối nhỏ so với cơ chế giảm chấn chính trong hệ thống. Bằng cách loại bỏ yếu tố giảm chấn của bánh xe, phân tích tập trung vào các cơ chế giảm chấn chính, giúp việc nghiên cứu hành vi dao động trở nên dễ dàng hơn.

Lựa chọn phương pháp tách hệ và áp dụng nguyên lý D'Alambert để thiết lập hệ phương trình vi phân chuyển động của mô hình.

Các phương trình vi phân chuyển động của hệ thống được viết dưới các trạng thái khác nhau:

Đối với trường hợp các bánh đều tiếp xúc:

$$m\ddot{z} + c(\ddot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) + c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + k(z - z_1 + b_1\varphi) + k(z - z_2 - b_2\varphi) = 0$$

$$I_x\ddot{\varphi} + b_1c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) - b_2c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + b_1k(z - z_1 + b_1\varphi) - b_2k(z - z_2 - b_2\varphi) + k_R\varphi = 0$$

$$m_1\ddot{z}_1 - c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) + k_t(z_1 - z_{r1}) - k(z - z_1 + b_1\varphi) = 0$$

$$m_2\ddot{z}_2 - c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + k_t(z_2 - z_{r2}) - k(z - z_2 - b_2\varphi) = 0$$

Đối với trường hợp không tiếp xúc:

* Tách bánh xe bên phải (bánh 1) (biểu diễn trong Hình 2)

$$m\ddot{z} + c(\ddot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) + c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + k(z - z_1 + b_1\varphi) + k(z - z_2 - b_2\varphi) = 0$$

$$I_x\ddot{\varphi} + b_1c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) - b_2c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + b_1k(z - z_1 + b_1\varphi) - b_2k(z - z_2 - b_2\varphi) + k_R\varphi = 0$$

$$m_1\ddot{z}_1 - c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) - k(z - z_1 + b_1\varphi) + (m_1 + \frac{b_2}{b}m)g = 0$$

$$m_2\ddot{z}_2 - c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + k_t(z_2 - z_{r2}) - k(z - z_2 - b_2\varphi) = 0$$

* Tách bánh xe bên trái (bánh 2)

$$m\ddot{z} + c(\ddot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) + c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + k(z - z_1 + b_1\varphi) + k(z - z_2 - b_2\varphi) = 0$$

$$I_x\ddot{\varphi} + b_1c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) - b_2c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + b_1k(z - z_1 + b_1\varphi) - b_2k(z - z_2 - b_2\varphi) + k_R\varphi = 0$$

$$m_1\ddot{z}_1 - c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) + k_t(z_1 - z_{r1}) - k(z - z_1 + b_1\varphi) = 0$$

$$m_2\ddot{z}_2 - c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) - k(z - z_2 - b_2\varphi) + (m_2 + m\frac{b_1}{b})g = 0$$

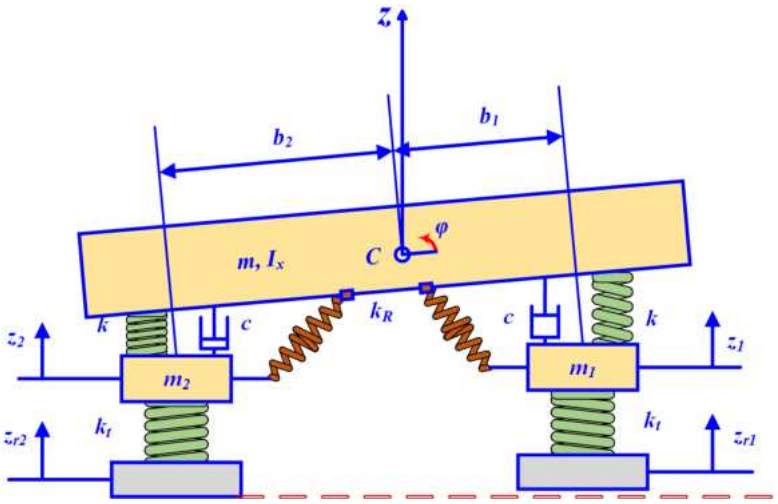
* Tách cả bánh xe cả hai bên

$$m\ddot{z} + c(\ddot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) + c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + k(z - z_1 + b_1\varphi) + k(z - z_2 - b_2\varphi) = 0$$

$$I_x\ddot{\varphi} + b_1c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) - b_2c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) + b_1k(z - z_1 + b_1\varphi) - b_2k(z - z_2 - b_2\varphi) + k_R\varphi = 0$$

$$m_1\ddot{z}_1 - c(\dot{z} - \dot{z}_1 + b_1\dot{\varphi}) - k(z - z_1 + b_1\varphi) + (m_1 + \frac{b_2}{b}m)g = 0$$

$$m_2\ddot{z}_2 - c(\dot{z} - \dot{z}_2 - b_2\dot{\varphi}) - k(z - z_2 - b_2\varphi) + (m_2 + m\frac{b_1}{b})g = 0$$



Hình 2. Bánh xe bên phải tách ra do kích thích từ mặt đường

2.2. Dữ liệu đầu vào cho mô phỏng

Để khảo sát chuyển động của mô hình, lựa chọn các thông số đầu vào của hệ thống dao động được trình bày trong Bảng 1. Một chương trình được thiết lập trong phần mềm Matlab/Simulink để giải hệ phương trình.

Để đơn giản cho tính toán và thuận tiện cho việc tiến hành thực nghiệm, thường người ta sử dụng biên dạng đường có dạng hình sin đúng [1]. Trong nghiên cứu này, lựa chọn kích thích mặt đường ở hai bên bánh xe là $z_{r1} = y_{01}.\sin(\omega t)$ và $z_{r2} = y_{02}.\sin(\omega t)$.

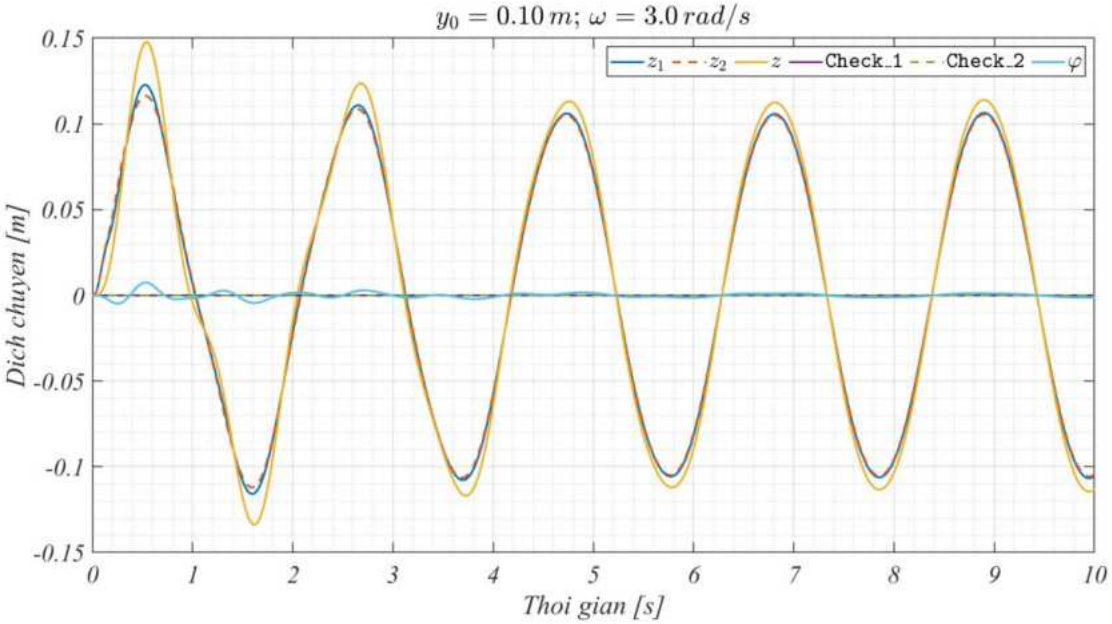
Bảng 1: Thông số đầu vào của mô hình 1/2 ngang xe

Thông số	Giá trị (Đơn vị)	Thông số	Giá trị (Đơn vị)
m_1	460 kg	m_2	460 kg
b_1	0.92 m	b_2	1.123 m
k	250000 N/m	k_t	400000 N/m
c	5100 Ns/m	k_R	25000 N/m
m	4020 kg		

3. Kết quả và thảo luận

Để xác định đặc tính thời gian của hệ phương trình, hệ thống cần được đánh giá trong một khoảng thời gian nhất định. Thời gian khảo sát phải đủ dài để hệ thống đạt đến trạng thái ổn định. Để phát hiện sự chuyển đổi giữa các chế độ có tiếp xúc và không tiếp xúc trong đặc tính thời gian, chương trình sử dụng hai biến chỉ báo, cụ thể là Check_1 và Check_2, có khả năng xác định trạng thái của các bánh xe tại mỗi điểm đánh giá: 0 tương ứng với trạng thái có tiếp xúc, trong khi Check_1 = 0.05 tương ứng với trạng thái không tiếp xúc của bánh phải (bánh 1), và Check_2 là −0.05 khi bánh trái (bánh 2)

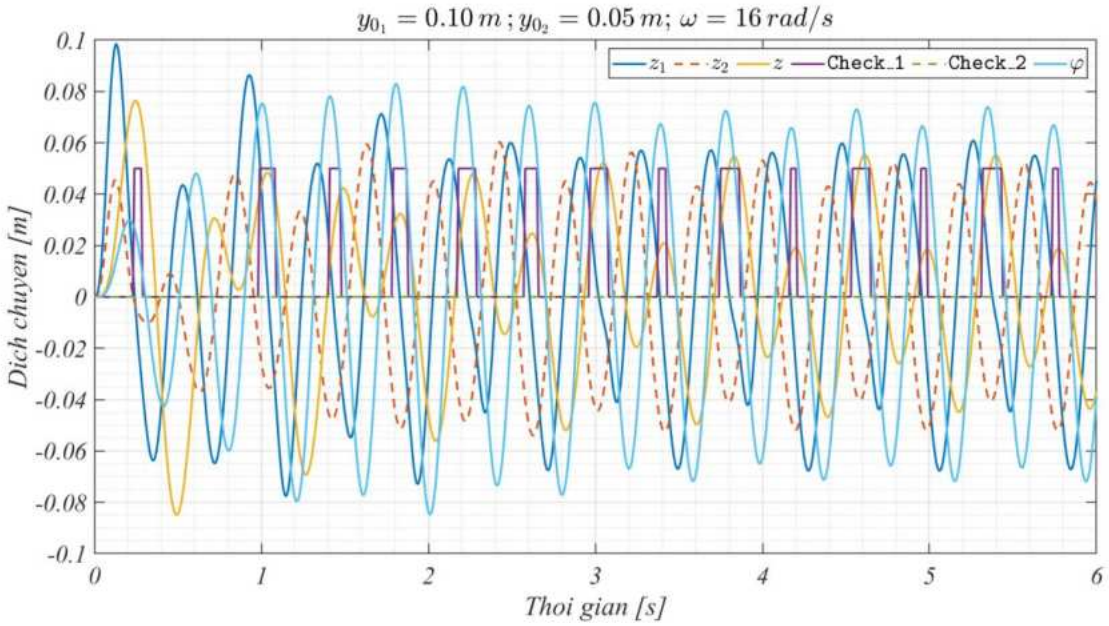
ở trạng thái không tiếp xúc. Để so sánh dịch chuyển của hai bánh xe, đặc tính thời gian có thể được biểu diễn bằng đồ thị dựa trên các tham số đầu vào từ Bảng 1.



Hình 3. Đặc tính thời gian khi không có hiện tượng tách bánh xe

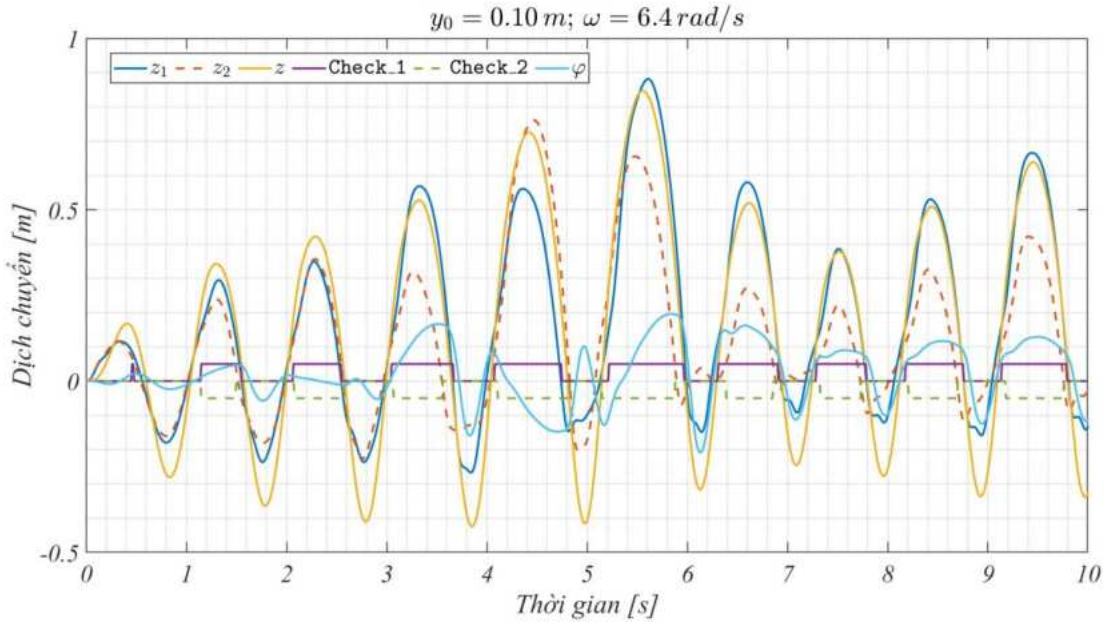
Đặc tính theo thời gian trong vùng có tiếp xúc, như thể hiện trong Hình 3, được gọi là trạng thái không tách rời khi hệ thống luôn giữ tiếp xúc với bề mặt. Mặc dù biên độ của mặt đường cao, với $y_{01} = y_{02} = y_0 = 0.1m$, bánh xe vẫn không thể tách khỏi bề mặt và duy trì trạng thái tiếp xúc. Điều này có thể xuất phát từ tần số đầu vào thấp $\omega = 3rad/s$, khiến cả hai chỉ báo đều nằm trùng với trục hoành. Đặc tính theo thời gian của bánh xe bên phải x_1 tương tự với bánh xe bên trái x_2, góc dao động ngang xe φ có biên độ nhỏ.

Bánh xe có thể ngừng tiếp xúc với mặt đường ở tần số kích thích cao và có sự sai khác về biên dạng ở hai bên bánh xe; thực tế, hiện tượng tách rời ở bánh xe bên phải có thể được quan sát trong Hình 4 khi tần số đầu vào tăng lên $\omega = 16rad/s$ và có sự sai khác về biên dạng đường ở hai bên bánh xe $z_{r1} = 0,1.\sin(16t)$; $z_{r2} = 0,05.\sin(16t)$. Chỉ báo Check_1 xác định trạng thái của bánh xe bên phải tại bất kỳ thời điểm nào. Ví dụ, bánh xe bên phải vẫn giữ tiếp xúc với bề mặt ở giai đoạn đầu, hiện tượng tách rời xảy ra vào khoảng 0,23 giây và tiếp xúc được phục hồi tại 0,29 giây. Trong một khoảng thời gian nhất định trong mỗi chu kỳ, bánh xe bên phải sẽ không còn tiếp xúc với bề mặt. Tuy nhiên, khoảng thời gian tách rời vẫn giữ nguyên và ổn định cho mỗi chu kỳ, được gọi là trạng thái tách rời ổn định. Do hiện tượng tách rời không xảy ra ở bánh xe bên trái, Check_2 là một đường nằm ngang đi qua gốc 0.

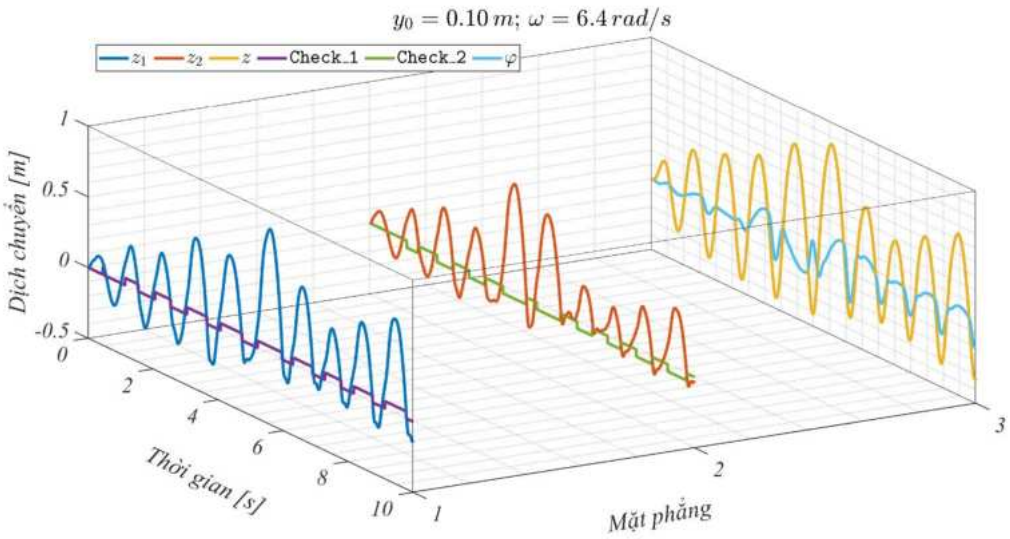


Hình 4. Đặc tính thời gian khi có hiện tượng tách 1 bên bánh xe

Hiện tượng tách rời ở cả hai bánh xe được minh họa trong Hình 5, trong đó các bánh xe mất tiếp xúc do không thể theo kịp mặt đường ở tần số đầu vào ở trong vùng cộng hưởng, cụ thể là $\omega = 6,4\,rad\,/\,s$.

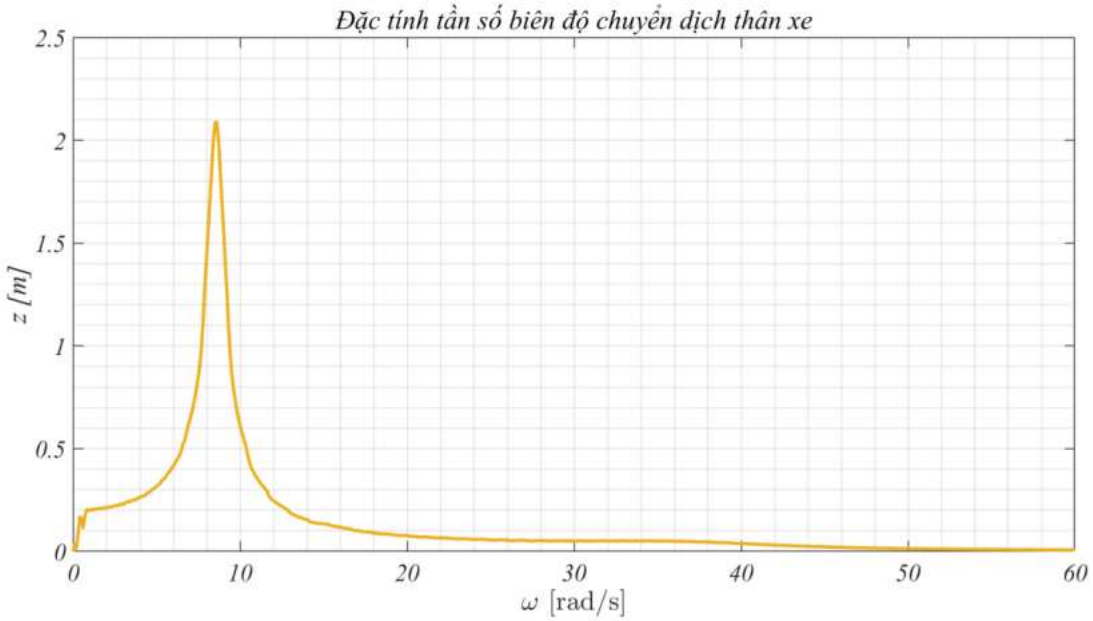


Hình 5. Đặc tính thời gian khi có hiện tượng tách cả 2 bánh xe

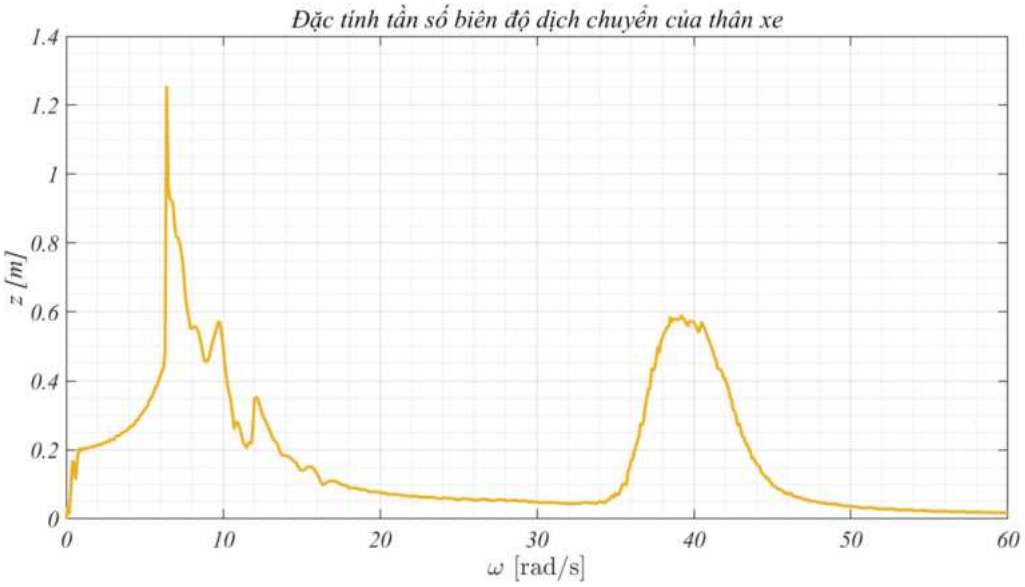


Hình 6. Đặc tính thời gian khi có hiện tượng tách bánh trong không gian 3 chiều

Một góc nhìn trực quan hơn của Hình 5 được biểu diễn bằng đặc tính thời gian trong không gian 3 chiều ở Hình 6. Mặt phẳng 1 biểu diễn bánh xe bên phải, mặt phẳng 2 biểu diễn bánh xe bên trái, mặt phẳng 3 biểu diễn chuyển dịch của thân xe và góc lắc ngang. Sự dao động có sự mất ổn định lớn ở tất cả các bộ phận. Biên độ của góc lắc ngang xấp xỉ $0,2\,rad$, tương đương 11,5 độ. Sự tách bánh xe xảy ra nhiều với thời gian mỗi lần tách bánh dài, điều này rất nguy hiểm cho khả năng điều khiển xe.



Hình 7. Đặc tính tần số biên độ chuyển dịch của thân xe khi không kể đến hiện tượng tách bánh



Hình 8. Đặc tính tần số biên độ của chuyển dịch thân xe khi kể tới hiện tượng tách bánh

Trong hầu hết các nghiên cứu trước đây, bánh xe được giả định luôn tiếp xúc với mặt đường khi đó đặc tính tần số – biên độ được thể hiện ở Hình 7 cho thấy biên độ sau khi cộng hưởng ở vùng tần số $\omega = 8 rad/s$ có sự giảm đáng kể và ổn định ở các vùng tần số cao hơn.

Tuy nhiên, trong thực tế hiện tượng tách bánh xe có thể xảy ra. Điều này dẫn đến sự thay đổi về đặc tính tần số được thể hiện trong Hình 8. Sau khi cộng hưởng ở vùng tần số thấp $\omega = 6,4 rad/s$ cũng có sự giảm đáng kể và ổn định ở các vùng tần số lớn hơn, tuy nhiên khi tới vùng tần số cao $\omega = 40 rad/s$ có sự tăng lên đáng kể của biên độ. Sai số biên độ chuyển dịch tại các vùng cộng hưởng là rất lớn so với đặc tính tần số không kể đến hiện tượng tách bánh. Như vậy, đặc tính tần số không kể đến hiện tượng tách bánh xe có hạn chế khá rõ rệt về độ chính xác của hệ thống dao động.

4. Kết luận

Bài báo này sử dụng mô hình 1/2 ngang xe để nghiên cứu động lực học dao động của ô tô có kể tới hiện tượng tách bánh xe. Trước tiên, đặc tính theo thời gian được mô phỏng trong trường hợp bánh xe tiếp xúc với mặt đường ở tần số thấp. Các đặc tính theo thời gian cũng được phân tích khi xảy ra hiện tượng tách bánh, gồm cả hai bánh hoặc một bánh rời khỏi mặt đường.

Dựa trên phân tích góc lắc ngang, kết quả cho thấy sự thoải mái, an toàn khi vận hành bị giảm đi đáng kể trong trường hợp bánh xe bị tách khỏi mặt đường. Khi so sánh các giả thiết có và không có hiện tượng tách bánh, sự khác biệt đáng kể về biên độ dao động được ghi nhận khi tần số của mặt đường vượt qua một giới hạn nhất định.

Ngoài ra, động lực học dao động được đánh giá thông qua đặc tần số biên độ chuyển dịch của thân xe. Kết quả chỉ ra rằng các mô phỏng có xét đến hiện tượng tách bánh mang lại độ chính xác cao hơn so với các mô phỏng không xét đến yếu tố này. Điều này có ý nghĩa việc thiết kế xe hơi trong tương lai khi xác định chính xác hơn các vùng cộng hưởng của tần số đầu vào và ảnh hưởng của nó, qua đó cải thiện đáng kể mức độ thoải mái cho hành khách.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, kết quả mô phỏng có thể được đối chiếu với các thí nghiệm trên băng thử 1/2 ngang xe, có tính đến các yếu tố phi tuyến bổ sung. Đồng thời, nghiên cứu hiện tượng tách bánh và chuyển động lắc ngang trên mặt đường ngẫu nhiên sẽ góp phần giải quyết các điều kiện vận hành thực tế của xe.

Tài liệu tham khảo

1. Vũ Đức Lập, 2011. Dao động ô tô. Nhà xuất bản quân đội nhân dân, p.25, p.22, p.31.
2. Ferdek, U. and Łuczko, J., 2016. Vibration analysis of a half-car model with semi-active damping. JOURNAL OF Theoretical and applied mechanics, 54(2), pp.321-332.
3. Jazar, R. N., & Marzbani, H. (2024). Vehicle Vibrations: Linear and Nonlinear Analysis, Optimization, and Design. Springer Nature.
4. Nguyen, Q. D., Milani, S., Marzbani, H., & Jazar, R. N. (2022a). Vehicle ride analysis considering tire-road separation. journal of Sound and Vibration, 521, p.116674.
5. Jazar, R.N., 2017. Vehicle vibrations. In Vehicle Dynamics (pp. 819-881). Springer.
6. Nguyen, Q. D., Jazar, R.N. (2022b). Numerical Simulation and Experimental validation of the Tire-Road Separation in Quarter-car Model. 16th International Conference on Automotive and Mechanical Engineering ICAME.
7. Nguyen, Q. D. (2024). Tire-road separation in bycicle-car model. Design engineering problems. Springer, New York.
8. Nguyen, Q. D. (2023b). Limitation of the tire-road contact. Journal of science & technology Vol.59-No.6B P-ISSN 1859-3585 E-ISSN 2615-9619.
9. Nguyen, Q. D., Milani, S., Marzbani, H., & Jazar, R. N. (2021b). Vehicle vibrations analysis of the quarter- car model considering tire-road separation. In Dai l., Jazar r. (eds) nonlinear approaches in engineering applications: Design engineering problems. Springer, New York.
10. Nguyen, Q. D., Milani, S., Marzbani, H., & Jazar, R. N. (2021c). Tire-road separation time reduction by an adaptive pid controller utilizing particle swarm optimization algorithm. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 14 (02-14-04-0033).
11. Iben Ammar, I., Doumiati, M., Talj, R., Chokor, A., & Machmoum, M. (2024). Analysis and Control of the Vehicle Roll Dynamics Using Sum of Squares Polynomial Approach. Journal of Systems Science and Complexity, 1-29.

Vehicle vibration dynamics considering wheel separation in a half-car model

Abstract: *This paper studies the vibration of a half-car model, taking into account the wheel separation phenomenon, based on time-domain and frequency-domain characteristics. The equations of motion are formulated and solved analytically to determine the displacements of the vehicle body, the two wheels, and the roll angle. The developed equations describe different cases where the wheels lose contact with the road. The conditions for wheel separation are established separately for the left and right wheels. The vibration response is then analyzed over a wide range of road excitation frequencies. Simulation results show that this model, which considers wheel separation, provides higher accuracy than previous studies. Therefore, this research offers a useful theoretical basis for designing vehicle suspension systems that better match real-world conditions.*

Keywords: Half-car model vibration, Vehicle dynamic oscillations, Vibration dynamics, Tire-road separation, Vehicle motion safety.

❑

Nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng động lực học chuyển động thẳng của ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện

Nguyễn Văn Hưng [1], TS Nguyễn Trường Sinh[1]

[1] Viện cơ khí Động lực, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

* Email: anhhungmta@gmail.com, Tel: 0979.100.804

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu và trình bày một phương pháp xây dựng mô hình mô phỏng động lực học chuyển động thẳng của ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện kiểu BEV (*Battery Electric Vehicle*) có công thức bánh xe 4x2 và được dẫn động cầu sau. Nội dung nghiên cứu tập trung vào việc mô hình hóa các cụm trong hệ thống động truyền lực của xe bằng phần mềm Matlab/Simulink, nhằm khảo sát một số thông số động lực học chuyển động thẳng của xe trong mối tương quan giữa các yếu tố lực cản chuyển động và yếu tố lực kéo cung cấp bởi hệ thống động truyền lực của xe. Từ đó, đề xuất một giải pháp đơn giản mà hiệu quả nhằm khảo sát một số thông số động lực học chuyển động thẳng của xe phục vụ quá trình nghiên cứu thiết kế, cải tiến và thử nghiệm một số loại ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện.

Từ khóa : *Mô hình động lực học; ô tô tải cỡ nhỏ; hệ thống động truyền lực; mô phỏng*

1. Mở đầu

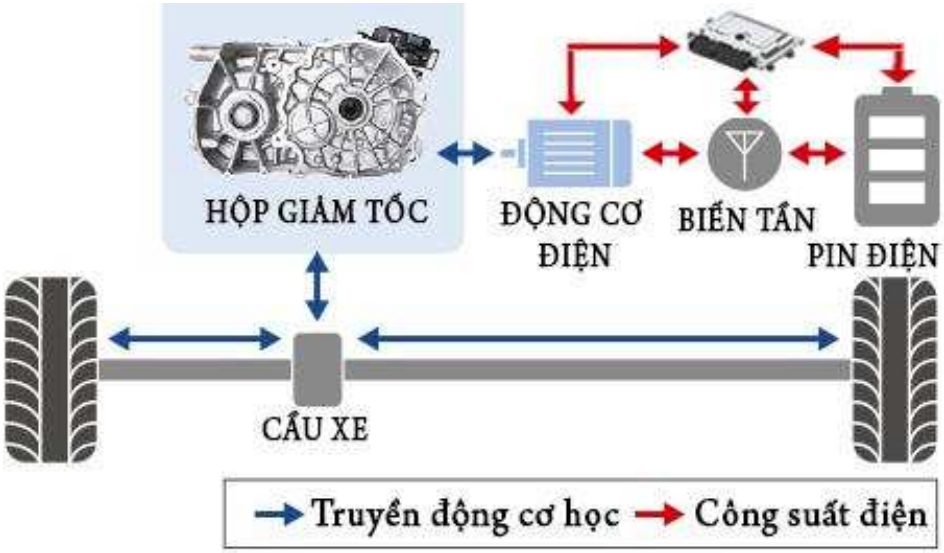
Những năm gần đây, ô tô điện đã trở thành một xu hướng phát triển quan trọng của nền công nghiệp ô tô, nhằm từng bước giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch và tiến tới phát triển bền vững. Trong đó, ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện là một trong các giải pháp tiềm năng đáp ứng cho các nhiệm vụ vận tải hàng hóa ở những khoảng cách vừa và nhỏ nhờ tính linh hoạt, khả năng vận hành không phát thải, hiệu suất cao và thân thiện với môi trường [1].

Xây dựng mô hình mô phỏng động lực học chuyển động thẳng của ô tô điện là công cụ quan trọng để nghiên cứu, thiết kế, cải tiến, thử nghiệm nâng cao hiệu suất hoạt động của phương tiện. Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào xây dựng mô hình mô phỏng ước tính mức tiêu thụ năng lượng của các phương tiện cơ giới chạy bằng điện [2], ước tính trạng thái sạc của pin điện trong điều kiện dòng điện thay đổi liên tục [3], mô hình hóa động cơ điện [4],... Tuy nhiên, các nghiên cứu trên chủ yếu tập trung vào xe du lịch và xe hơi cỡ nhỏ, trong khi đó ô tô tải cỡ nhỏ ít được chú ý. Ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện có đặc điểm tải trọng biến đổi và điều kiện vận hành đa dạng, đòi hỏi phải xây dựng mô hình mô phỏng riêng, phù hợp với khả năng và điều kiện làm việc của xe. Mô hình mô phỏng ô tô tải chạy bằng điện cần thiết phải mô phỏng và tính toán được một số thông số quan trọng như mức tiêu thụ năng lượng điện, cự ly quãng đường xe chạy ở các mức tải trọng khác nhau, khả năng tăng tốc, công suất tiêu thụ và hiệu suất động cơ...

Bài báo này tập trung vào việc xây dựng mô hình mô phỏng động lực học chuyển động thẳng dành cho ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện kiểu BEV, có công thức bánh xe 4x2 và dẫn động cầu sau. Mô hình mô phỏng được xây dựng bằng cách thiết lập mô hình lý thuyết khảo sát động lực học chuyển động thẳng của xe, lựa chọn, tùy biến và sử dụng kết hợp các mô hình thành phần tương ứng với các cụm trong hệ động truyền lực và mô hình lốp xe trong phần mềm Matlab/Simulink. Sau đó, tiến hành chạy mô hình mô phỏng để khảo sát và phân tích các thông số động lực học chuyển động thu được của mô hình xe.

2. Cấu trúc hệ thống động truyền lực

Hình 1 trình bày sơ đồ liên kết các cụm truyền lực trong hệ thống động truyền lực của xe ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện dẫn động cầu sau có công thức bánh xe 4×2, các thành phần chính gồm pin điện, bộ biến tần, bộ điều khiển, động cơ điện, hộp giảm tốc, vi sai và bánh xe.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống động truyền lực của xe

Trong đó, bộ pin điện được cấu thành từ các tế bào lithium-ion để lưu trữ và cung cấp điện năng DC cho động cơ điện và các thiết bị điện hoạt động, đảm bảo vận hành hiệu quả và đáp ứng cự ly quãng đường xe chạy.

Bộ biến tần chuyển đổi năng lượng DC từ bộ pin điện để cung cấp cho động cơ điện và các thiết bị phụ trợ hoạt động với yêu cầu mức điện áp khác nhau.

Động cơ điện là thành phần quan trọng trong hệ thống động truyền lực của xe. Động cơ điện chuyển đổi năng lượng điện từ bộ pin thành cơ năng, truyền đến các bánh xe chủ động qua hệ thống truyền động cơ khí.

Bộ điều khiển trung tâm (*Vehicle Control Unit, VCU*) là bộ não của hệ thống truyền động xe điện, điều phối hoạt động giữa pin, bộ biến tần, động cơ và các hệ thống phụ trợ. Bộ điều khiển trung tâm quản lý năng lượng và hiệu suất hệ thống, đảm bảo sự tương tác hài hòa và đáp ứng chính xác các tín hiệu từ người lái.

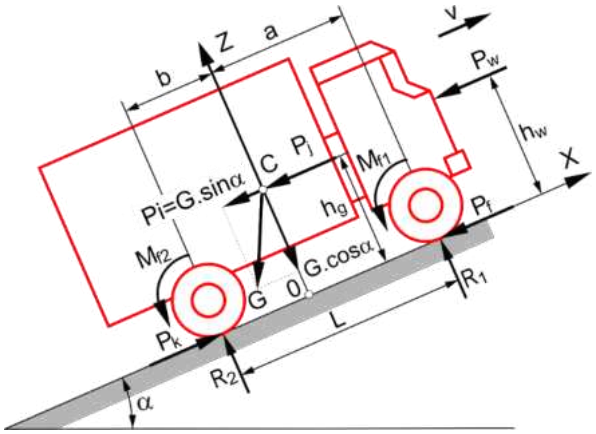
Hộp giảm tốc, cầu xe và bánh xe là các thành phần chính trong hệ thống động truyền lực của xe, đảm bảo truyền và phân phối mô men xoắn từ động cơ điện đến các bánh xe chủ động.

Các hệ thống này phối hợp chặt chẽ nhằm duy trì hiệu quả hoạt động của phương tiện, đảm bảo việc sử dụng năng lượng hợp lý và đáp ứng các yêu cầu hiệu suất trong các điều kiện vận hành khác nhau.

3. Xây dựng mô hình các cụm trong hệ thống động truyền lực

3.1. Thiết lập sơ đồ mô hình phẳng tính toán động lực học chuyển động thẳng của xe

Trong phần này, bài báo sẽ thiết lập sơ đồ mô hình phẳng tính toán động lực học chuyển động thẳng của xe trên cơ sở kết cấu thực đã được khảo sát [5].



Hình 2. Sơ đồ mô hình phẳng tính toán động lực học chuyển động thẳng của xe

Trên cơ sở mô hình trong hình 2, phương trình cân bằng lực kéo được xác định như sau:

$$\begin{cases} P_d = P_f + P_w \pm P_i \pm P_j \\ P_f = m.g.f.\cos\alpha;\ P_w = K.S.v^2;\ P_i = m.g.\sin\alpha;\ P_j = \delta.m.dv/dt \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó P_f, P_w, P_i, P_j lần lượt là lực cản lăn, lực cản không khí, lực cản lên dốc và lực cản tăng tốc, trong đó P_f có thể được biểu diễn thông qua các mô men cản lăn M_{f1} và M_{f2}; C là trọng tâm xe; L là chiều dài cơ sở; a, b lần lượt là khoảng cách từ cầu trước, cầu sau đến trọng tâm của xe; h_g là chiều cao trọng tâm của xe; P_k là lực kéo, $R_{1,2}$ là phản lực pháp tuyến của đường; P_d là lực kéo cần thiết để xe chuyển động, f là hệ số cản lăn của đường; v là vận tốc chuyển động của xe; K là hệ số cản không khí; S là diện tích cản chính diện; δ là hệ số khối lượng quay; α là góc dốc của đường.

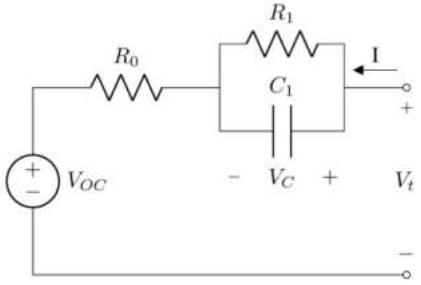
Gọi T_{EM}, P_{EM} lần lượt là mô men xoắn và công suất do trục động cơ điện tạo ra; ω_{EM}, ω_{wh} là vận tốc góc của trục động cơ điện và trục bánh xe; i_{tl} là tỷ số truyền lực, khi đó:

$$P_{EM} = T_{EM}.\omega_{EM};\quad \omega_{EM} = i_{tl}.\omega_{wh} \quad (2)$$

Căn cứ vào các công thức đã khảo sát, sau đây ta đi xây dựng lần lượt từng mô hình các cụm chính trong hệ thống động truyền lực của xe.

3.2. Mô hình bộ pin điện

Nguồn cung cấp năng lượng của xe là một bộ pin điện gồm nhiều cell pin được ghép lại với nhau. Sơ đồ mạch tương đương (*Equivalent Circuit Model, ECM*) của một cell pin được thể hiện như bên dưới, trong hình 3, [3].



Hình 3. Mô hình mạch tương đương của cell pin $LiFePO_4$

Các tham số được sử dụng trong ECM bao gồm V_{OC} điện áp mạch hở (OCV), điện trở trong R_0, điện trở phân cực R_1và điện dung C_1 biểu thị phản ứng tức thời trong quá trình sạc hoặc xả. Sử dụng định luật Kirchhoff, phương trình không gian trạng thái trong của ECM có thể được tính như sau.

$$\dot{V}_C = -\frac{1}{R_1.C_1}V_C + \frac{1}{C_1}; \quad S\dot{O}C = \frac{I}{C_{\max} \times 3600}; \quad V_t = V_{OC} + R_0.I + V_C \tag{3}$$

Trong đó: C_{max} là dung lượng tối đa của pin, V_t là điện áp cực, V_{OC} là điện áp mạch hở và V_C là điện áp của R_1 và C_1, I dòng điện của cell pin.

Khối pin điện của xe được chế tạo bằng cách kết hợp nhiều cell pin lại với nhau. Điện áp của bộ pin điện V_{bat} được tính bằng cách nhân điện áp của các cell pin song song V_{cell} với tổng số cell pin nối tiếp n_s. Dòng điện I_{bat} được tính bằng tích của số nhánh song song n_p với dòng điện của cell pin I

$$\begin{aligned} V_{bat} &= n_s.V_{cell} \\ I_{bat} &= n_p.I \end{aligned} \tag{4}$$

Để xác định mức tiêu thụ năng lượng của xe đòi hỏi phải chạy mô hình xe theo các chu trình chạy xe khác nhau, theo [4] năng lượng tiêu thụ cần thiết để xe chuyển động được tính toán bằng cách tích phân công suất cần thiết .

$$E_b = \frac{1}{3600}\int V_{bat}.I_{bat}.dt \tag{5}$$

Năng lượng tiêu thụ E_{tth}, được tính theo quãng đường xe chạy d $[km]$ thu được từ công suất đầu ra của pin E_b, [2].

$$E_{tth} = \frac{E_b}{d/100} \tag{6}$$

3.3. Mô hình động cơ điện

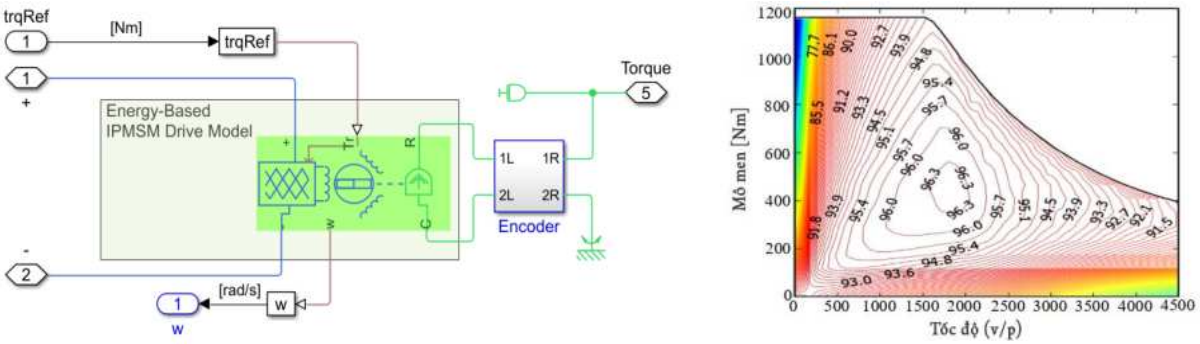
Hiện nay trên các ô tô tải sử dụng nhiều loại động cơ điện, tuy nhiên phổ biến là loại động cơ điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu cực từ dạng ẩn *(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)*. Do đó, bài báo lựa chọn và xây dựng mô hình của IPMSM. Mô hình toán học của IPMSM gồm có các phương trình điện áp viết trên hệ trục quay đồng bộ d-q như sau [7]:

$$\begin{cases} V_d = R_s.i_d + L_d\dfrac{di_d}{dt} - \omega_e.L_q.i_q; \quad V_q = R_s.i_q + L_q\dfrac{di_q}{dt} + \omega_e.L_d.i_q + \omega_e.\lambda_{pm} \\ P_{eM} = \dfrac{3}{2}(V_d.i_d + V_q.i_q); \quad T_{EM} = T_{eM} - J_{mM}\dfrac{d\omega_s}{dt} \end{cases} \tag{7}$$

Trong đó: V_d, V_q [V] là hình chiếu của vector điện áp cuộn dây lên trục d và trục q; i_d, i_q [A] là hình chiếu của vector dòng điện cuộn dây lên trục d và trục q; R_s [Ω] là điện trở pha của cuộn dây trên trục d và trục q; L_d, L_q [H] là điện cảm tương đương của cuộn dây trên trục d và trục q; λ_{pm} [Wb] là từ thông của nam châm vĩnh cửu; ω_e [rad/s] là tốc độ quay của động cơ; P_{eM} [kW] là

công suất dòng điện đầu vào của động cơ; J_{mM} là mô men quán tính của động cơ điện; T_{eM} là mô men xoắn điện sinh ra trong động cơ; T_{EM} là mô men xoắn thực tế của động cơ.

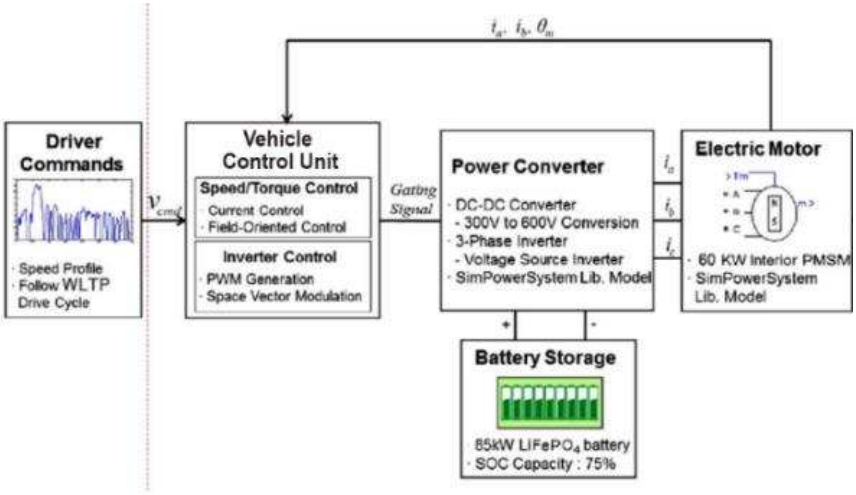
Trong phần này ta sử dụng mô hình "Motor & Drive" trong Simscape/Driveline có tùy biến để phù hợp với mục đích tính toán và mô phỏng, trên Hình 4 là mô hình và bản đồ hiệu suất của động cơ IPMSM.



Hình 4. Mô hình và bản đồ hiệu suất của động cơ IPMSM

3.4. Mô hình khối điều khiển xe

Để thiết lập mô hình mô phỏng động lực học chuyển động của xe, cần thiết phải xây dựng mô hình khối điều khiển xe (*Vehicle Control Unit, VCU*). Đầu vào khối VCU là tốc độ thực tế của xe và tốc độ tham chiếu từ một chu trình chạy xe giả định nào đó. Trong mô hình VCU đã xây dựng tốc độ chạy xe thực tế được so sánh với tốc độ tham chiếu để xác định thông số đầu vào cho khối động cơ.



Hình 5. Mô hình khối điều khiển VCU của xe

3.5. Mô hình hộp giảm tốc và cầu xe

Mô hình hộp giảm tốc và cầu xe được mô phỏng dựa trên tỷ số truyền, hiệu suất truyền lực bằng cách sử dụng các khối có sẵn trong thư viện Simulink. Tham số đầu vào của mô hình là mô men xoắn thực tế của động cơ điện, mô men xoắn đầu ra T_{tl} của mô hình là:

$$T_{tl} = T_{EM}.i_{tl}.\eta_{tl} \tag{8}$$

Trong đó: i_{tl} là tỷ số truyền lực qua hộp giảm tốc và vi sai cầu xe; η_{tl} là hiệu suất hệ thống truyền lực.

3.6. Mô hình lốp xe

Trong phần này bài báo trình bày mô hình lốp xe do Pacejka đề xuất [6], lực kéo P_k được tính theo công thức:

$$\begin{cases} P_k = \mu(\lambda).R_z = D\sin(C.\tan^{-1}(B.\lambda - E(B.\lambda - \tan^{-1}(B.\lambda))).R_z \\ \lambda = \dfrac{r_e.\omega_{wh} - v}{|v|} \end{cases} \quad (9)$$

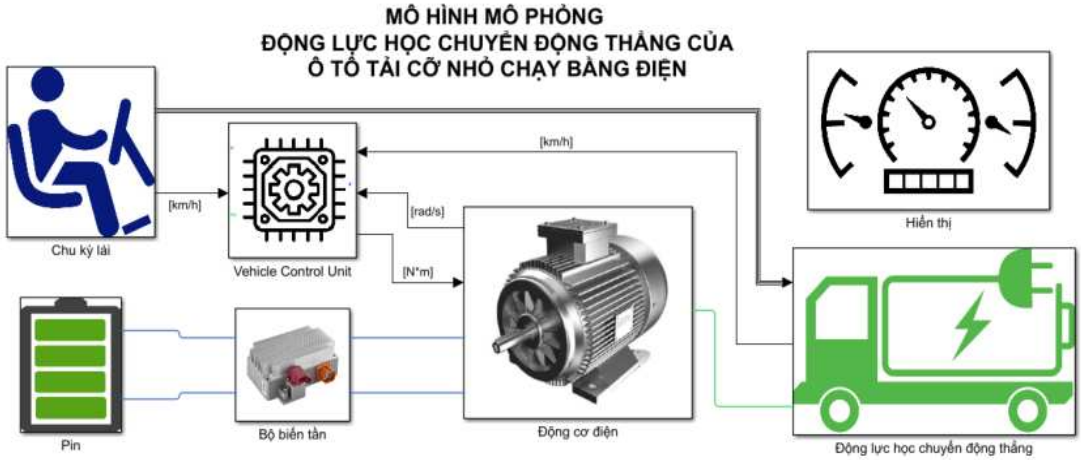
Trong đó B, C, D, E lần lượt là các hệ số phụ thuộc độ cứng, loại mặt đường, độ mấp mô, và độ cong của đường; r_e bán kính lăn của xe; μ là hệ số bám; λ là hệ số trượt của bánh; Rz là phản lực pháp tuyến của đường.

Bảng 1. Hệ số của mô hình lốp Pacejka cho các điều kiện đường khác nhau

	Đường nhựa khô	Đường nhựa ướt	Tuyết	Băng
B	10	12	5	4
C	1,9	2,3	2	2
D	1	0,82	0,3	0,1
E	0,97	1	0,1	1

4. Mô hình và kết quả mô phỏng động lực học chuyển động thẳng của xe

Trong phần này, trên cơ sở phương trình cân bằng lực kéo, mô hình mô phỏng động lực học chuyển động thẳng của xe được xây dựng bằng cách phân tích, lựa chọn và tùy biến các mô hình thành phần mô phỏng các cụm chính trong hệ thống động truyền lực của xe trong thư viện công cụ SimDriveline và một số công cụ của phần mềm Matlab/Simulink. Sau đó kết nối các mô hình thành phần lại với nhau như trong hệ thống động truyền lực trên xe thực. Các thông số của ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện BYD - T5 được chọn để thiết lập cho mô hình. Cấu trúc của mô hình mô phỏng như được thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Sơ đồ khối của mô hình trong mô phỏng động lực học chuyển động thẳng của xe

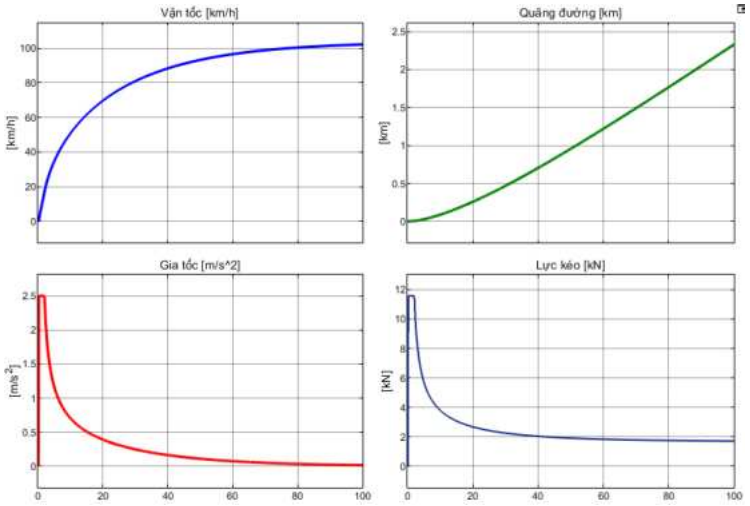
Sau đó, bài báo đã sử dụng chu trình chạy xe áp dụng cho xe điện hạng nhẹ toàn cầu (*World Harmonized Light Vehicle Test Procedure, WLTP*) và chu trình chạy xe tiêu chuẩn Châu Âu (*New European Driving Cycle, NEDC*) để chạy thử mô hình.

Bảng 2. Các thông số đầu vào của mô hình áp dụng cho xe khảo sát đã nêu

Thông số	**Giá trị**	**Thông số**	**Giá trị**
Khối lượng xe toàn tải	4495 [kg]	**Loại pin**	$LiFePO_4$
Tải trọng của xe	1520 [kg]	Dung lượng pin	84,5 [kWh]
A	1,93 [m]	Quy cách lốp xe	7.00R16LT
B	1,43 [m]	Hệ số cản lăn	0,015
Hg	1,228 [m]	Tỷ số truyền i_{tl}	3,91
L	3,36 [m]	**Loại động cơ điện**	IPMSM
Mật độ không khí	1,3 [kg/m^3]	Tốc độ tối đa động cơ điện	4500 [vg/phút]
Diện tích cản chính diện	5,83 [m^2]	Công suất định mức động cơ điện	60 [kW]
Hệ số khí động học	0,45	Mô-men xoắn định mức động cơ điện	1150 [Nm]

5. Kết quả và thảo luận

Tiến hành chạy mô hình mô phỏng với các giả thiết nêu trên kết quả thu được thời gian tăng tốc từ 0 ÷ 80km/h là 27,8 giây, tốc độ tối đa xe đạt được 105 km/h so với 100 km/h do nhà sản xuất công bố, tốc độ đạt được sai lệch 5% so với công bố của nhà sản xuất.

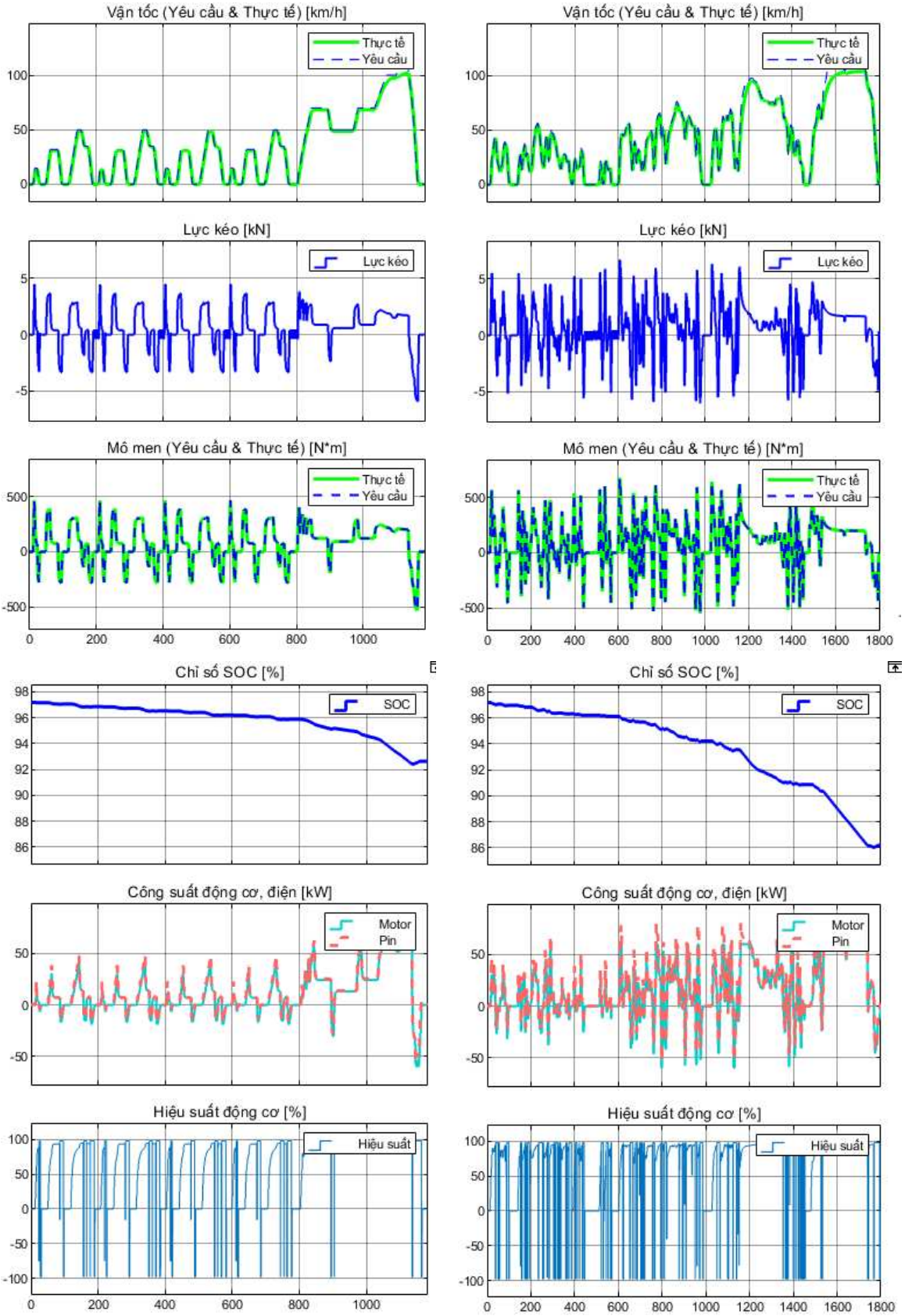


Hình 7. Kết quả mô phỏng khả năng tăng tốc của xe

Bảng 3. Kết quả mô phỏng khả năng tăng tốc ở một số điều kiện khác nhau

Thông số	**Thời gian tăng tốc (s)**		**Quãng đường tăng tốc (m)**	
	0 ÷ 60 km/h	0 ÷ 80 km/h	0 ÷ 60 km/h	0 ÷ 80 km/h
Tải trọng				
Toàn tải	16,2	31,2	150	433
50% tải trọng	12,8	23,6	120	336
Không tải	10,2	18,6	93	250
Hệ số cản lăn (f)				
0,01 (Phủ nhựa tốt)	14,4	27,4	138	388
0,016 (Phủ nhựa trung bình)	15,3	30,1	150	443
0,023 (Phủ nhựa xuống cấp)	16,3	35,2	163	536
Góc vượt dốc lớn nhất [độ]	39			

Kết quả mô phỏng khác từ các chu trình chạy xe tiêu chuẩn được thể hiện ở hình 8.



a) Chu trình chạy xe NEDC (1184 giây) *b) Chu trình chạy xe WLTP (1800 giây)*

Hình 8. Kết quả mô phỏng với chu trình chạy xe tiêu chuẩn

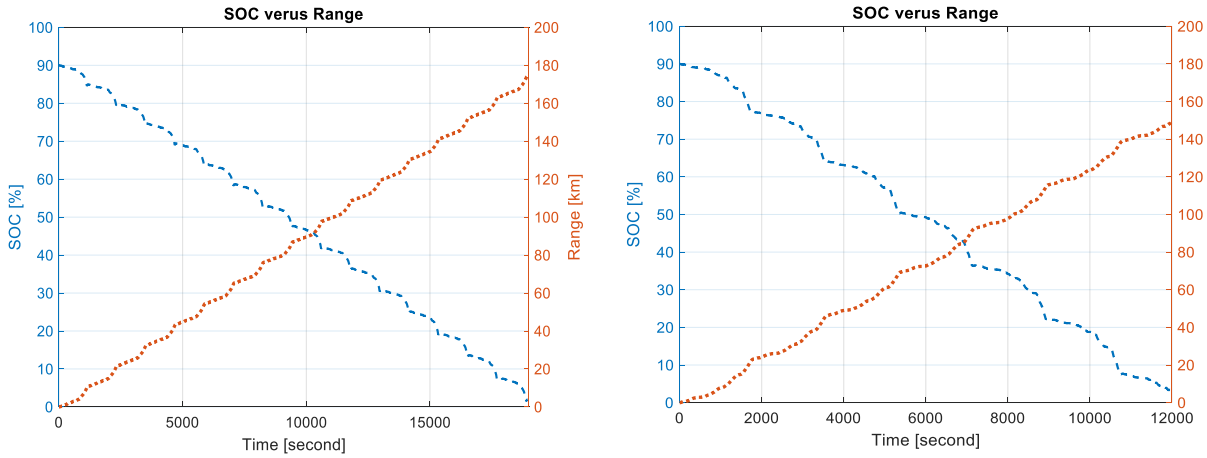
Trong các kết quả của hai chu trình chạy xe thể hiện trong hình 8, mô men xoắn yêu cầu và thực tế có độ lệch không đáng kể, do đó kết quả thu được từ quá trình mô phỏng là khá chính xác. Ở đồ thị công suất, ta nhận thấy công suất cơ học và công suất điện của mô tơ điện gần tương đương nhau với độ lệch thấp, hiệu suất của động cơ điện đạt xấp xỉ 95%.

Một số kết quả tính toán với các chu trình NEDC và WLTP được thống kê trong bảng 2. Căn cứ vào các kết quả tính toán khảo sát được này, cho phép nhà thiết kế hoặc thử nghiệm có thể đưa ra những đánh giá, hiệu chỉnh cho phù hợp với mục đích nghiên cứu.

Bảng 4. Kết quả mô phỏng với các chu trình chạy xe NEDC và WLTP

Thông số	Đơn vị	NEDC	WLTP
Thời gian mô phỏng	s	1180	1800
Chiều dài chu trình	km	11	23,25
SOC (Thông số sạc của pin)	%	88,7	80,2
Phạm vi xe chạy	km	165,9	146,4
Mức tiêu thụ năng lượng	kWh/100km	51,2	58,1

Trong trường hợp pin sạc đầy, kiểm tra bằng chu trình chạy xe NEDC [8] phạm vi hoạt động là 165,9 km, mức tiêu thụ năng lượng 51,2 kWh/100 km. Đối với chu trình chạy xe WLTP đạt được mức tiêu thụ là 58,1 kWh/100 km và phạm vi hoạt động là 146,4 km. Tương ứng với các chu trình này, kết quả khảo sát với thông số SOC và cự ly quãng đường xe chạy (*Range*) được thể hiện trên các hình 9.



a) Chu trình chạy xe NEDC *b) Chu trình chạy xe WLTP*

Hình 9. Kết quả khảo sát các thông số SOC và cự ly quãng đường xe chạy

Bảng 5. Kết quả mô phỏng mức tiêu hao năng lượng với các trường hợp vận tốc không đổi

Vận tốc [km/h]	Mức tiêu thụ năng lượng [kWh/100km]	Cự ly quãng đường xe chạy [km]
40	26,65	317
50	29,75	284
60	34,13	248

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương pháp đơn giản và hiệu quả nhằm thiết lập mô hình tính toán và mô phỏng động lực học chuyển động thẳng của ô tô tải cỡ nhỏ chạy bằng điện kiểu BEV có công thức bánh xe 4x2 dẫn động cầu sau. Mô hình được xây dựng dựa trên công cụ SimDriveline và một số công cụ khác trong phần mềm được sử dụng phổ biến là phần mềm Matlab/Simulink. Phương pháp này cho phép khảo sát được tương đối đầy đủ các thông số chính phản ánh động lực học quá trình chuyển động thẳng của xe theo thời gian với các kịch bản chạy xe khác nhau, làm cơ sở cho quá trình nghiên cứu động lực học chuyển động thẳng của xe ô tô tải chạy bằng điện một cách trực quan và sát với kết cấu thực của hệ thống động truyền lực trên xe. Bằng cách tùy chỉnh và phát triển thêm, mô hình cũng có thể được sử dụng để khảo sát động lực học chuyển động của một số loại xe có kết cấu tương tự với độ chính xác mong muốn. Đây chính là hướng phát triển tiếp theo của bài báo này, nhằm phục vụ các yêu cầu tính toán khảo sát đa dạng khác.

Tài liệu tham khảo

1. A. Emadi. (2014). *Advanced Electric Drive Vehicles*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press.
2. I. Miri, A. Fotouhi, and N. Ewin. (2021). "*Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study*," International Journal of Energy Research, vol. 45, no. 1, pp. 501-520, doi: https://doi.org/10.1002/er.5700.
3. Y. Song, M. Park, M. Seo, and S. W. Kim. (2020). "*Online State-of-Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Considering Model Inaccuracies Under Time-Varying Current Conditions*", IEEE Access, vol. 8, pp. 192419-192434, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032752.
4. M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, and A. Emadi. (2004). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. pp. 1-396.
5. V. Đ. L. Nguyễn Phúc Hiểu. (2002). *Lý thuyết ô tô quân sự*. Hà Nội: NXB Quân đội nhân dân, p. 378.
6. H. B. Pacejka. (2012). *Tire and Vehicle Dynamics*, Third ed. ScienceDirect: Netherlands.
7. S. Soylu. (2011). "Electric Vehicles," ed. Rijeka: IntechOpen.
8. K. S. Grewal and P. M. Darnell. (2013). "*Model-based EV range prediction for Electric Hybrid Vehicles*" in IET Hybrid and Electric Vehicles Conference *2013 (HEVC 2013)*, 6-7 Nov. pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2013.1895.

Research on developing a simulation model for the longitudinal dynamics of small battery electric trucks

Abstract: *This journal article presents a method for developing a simulation model to analyze the longitudinal dynamics of small truck battery electric vehicles (BEVs) with a 4x2 wheel configuration and rear-wheel drive. The research utilizes Matlab/Simulink to model the key components of the vehicle's powertrain system, focusing on examining critical parameters related to the vehicle's longitudinal motion. The analysis explores the interaction between the motion resistance forces and the tractive forces generated by the powertrain. The proposed approach provides a straightforward and effective solution for evaluating longitudinal dynamic parameters, supporting the design, optimization, and testing of small truck battery electric vehicles.*

Keywords: Longitudinal dynamics, small truck battery electric vehicles, powertrain system, simulation.

❑

Nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm khảo sát độ êm dịu chuyển động của ô tô quân sự bằng công nghệ thực tại ảo

Trần Thành Lam[1], Đỗ Văn Tứ[1], Lê Văn Trung[1], Nguyễn Mạnh Hùng[1], Lại Việt Anh[1]

[1] *Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự*

[*] Email: thanhlam.tran@lqdtu.edu.vn, Số điện thoại: 0972162262

Tóm tắt

Bài báo tiến hành xây dựng mô hình thực nghiệm khảo sát độ êm dịu chuyển động của ô tô quân sự có ứng dụng công nghệ thực tại ảo. Mô hình hoạt động trong phòng thí nghiệm với đầy đủ các bộ phận thực tế của xe quân sự hai cầu. Dao động tần số thấp được tạo ra từ hệ thống thủy lực được điều khiển bằng PLC. Dao động tần số cao bằng bộ tạo rung chủ động. Kết quả gia tốc dao động được đo bằng các cảm biến chuyên dụng, có so sánh đánh giá kết quả với tiêu chuẩn ISO 2631 - 1.

Từ khóa: *Bình phương trung bình gia tốc (RMS); độ êm dịu, độ cứng hệ thống treo cabin; hệ số cản giảm chấn.*

1. Đặt vấn đề

- Đối với ô tô quân sự, độ êm dịu chuyển động có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả làm việc và sức khỏe của người ngồi trên xe, bởi vì điệu kiện làm việc của ô tô quân sự khắc nghiệt hơn so với các loại phương tiện khác [1]. Khi xe chuyển động trên đường các nguồn kích thích dao động là mấp mô mặt đường, bản thân cụm động cơ cũng gây ra các rung động và tác động lên người lái thông qua hệ thống treo và ghế ngồi.

- Mục tiêu của bài báo này, xây dựng mô hình thực nghiệm có thể khảo sát độ êm dịu theo phương thẳng đứng tại các vị trí đầu, ngực và đùi của đối tượng nghiên cứu, nghiên cứu động lực học dao động của ô tô quân sự hai cầu, thông qua các bộ phát lực chủ động bằng thủy lực, đánh giá độ êm dịu chuyển động của các vị trí người ngồi trên cabin và thùng xe theo vị trí tương ứng [2].

- Các giá trị gia tốc bình phương trung bình của ghế ngồi người ngồi trên cabin và thùng xe theo phương thẳng đứng, góc lắc dọc và lắc ngang của cabin được chọn là hàm mục tiêu. Dựa trên các chỉ tiêu về độ êm dịu cho người được Hiệp hội kỹ sư Đức VDI đưa ra bằng tiêu chuẩn quốc gia VDI - 2537 và được tổ chức tiêu chuẩn quốc tế chấp nhận thành tiêu chuẩn ISO2631-1 cũng như các thông số thiết kế hệ thống treo để đánh giá ảnh hưởng và độ êm dịu. [1], [3], [4].

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Giả thiết xây dựng mô hình

- Mô hình nghiên cứu cho thiết kế thử nghiệm là mô hình không gian. Ô tô quân sự có hai cầu, hệ thống treo phụ thuộc, các phần tử trên phương tiện được giữ nguyên không có sự thay đổi về kết cấu.

- Ô tô được tạo bởi các khối lượng quán tính chuyển động cùng với trọng tâm xe. Trọng tâm của xe nằm trong mặt phẳng đối xứng dọc xe.

- Các đặc tính đàn hồi giảm chấn là tuyến tính; Đường tâm trục cầu xe dao động trong các mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng đối xứng dọc xe.

- Bỏ qua mômen quán tính của các cầu xe đối với trục quay của bánh xe. Bỏ qua sự mất cân bằng và mômen hiệu ứng con quay.

- Dao động góc ngang của các khối lượng là nhỏ; Sự tiếp xúc của bánh xe với mặt đường là tiếp xúc điểm; Xe chuyển động trên đường cứng tuyệt đối; Bỏ qua sự trượt của bánh xe và bề mặt đường.

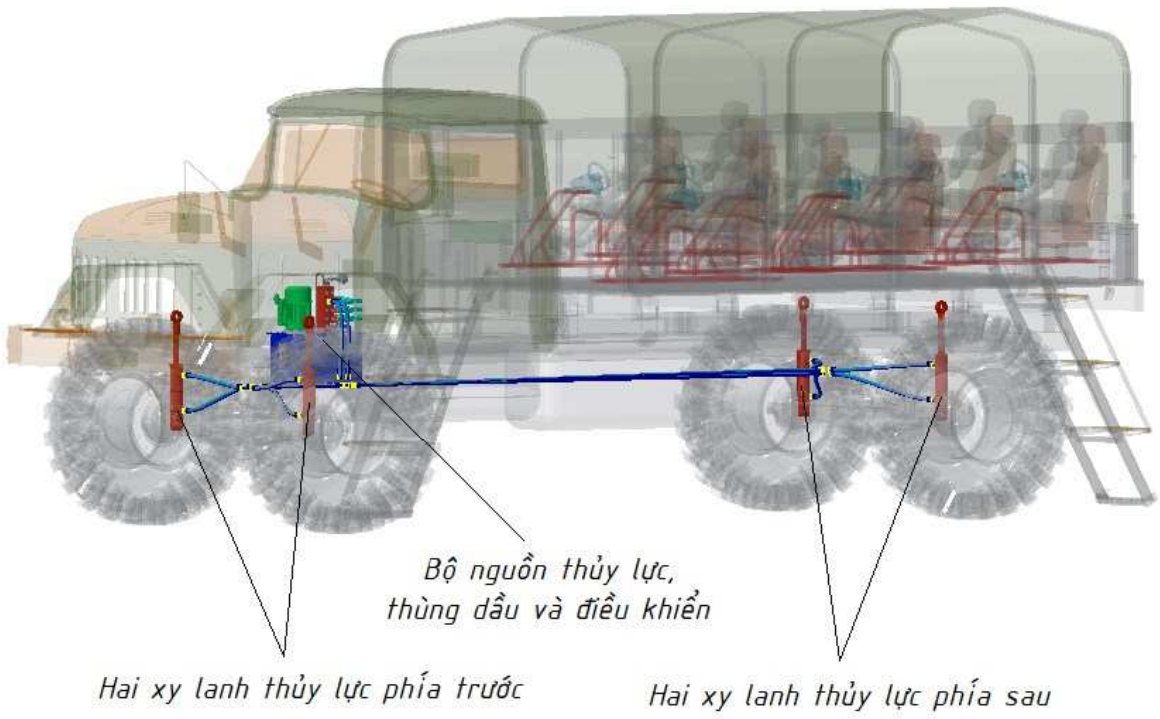
- Xét dao động thẳng đứng; Dao động của các phần tử trong hệ là tuyến tính; Bánh xe lăn không trượt trên nền cứng tuyệt đối và luôn tiếp xúc với mặt đường.

- Liên kết của cơ hệ là liên kết lý tưởng.

2.2. Ứng dụng phần mềm 3D thiết kế mô hình thực nghiệm

Trên cơ sở xe ZIL-130 tiến hành mô phỏng chi tiết các phần tử của hệ thống treo, các cụm chi tiết tổng thành trên xe và tiến tới mô phỏng toàn bộ xe.

Nhóm tác giả lựa chọn hai phương án thiết kế, phương án thứ nhất sử dụng 4 xi lanh thủy lực bố trí đối xứng 2 bên bánh xe trên một cầu. Ưu điểm của phương án này là khi điều khiển tối ưu có thể tạo được các chuyển động nhịp nhàng cho cầu trước, cầu sau, tạo mấp mô ngẫu nhiên và dễ kiểm soát hành trình. Nhược điểm: nếu điều khiển không chính xác sẽ tạo thành hệ siêu tĩnh với 4 điểm chuyển động, tác động vào khung xe làm cho khung xe bị xoắn và uốn, sau một thời gian dài sẽ dẫn đến phá hủy do mỏi.



Hình 1. Thiết kế 3D phương án dẫn động điều khiển hệ thống thủy lực tạo dao động

Phương án thứ 2: Sử dụng 3 xi lanh thủy lực bố trí theo phương án 1 xi lanh tại cầu trước và hai xi lanh bố trí cầu sau. Ưu điểm của phương án này: 3 điểm của xi lanh tạo thành mặt phẳng, xe lên xuống nhịp nhàng, khung xe không bị rằng buộc bởi liên kết cứng. Nhược điểm khó điều khiển chính xác dao động góc lắc ngang và dao động góc lắc dọc do phải tính toán gián tiếp.



Hình 2. Mô hình thử nghiệm thực tế và tủ điều khiển PLC

2.3. Độ êm dịu chuyển động

Độ êm dịu chuyển động ("Ride comfort") là một khái niệm chỉ sự cảm nhận chủ quan của con người về dao động. Cảm giác đó được phỏng vấn trực tiếp các nhóm người khác nhau và như vậy độ êm dịu ngưỡng là chủ quan. Để đánh giá ảnh hưởng của dao động đến cơ thể người, hiệp hội tiêu chuẩn quốc tế đã đưa ra tiêu chuẩn ISO 2631-1 dựa trên tiêu chuẩn VDI của CHLB Đức [1, 6, 7, 9]. Theo tiêu chuẩn này tần số dao động kích thích từ nguồn kích thích đến các vị trí khảo sát nằm trong khoảng từ 0,5 đến 80 Hz. Để đánh giá độ êm dịu của người ngồi trên cabin, theo tiêu chuẩn ISO, gia tốc bình phương trung bình theo phương thẳng đứng được xác định theo công thức:

$$a_W = \left[\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2(t)\,dt\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Trong đó: aw là gia tốc bình phương trung bình theo phương thẳng đứng; aw(t) là gia tốc theo phương thẳng đứng theo thời gian (m/s2) và T là thời gian khảo sát (s). Điều kiện chủ quan để đánh giá độ êm dịu ô tô theo gia tốc bình phương trung bình (phương thẳng đứng) dựa vào bảng 1 dưới đây:

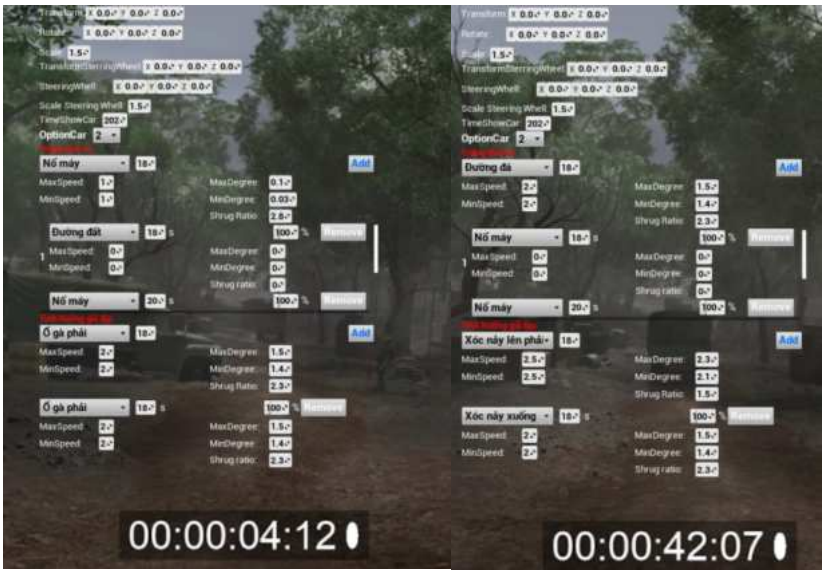
Bảng 1. Bảng đánh giá chủ quan độ êm dịu ô tô theo ISO 2631-1

STT	a_{wz} giá trị (m/s^2)	Cấp êm dịu
1	< 0,315 m/s^2	Thoải mái
2	0,315 m/s^2 - 0,63 m/s^2	Một chút khó chịu
3	0,5 m/s^2 - 1 m/s^2	Khá khó chịu
4	0,8 m/s^2 - 1,6 m/s^2	Không thoải mái
5	1,25 m/s^2 - 2,5 m/s^2	Rất khó chịu
6	> 2 m/s^2	Cực kỳ khó chịu

2.4. Xây dựng chương trình thực tại ảo, lựa chọn các tham số mặt đường và kịch bản nghiên cứu

Mô hình thử nghiệm để đảm bảo được tính thực tế như khi chuyển động trên đường, hoạt cảnh được lựa chọn cho xe quân sự là đường Trường Sơn với các thông số đường đựa lựa chọn sát với thực tế, các thông số về đường có thể thay đổi vô cấp cho phù hợp với chương

trình điều khiển. Kịch bản có thể lựa chọn tương ứng với các trạng thái hoạt động của xe, đứng yên tại chỗ, nổ máy và chuyển động trên đường, vận tốc chuyển động được thay đổi tương ứng với các chế độ hoạt động khác nhau của ô tô và điều kiện đường.

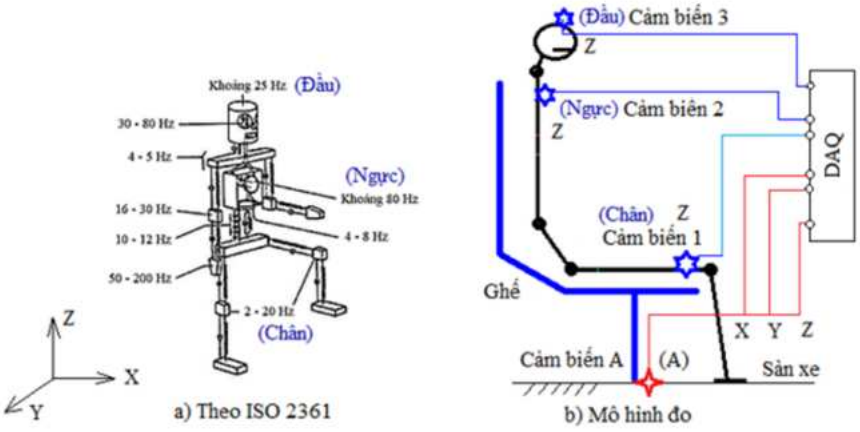


Hình 3. Thay đổi các thông số mặt đường và kịch bản làm việc của phương tiện

Chương trình thực tại ảo VR được liên kết với tủ điều khiển PLC bằng giao tiếp RS - 485 và ModBus, trong tủ điều khiển có thiết kế một máy tính chuyên dụng PLC-S7-1200, phần CPU này sẽ đảm nhận vai trò kết nối giữa phần mềm VR thực tại ảo và tủ điều khiển.

2.5. Quy trình nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình

Mô hình thí nghiệm ghế và người được thực hiện trên xe ngoài hiện trường. Sơ đồ mô hình được trình bày trên hình 6. Có 4 cảm biến gia tốc đo, (1) cảm biến A 3 chiều đo gia tốc tại chân ghế theo 3 phương X, Y, Z; (2) cảm biến 1 đo tại chân người (vị trí trên đùi gần đầu gối); (3) cảm biến 2 đo tại ngực và (4) cảm biến 3 đo tại đầu. Vị trí lắp cảm biến tham khảo theo tiêu chuẩn ISO 2361 trên hình 4 [3].

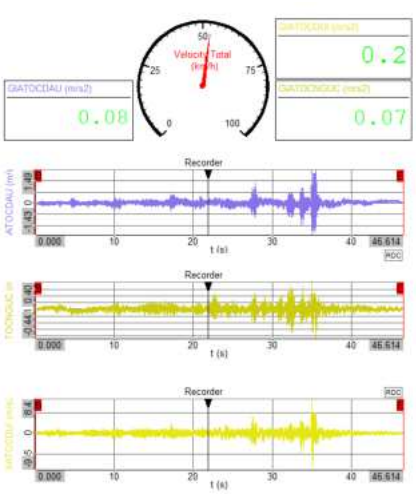


Hình 4. Sơ đồ kết nối thiết bị thí nghiệm trên ghế và người

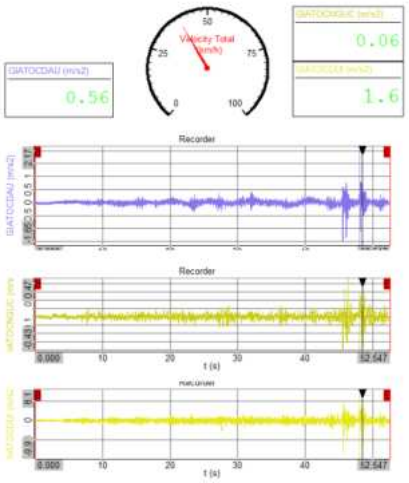
3. Kết quả và thảo luận

Để nghiên cứu độ êm dịu chuyển động của ô tô quân sự trên cơ sở mô hình thực nghiệm, tiến hành thay đổi các tham số của đường, thay đổi lực từ bộ phát lực chủ động, bằng phương

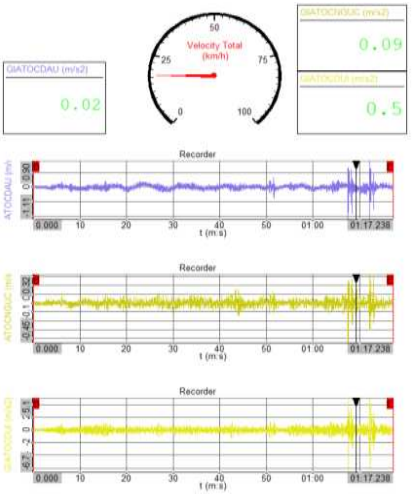
pháp thống kê và đo lường trực tiếp thông qua cảm biến gia tốc, ta có các kết quả nghiên cứu sau: Xe chuyển động với các vận tốc khác nhau, chọn chế độ mấp mô mặt đường ngẫu nhiên sau 500 m, xe gặp một mấp mô dạng Sin theo tiêu chuẩn TCCS 34: 2020/TCĐBVN.



Hình 5. Gia tốc theo phương thẳng đứng tác động lên người tại vị trí đầu, ngực và đùi ở vận tốc V = 60 km/h



Hình 6. Gia tốc theo phương thẳng đứng tác động lên người tại vị trí đầu, ngực và đùi ở vận tốc V = 40 km/h



Hình 7. Gia tốc theo phương thẳng đứng tác động lên người tại vị trí đầu, ngực và đùi ở vận tốc V = 20 km/h

Từ hình 5, 6 và hình 7, ta có gia tốc bình phương trung bình theo phương thẳng đứng của vị trí đầu khi xe chuyển động với vận tốc V = 60km/h a_{da60} = 0,08 m/s^2; gia tốc bình phương tại vị trí ngực a_{n60} = 0,02 m/s^2 và gia tốc bình phương trung bình tại vị trí đùi a_{du60} = 0,2 m/s^2. Đối chiếu với bảng 2 (tiêu chuẩn ISO 2631-1) về đánh giá chủ quan theo tiêu chuẩn thì người lái có cảm giác thoải mái ở đầu vì đã qua các bộ phận của cơ thể hấp thụ xung lực, tuy nhiên ở vị trí đùi tiếp xúc trực tiếp với ghế, người lái có cảm giá một chút khó chịu. Hay nói cách khác là là các thông số thiết kế của hệ thống treo của sát xi xe cơ sở, phù hợp với điều kiện khai thác nêu trên. Khi xe chuyển động với vận tốc V = 40 km/h a_{da40} = 0,56 m/s^2; gia tốc bình phương tại vị trí ngực a_{n40} = 0,06 m/s^2 và gia tốc bình phương trung bình tại vị trí đùi a_{du40} = 1,6 m/s^2. Đối chiếu với bảng 2 (tiêu chuẩn ISO 2631-1) tại ví trí đùi rất khó chịu khi đi qua mấp mô với vận tốc này. Vị trí đầu khá khó chịu cho người ngồi. Khi xe chuyển động với vận tốc V = 20 km/h a_{da20} = 0,02 m/s^2; gia tốc bình phương tại vị trí ngực a_{n20} = 0,09 m/s^2 và gia tốc bình phương trung bình tại vị trí đùi a_{du40} = 0,5 m/s^2. Đối chiếu với bảng 2 (tiêu chuẩn ISO 2631-1) người ngồi trên xe khá thoải mái với vận tốc này.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã xây dựng mô hình thực nghiệm, nghiên cứu độ êm dịu chuyển động của ô tô quân sự có sử dụng công nghệ thực tại ảo. Ứng dụng phần mềm Tia Portal để điều khiển các xi lanh thủy lực, phần mềm Dewesoft X để đo lường và thử nghiệm tác động của mặt đường lên phần khối lượng được treo và tác động lên vị trí người lái, để khảo sát độ êm dịu chuyển động, tiến hành thay đổi các kịch bản, các tham số mặt đường, tốc độ chuyển động của ô tô.

- Thông số điều kiện đường khảo sát và thông số mặt đường, thông số vận tốc có ảnh hưởng đến độ êm dịu chuyển động, ngoài ra vị trí trên xe, các vị trí càng gần trọng tâm thì ít bị

ảnh hưởng của dao động góc, độ êm dịu chuyển động của người ngồi trên thùng xe giảm dần khi khoảng khoảng cách từ vị trí ngồi đến trọng tâm giảm.

- Hiện tại tác giả chỉ khảo sát trên một loại đường ISO cấp C là mặt đường bình thường, với một mấp mô dạng Sin, trong khi đó ô tô quân sự thường xuyên hoạt động trên địa hình phức tạp, thậm chí không đường với các dải tốc độ khác nhau. Nhóm tác giả sẽ tiếp tục nghiên cứu trên nhiều loại đường trong thời gian tới. Đề xuất thêm các giải pháp nhằm nâng cao độ êm dịu chuyển động cho ô tô tải quân sự, đặc biệt hướng tới sử dụng các phần tử giảm chấn và đàn hồi phi tuyến, có thể thay đổi được các giá trị độ cứng và hệ số cản phù hợp.

Tài liệu tham khảo

1. Võ Văn Hường. (2004). *Thiết lập mô hình khảo sát dao động của ô tô vận tải nhiều cầu,* Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Hà nội.
2. Bùi Văn Cường (08 - 2018). *Nghiên cứu ảnh hưởng của thông số hệ thống treo cabin đến độ êm dịu người lái*. Bài báo tạp chí Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số Đặc san FEE.
3. Florin M. Marcu. (2009). *Semi active Cab Suspension Control for Semi-truck Applications*, Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia.
4. Alexander Gross. (2013). "*Development of a 4-pointAir Cab Suspension System for Conventional Heavy Trucks*", International Truck & Bus Meeting & Exhibition.
5. Leilei Zhao, Changcheng Zhou, Yuewei Yu, and Fuxing Yang. (July 4, 2016). *A method to evaluate stiffness and damping parameters of cabin suspension system for heavy truck*, Advances in Mechanical EngineeringVolume 8, Issue 7.
6. ISO 8608:1995. *Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data*.
7. Võ Văn Trung .(2011). *Nghiên cứu dao động ngẫu nhiên xe xích chiến đấu có kể đến yếu tố phi tuyến*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Hà Nội.
8. Vũ Tiến Đạt. (tháng 7, 2017). *Nghiên cứu phương pháp mô phỏng mấp mô mặt đường trên miền thời gian*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Xây dựng, Số 4.
9. Tiêu chuẩn cơ sở, TCCS 34: 2020/TCĐBVN, (2020), gờ giảm tốc, gồ giảm tốc trên đường bộ - yêu cầu thiết kế - Rumble Strips, Speed Hump, Speed Bump on the road - Specifications for design. Bộ Giao thông Vận tải, Tổng cục Đường bộ Việt Nam.

Research on building an experimental model to survey the motion smoothness of military vehicles using virtual reality technology

Abstract: *The paper builds an experimental model to investigate the smoothness of movement of military vehicles using virtual reality technology. The model operates in a laboratory with all the actual components of a two-wheel drive military vehicle. Low-frequency oscillations are generated from a hydraulic system controlled by a PLC. High-frequency oscillations are generated by an active vibrator. The acceleration results are measured by specialized sensors, and the results are compared and evaluated with the ISO 2631-1 standard.*

Keywords: Acceleration Mean Square (RMS); ride comfort, cabin suspension stiffness; damping coefficient.

❑

Ứng dụng MATLAB - SIMULINK mô phỏng dao động sàn xe tổ hợp pháo phòng không ở trạng thái bắn đơn

Trần Mạnh Hải[1], Nguyễn Văn Trà[1]

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: manhhaihk999@gmail.com; Tel: 0984325945

Tóm tắt

Trong quá trình triển khai trận địa, tổ hợp pháo phòng không lắp trên xe có thể thực hiện ở trạng thái bắn đơn hoặc bắn loạt trong điều kiện sử dụng hoặc không sử dụng chân chống. Tuy nhiên, thực tiễn chiến đấu cho thấy, để đảm bảo tính cơ động và khả năng sẵn sàng chiến đấu, tổ hợp pháo thường được triển khai bắn trong điều kiện xe không sử dụng chân chống. Bài báo tập trung nghiên cứu cơ sở lý thuyết về dao động của sàn xe tổ hợp pháo phòng không lắp ráp tại Việt Nam ở trạng thái bắn đơn trong điều kiện xe không sử dụng chân chống. Trên cơ sở đó, xây dựng hệ phương trình vi phân và sử dụng phần mềm MATLAB - SIMULINK để mô phỏng dao động sàn xe nhằm làm cơ sở dữ liệu tham khảo cho xạ thủ.

Từ khóa: *Dao động sàn xe, hệ thống treo, cầu xe, tổ hợp pháo phòng không, bắn đơn.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, trong Quân đội ta đã và đang sử dụng một số loại pháo phòng không đó là: pháo phòng không 23 mm, 37 mm, 57 mm do Nga hoặc Trung Quốc chế tạo. Các loại pháo phòng không này được lắp đặt trên moóc riêng và được kéo bởi xe tải quân sự, như vậy tốn nhiều thời gian cơ động và khó khăn khi di chuyển trong các địa hình khác nhau. Vì vậy, trong chiến tranh ngày nay đặt ra là cần phải cơ động nhanh hơn, trong tác chiến cần biến hóa hơn và việc nghiên cứu lắp đặt các loại vũ khí này lên xe là hết sức cần thiết.

Từ đó, nhiều đề tài cấp Bộ Quốc phòng và cấp Nhà nước đã được các Viện và Trung tâm nghiên cứu của Quân đội triển khai theo định hướng chính là nghiên cứu cải tiến, phát triển vũ khí trang thiết bị hiện có để tạo ra sản phẩm mới có tính năng vượt trội hơn. Xuất phát từ các đề tài đó, tác giả nhận thấy khi tiến hành lắp đặt tổ hợp pháo phòng không lên xe cơ sở có đầy đủ tính năng kỹ, chiến thuật và đảm bảo tính cơ động, sẵn sàng chiến đấu cao trong điều kiện tác chiến ngày nay của Quân đội ta.

2. Thiết lập mô hình nghiên cứu dao động sàn xe tổ hợp pháo phòng không

2.1. Giả thiết

Tác giả đưa ra các giả thiết nhằm đơn giản hóa bài toán nhưng vẫn đánh giá được các thông số dao động cần thiết như sau:

- Khảo sát dao động sàn xe tổ hợp pháo phòng không đối với trường hợp xe 3 cầu. Tổ hợp pháo được lắp đặt trên sàn xe không biến dạng và toàn bộ trọng lượng xe được phân bố đều trên hệ thống treo trước, treo giữa và treo sau cùng với các bánh xe tương ứng. Dao động thẳng đứng của cầu giữa và cầu sau là như nhau và được quy dẫn về tâm trục cân bằng. Trong trường hợp này, cầu giữa và cầu sau được coi là một cụm cầu, gọi chung là cụm cầu sau.

- Toàn bộ phần treo của xe được mô hình hóa như một vật rắn. Khối lượng treo được quy dẫn về trọng tâm của phần treo, biểu thị qua khối lượng M và các mômen quán tính khối lượng đối với trục ngang Y (J_y) và trục dọc X (J_x) đi qua trọng tâm của phần treo.

- Khối lượng không được treo được quy dẫn về trọng tâm của phần không được treo trước và sau, biểu thị qua khối lượng m_1, m_2 và các mômen quán tính khối lượng đối với trục ngang Y (J_{y1}, J_{y2}) và trục dọc X (J_{x1}, J_{x2}) đi qua trọng tâm của phần không được treo.

- Khối lượng treo M được liên kết với khối lượng không treo trước m_1 và khối lượng không treo sau m_2 qua phần tử đàn hồi có độ cứng là K_1, K_2 và phần tử giảm chấn độ cản là C_1, C_2. Khối lượng phần không treo tương ứng với cầu trước và cụm cầu sau tác động lên mặt đường qua lốp xe với các phần tử đàn hồi có độ cứng là C_{L1}, C_{L2} và các phần tử giảm chấn có độ cản là K_{L1}, K_{L2}.

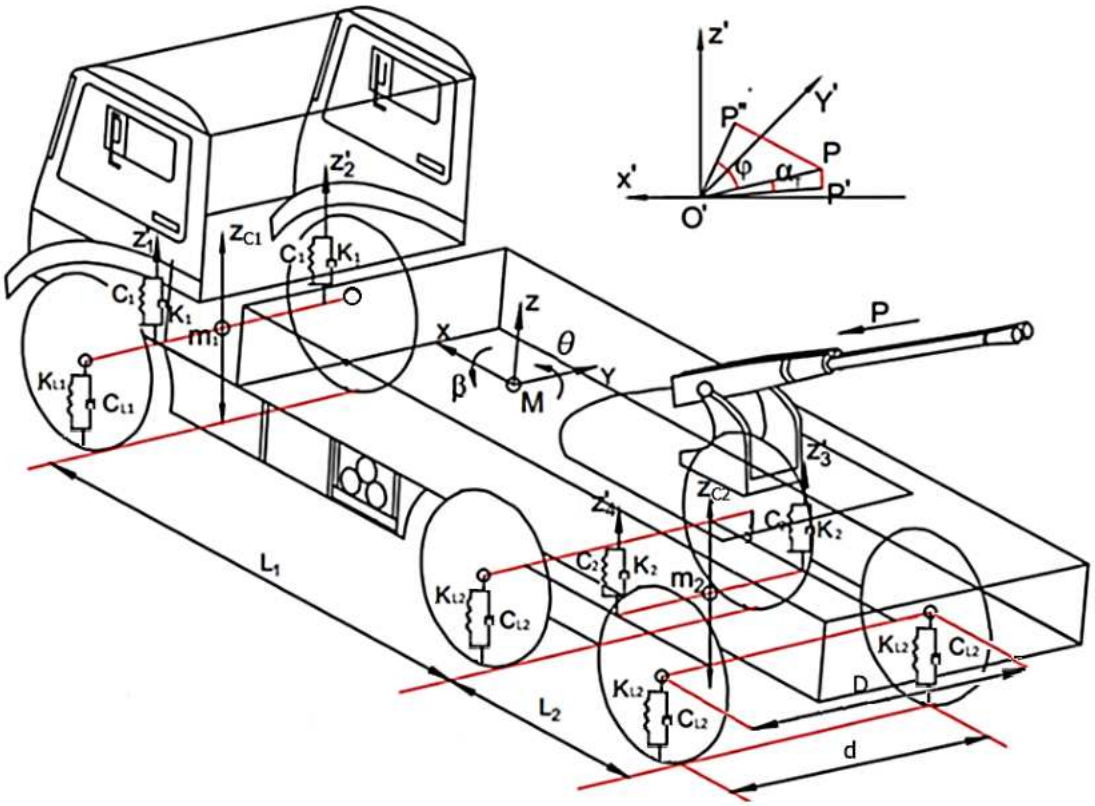
- Pháo được gắn cứng tuyệt đối với sàn xe và sàn xe được lắp cứng tuyệt đối với khung gầm của xe, loại trừ mọi sự biến dạng trong liên kết này, vị trí của pháo cách trọng tâm xe một khoảng xác định cho trước [4]. Góc tầm và góc hướng của pháo được thiết lập trước khi bắn và không thay đổi trong quá trình bắn do ảnh hưởng của lực phát bắn. Lực phát bắn là một lực tập trung.

- Nghiên cứu dao động đối với trường hợp xe đang cơ động, sau đó đứng lại, nhắm vào mục tiêu để thực hiện bắn, kích thích mặt đường là hàm điều hòa. Bánh xe luôn duy trì tiếp xúc với mặt đường, không có sự mất bám đường trong quá trình dao động.

- Các liên kết trong hệ thống cơ học là lý tưởng, không có độ trễ hay ma sát. Dao động của các phần tử trong hệ thống là tuyến tính nhằm đơn giản hóa mô hình toán học và phân tích động lực học.

2.2. Mô hình khảo sát

Từ các giả thiết ở trên, tác giả đưa ra mô hình tương đương khảo sát dao động sàn xe tổ hợp pháo phòng không như sau:



Hình 1. Mô hình động lực học dao động sàn xe khi bắn trên hệ thống treo

Trong đó:

M, m_1, m_2 - Khối lượng phần treo, phần không treo phía trước, phía sau [kg];

J_x, J_y - momen quán tính khối lượng phần treo đi qua trọng tâm phần treo đối với trục X và trục Y [kgm^2];

J_{x1}, J_{x2} - momen quán tính khối lượng phần không treo trước và sau đối với trục X [kgm^2];

z - dịch chuyển thẳng đứng của khối lượng treo [m];

z_1, z_2 - dịch chuyển thẳng đứng của khối lượng không treo trước bên trái, bên phải [m];

z_3, z_4 - dịch chuyển thẳng đứng của khối lượng không treo sau bên phải, bên trái [m];

z_{C1}, z_{C2} - dịch chuyển thẳng đứng của khối lượng tâm cầu trước, sau [m];

z'_1, z'_2 - dịch chuyển thẳng đứng của khối lượng treo trước ứng với vị trí bánh xe bên trái và bánh xe bên phải [m];

z'_3, z'_4 - dịch chuyển thẳng đứng của khối lượng treo sau ứng với vị trí bánh xe bên phải và bánh xe bên trái [m];

β, β_1, β_2 - góc lắc ngang quanh trục X của sàn xe, cầu trước và cầu sau [rad];

θ - góc lắc dọc quanh trục Y của sàn xe [rad];

P - lực phát bắn của pháo [N];

α - góc tầm của pháo [rad];

φ - góc hướng của pháo [rad];

X_p - khoảng cách từ bộ phận quay của pháo đến khối tâm xe theo trục X [m];

Z_p - độ cao từ bộ phận quay của pháo đến khối tâm xe theo trục Z [m];

K_{L1}, K_{L2} - độ cứng của lốp trước và các lốp sau [N/m];

C_{L1}, C_{L2} - độ cản của lốp trước và các lốp sau [N/m];

K_1, K_2 - độ cứng của treo trước và các treo sau [N/m];

C_1, C_2 - hệ số cản giảm chấn treo trước và các treo sau [Ns/m];

$z_{D1}, z_{D2},$ - biên dạng mặt đường tương ứng với bánh xe phía trước bên trái, bên phải [m];

z_{D3}, z_{D4} - biên dạng mặt đường tương ứng với các bánh xe phía sau bên phải, trái [m];

D - khoảng cách từ hệ thống treo bên trái tới hệ thống treo bên phải [m];

d - khoảng cách giữa 2 bánh xe của mỗi cầu [m].

2.3. Hệ phương trình vi phân của dao động

Dựa trên mô hình khảo sát đã phân tích, tác giả nhận thấy hệ dao động có 7 bậc tự do. Nhằm tối ưu hóa quá trình tính toán, tác giả lựa chọn phương pháp tách hệ và áp dụng nguyên lý D'Alembert.

Sau quá trình tính toán, phân tích, tác giả đã xây dựng hệ phương trình vi phân bao gồm 7 phương trình sau:

$$
\begin{cases}
M\ddot{z} = -2.K_1.\left(z - a.\theta - z_{C1}\right) - 2.\left(C_1.\dot{z} - a.\dot{\theta} - \dot{z}_{C1}\right) - 2.K_2.\left(z + b.\theta - z_{C2}\right) \\
\qquad - 2.C_2.\left(\dot{z} + b.\dot{\theta} - \dot{z}_{C2}\right) - P.\sin\alpha.\cos\varphi \\
m_1\ddot{z}_{C1} = -C_{L1}.(\,2\dot{z}_{C1} - \dot{z}_{D1} - \dot{z}_{D2}\,) - K_{L1}.(\,2z_{C1} - z_{D1} - z_{D2}\,) + 2.K_1.\left(z - a.\theta - z_{C1}\right) \\
\qquad + 2.C_1.\left(\dot{z} - a.\dot{\theta} - \dot{z}_{C1}\right) \\
m_2\ddot{z}_{C2} = -2C_{L2}.(\,2\dot{z}_{C2} - \dot{z}_{D3} - \dot{z}_{D4}\,) - 2K_{L2}.(\,2z_{C2} - z_{D3} - z_{D4}\,) + 2.K_2.\left(z + b.\theta - z_{C2}\right) \\
\qquad + 2.C_2.\left(\dot{z} + b.\dot{\theta} - \dot{z}_{C2}\right) \\
J_y.\ddot{\theta} = 2.K_1.a.\left(z - a.\theta - z_{C1}\right) + 2.C_1.a.\left(\dot{z} - a.\dot{\theta} - \dot{z}_{C1}\right) \\
\qquad - 2.K_2.b.\left(z + b.\theta - z_{C2}\right) - 2.C_2.b.\left(\dot{z} + b.\dot{\theta} - \dot{z}_{C2}\right) \\
\qquad + P.\sin\alpha.\cos\varphi.X_p - P.\cos\varphi.\cos\alpha.Z_p \\
J_x.\ddot{\beta} = -\frac{D^2}{2}.\beta.(\,K_1 + K_2\,) + \frac{D^2}{2}.\beta_1.K_1 + \frac{D^2}{2}.\beta_2.K_2 \\
\qquad - \frac{D^2}{2}.\dot{\beta}.(\,C_1 + C_2\,) + \frac{D^2}{2}.\beta_1.C_1 + \frac{D^2}{2}.\beta_2.C_2 + P.\cos\alpha.\cos\varphi.Z_p \\
J_{x1}.\beta_1 = -C_{L1}.(\,2\dot{z}_{C1} - \dot{z}_{D1} + \dot{z}_{D2}\,).\frac{d}{2} - K_{L1}.(\,2z_{C1} - z_{D1} + z_{D2}\,).\frac{d}{2} \\
\qquad + K_1.\left(z - a.\theta - z_{C1}\right).D + C_1.\left(\dot{z} - a.\dot{\theta} - \dot{z}_{C1}\right).D \\
J_{x2}.\beta_2 = -C_{L2}.(\,2\dot{z}_{C2} - \dot{z}_{D4} + \dot{z}_{D3}\,).d - K_{L2}.(\,2z_{C2} - z_{D4} + z_{D3}\,).d \\
\qquad + K_2.\left(z + b.\theta - z_{C2}\right).D + C_2.\left(\dot{z} + b.\dot{\theta} - \dot{z}_{C2}\right).D
\end{cases}
\tag{1}
$$

Biểu diễn hệ phương trình (1) dưới dạng ma trận:

$$[M]\{\ddot{q}\} = [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} + \{F\} \tag{2}$$

Trong đó:

[*M*] là ma trận khối lượng

[*C*] là ma trận độ cản

[*K*] là ma trận độ cứng

{*F*} là vector lực kích thích

$\{q\}=[z \quad z_{C1} \quad z_{C2} \quad \theta \quad \beta \quad \beta_1 \quad \beta_2\,]^T$ là vector các tọa độ suy rộng,

$\{\dot{q}\},\{\ddot{q}\}$ là vi phân cấp một và cấp hai của {q} theo thời gian.

Khi đó biểu thức tính các phần tử của các ma trận (2) như sau:

$$[M]=\begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{x1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{x2} \end{bmatrix};\{\dot{q}\}=\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{z}_{C1} \\ \dot{z}_{C2} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \end{bmatrix};\{\ddot{q}\}=\begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z}_{C1} \\ \ddot{z}_{C2} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{\beta}_1 \\ \ddot{\beta}_2 \end{bmatrix};\{F\}=\begin{bmatrix} P\cos\varphi\sin\alpha \\ C_{L1}(\dot{z}_{D1}+\dot{z}_{D2})+K_{L1}(z_{D1}+z_{D2}) \\ 2C_{L2}(\dot{z}_{D3}+\dot{z}_{D4})+2K_{L2}(z_{D3}+z_{D4}) \\ P\cos\varphi\sin\alpha X_p - P\cos\varphi\cos\alpha Z_p \\ P\cos\varphi\cos\alpha Z_p \\ C_{L1}(\dot{z}_{D1}-\dot{z}_{D2}).\dfrac{d}{2}+K_{L1}(z_{D1}-z_{D2}).\dfrac{d}{2} \\ C_{L2}(\dot{z}_{D4}-\dot{z}_{D3}).d+K_{L2}(z_{D4}-z_{D3}).d \end{bmatrix}$$

Các phần tử ma trận độ cản giảm chấn [C]:

$$\begin{bmatrix} -2C_1-2C_2 & 2C_1 & 2C_2 & 2aC_1-2bC_2 & 0 & 0 & 0 \\ 2C_1 & -2C_1-2C_{L1} & 0 & -2aC_1 & 0 & 0 & 0 \\ 2C_2 & 0 & -4C_{L2}-2C_2 & 2bC_2 & 0 & 0 & 0 \\ 2aC_1-2bC_2 & -2aC_1 & 2bC_2 & -2a^2C_1-2b^2C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}.(C_1+C_2) & -\dfrac{D^2}{2}.C_1 & -\dfrac{D^2}{2}.C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}.C_1 & -\dfrac{D^2}{2}.C_1-D.\dfrac{d}{2}.C_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}.C_2 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}.C_2-D.d.C_{L2} \end{bmatrix}$$

Các phần tử ma trận độ cứng [K]:

$$\begin{bmatrix} -2K_1-2K_2 & 2K_1 & 2K_2 & 2aK_1-2bK_2 & 0 & 0 & 0 \\ 2K_1 & -2K_1-2K_{L1} & 0 & -2aK_1 & 0 & 0 & 0 \\ 2K_2 & 0 & -4K_{L2}-2K_2 & 2bK_2 & 0 & 0 & 0 \\ 2aK_1-2bK_2 & -2aK_1 & 2bK_2 & -2a^2K_1-2b^2K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}.(K_1+K_2) & -\dfrac{D^2}{2}.K_1 & -\dfrac{D^2}{2}.K_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}.K_1 & -\dfrac{D^2}{2}K_1-D.\dfrac{d}{2}.K_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}.K_2 & 0 & -\dfrac{D^2}{2}K_2-D.d.K_{L2} \end{bmatrix}$$

Lực kích thích P là lực tác động lên pháo trong quá trình bắn, đóng vai trò quan trọng trong việc xác định động lực học của hệ thống. Trong thực tế chiến đấu, mỗi phát bắn của pháo phòng không 23 mm ước tính vào khoảng 40.000N [1], tạo ra các xung lực mạnh mẽ tác động không chỉ lên cấu trúc pháo mà còn ảnh hưởng đến các thành phần liên kết trong hệ thống.

Biên độ h và bước sóng *L* của biên dạng mặt đường cho các bánh xe bên trái được ký hiệu là (h_T, L_T) và các bánh xe bên phải là (h_P, L_P).

Phương trình mô tả chiều cao mấp mô tại điểm tiếp xúc của các bánh xe với mặt đường (trục Ox trên hình 2) là:

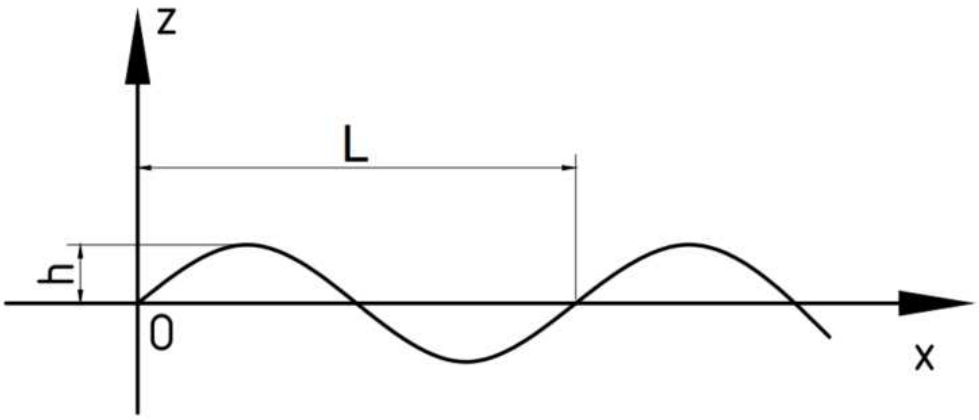
$$z_{D1} = h_T sin\left[\frac{2\pi}{L_T}(V.t + a)\right]; z_{D2} = h_P sin\left[\frac{2\pi}{L_P}(V.t + a)\right]$$

$$z_{D3} = h_P sin\left[\frac{2\pi}{L_P}(V.t - b)\right]; z_{D4} = h_T sin\left[\frac{2\pi}{L_T}(V.t - b)\right]$$

Trong đó:

V - là vận tốc chuyển động của xe [km/h].

$x = V.t$ là tọa độ theo phương x của trọng tâm thân tổ hợp tại thời điểm t [m].



Hình 2. Biên dạng mặt đường hình sin

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Thông số đầu vào

Tác giả sử dụng phần mềm MATLAB - SIMULINK [2] để giải hệ phương trình (1) và sử dụng các thông số của xe KAMAZ-43118 khi lắp tổ hợp pháo phòng không 23mm [3-4] như sau:

Bảng 1. Các thông số đầu vào của tổ hợp pháo phòng không bắn trên hệ thống treo

STT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Khối lượng treo	M	kg	13500
2	Khối lượng cầu trước	m_1	kg	940
3	Khối lượng cầu sau	m_2	kg	1820
4	Mô men quán tính khối lượng treo quanh trục y	J_y	kgm^2	25422
5	Mô men quán tính khối lượng treo quanh trục x	J_x	kgm^2	10117

STT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
6	Mô men quán tính khối lượng không treo trước quanh trục x	J_{x1}	kgm^2	698
7	Mô men quán tính khối lượng không treo sau quanh trục x	J_{x2}	kgm^2	1351
8	Độ cứng treo trước	K_1	N/m	126000
9	Độ cứng treo sau	K_2	N/m	295000
10	Độ cứng lốp trước	K_{L1}	N/m	510000
11	Độ cứng lốp sau	K_{L2}	N/m	510000
12	Độ cản treo trước	C_1	Ns/m	15992
13	Độ cản treo sau	C_2	Ns/m	8992
14	Độ cản lốp trước	C_{L1}	Ns/m	5000
15	Độ cản lốp sau	C_{L2}	Ns/m	5000
16	Khoảng cách giữa treo trái và phải	D	m	2,2
17	Khoảng cách từ tâm trục bộ phận treo trước đến trọng tâm	a	m	2,5
18	Khoảng cách từ tâm trục bộ phận treo sau đến trọng tâm	b	m	1,6
19	Khoảng cách từ bộ phận quay của pháo đến khối tâm xe theo trục *X*	X_p	m	1,5
20	Độ cao từ bộ phận quay của pháo đến khối tâm xe theo trục *Z*	Z_p	m	0,69
21	Khoảng cách giữa 2 bánh xe mỗi cầu	d	m	2,5
22	Lực phát bắn	P	N	40000

Giá trị cụ thể của các thông số về biên dạng mặt đường được sử dụng để tính toán là: *V = 20km/h; h_P = 5mm; h_T = 10mm;L_P = 6,0m; L_T = 6,0m.*

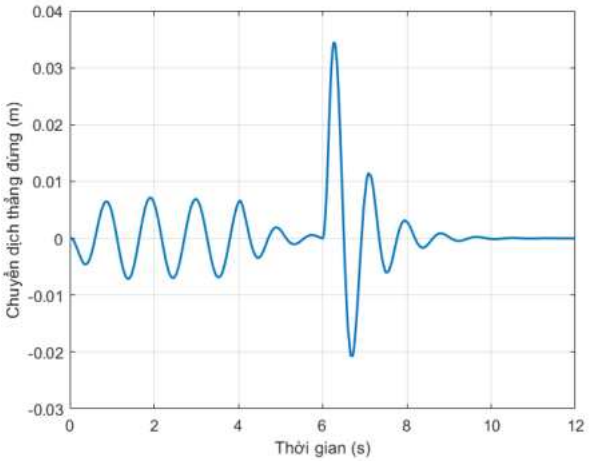
Với điều kiện như sau: $\vec{q}\Big\|_{t=0} = \vec{0}; \dot{\vec{q}}\Big\|_{t=0} = \vec{0}$

3.2. Kết quả mô phỏng

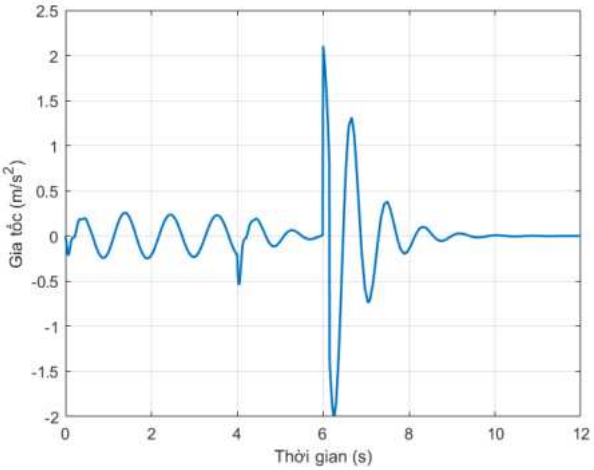
Tác giả tiến hành khảo sát dao động khi xe đang cơ động từ vị trí ban đầu t_0 = 0 (s) đến thời điểm t_1 = 4 (s), tiến hành ngắm bắn và bắn đơn ở thời điểm t_2 = 6 (s) đối với hai trường hợp bắn: Góc tầm 45 độ, góc hướng 30 độ và góc tầm 45 độ, góc hướng 45 độ.

Tiến hành khảo sát ở trạng thái bắn đơn đối với 02 trường hợp:

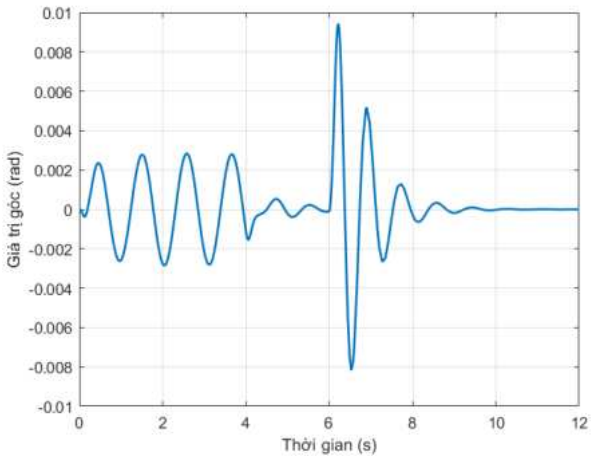
Trường hợp 1: Góc tầm $\alpha = 45^o$ và góc hướng $\varphi = 0^o$:



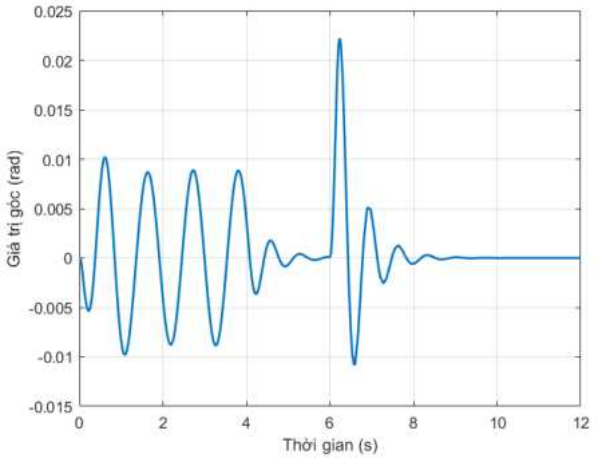
Hình 3. Đồ thị chuyển dịch thẳng đứng của sàn xe



Hình 4. Đồ thị gia tốc chuyển dịch của sàn xe

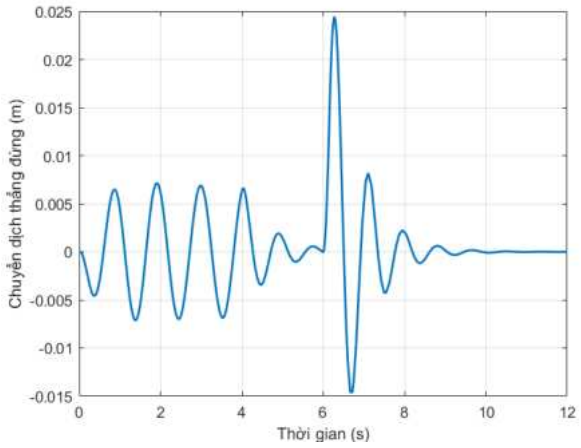


Hình 5. Dao động góc lắc dọc sàn xe

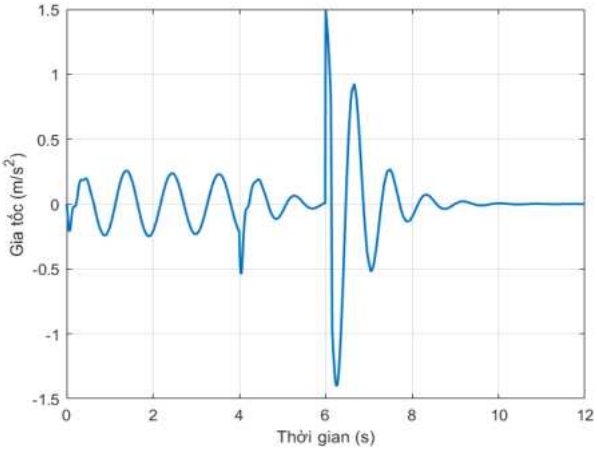


Hình 6. Dao động góc lắc ngang sàn xe

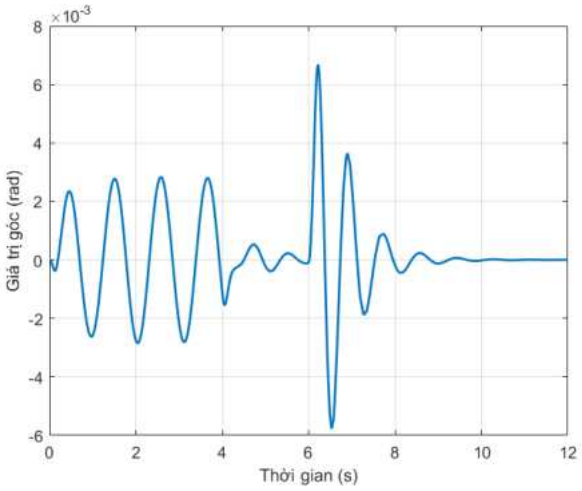
Trường hợp 2: Góc tầm $\alpha = 45^o$ và góc hướng $\varphi = 45^o$:



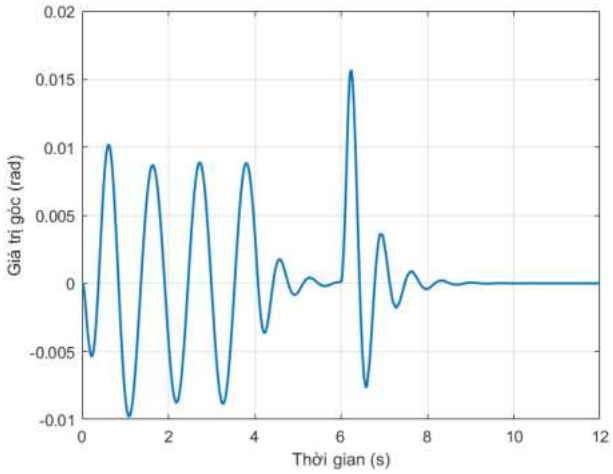
Hình 7. Đồ thị chuyển dịch thẳng đứng của sàn xe



Hình 8. Đồ thị gia tốc chuyển dịch của sàn xe



Hình 9. Dao động góc lắc dọc sàn xe



Hình 10. Dao động góc lắc ngang sàn xe

- Nhận xét:

+ Khi thực hiện phát bắn, dưới tác động của tải trọng từ khối lượng của các thành phần trong hệ và lực từ phát bắn, hệ thống phản ứng lại các tác động này gây ra dao động.

+ Căn cứ vào kết quả trên đồ thị, ta thấy ở trạng thái bắn đơn, các dao động của sàn xe sẽ tắt dần trong vòng 2 giây, sau đó hệ dao động trở về vị trí ban đầu và có thể thực hiện phát bắn tiếp theo mà không bị ảnh hưởng bởi những phát bắn trước đó.

+ Khi bắn với góc tầm $\alpha = 45^o$ và góc hướng $\varphi = 0^o$, biên độ dao động thẳng đứng của sàn xe lớn nhất là 0,035 (m), gia tốc bình phương trung bình là $z'_{bptb} = 0{,}035$ (m/s^2), giá trị bình phương trung bình góc lắc dọc là $\theta_{bptb} = 0{,}002$ (rad), giá trị bình phương trung bình góc lắc ngang $\beta_{bptb} = 0{,}006$ (rad).

+ Khi bắn với góc tầm $\alpha = 45^o$ và góc hướng $\varphi = 45^o$, biên độ dao động thẳng đứng của sàn xe lớn nhất là 0,024 (m), gia tốc bình phương trung bình $z'_{bptb} = 0{,}025$ (m/s^2), giá trị bình phương trung bình góc lắc dọc là $\theta_{bptb} = 0{,}004$ (rad), giá trị bình phương trung bình góc lắc ngang $\beta_{bptb} = 0{,}007$ (rad).

4. Kết luận

Kết luận rút ra từ nghiên cứu như sau:

- Xây dựng được mô hình động lực học dao động và thiết lập hệ phương trình vi phân mô tả dao động của sàn xe tổ hợp pháo phòng không và đã khảo sát đối với trường hợp bắn đơn tại các vị trí góc tầm, hướng khác nhau dựa trên nguyên lý D'Alembert. Đề xuất phương pháp triển khai mô hình toán theo dạng ma trận để thuận lợi cho việc kiểm tra tính đúng đắn.

- Mô phỏng dao động của sàn xe dựa theo phương pháp không gian trạng thái trong Simulink, từ đó xuất ra các kết quả dạng đồ thị để dễ dàng kiểm tra tính quy luật khi bắn làm cơ sở dữ liệu cho xạ thủ. Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng nhằm xác định các tổ hợp có tính năng cơ động, tính ổn định nhanh hơn, đáp ứng với yêu cầu mới trong chiến tranh hiện đại. Đồng giải quyết được nhiều vấn đề mang tính khoa học, tạo điều kiện cho việc đẩy mạnh nghiên cứu, tính toán, thiết kế, chế tạo vũ khí trang bị sau này.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Huy Chương. (1997), *Động lực học vũ khí tự động,* HVKTQS.
2. Nguyễn Hoài Thanh, Nguyễn Thanh Việt, Bùi Xuân Lâm. (2002). *Ứng dụng Matlab trong tính toán kỹ thuật*, Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. Hồ Chí Minh.

3. Vũ Đức Lập. (2004), *Sổ tay tra cứu tính năng kỹ thuật ôtô,* HVKTQS.
4. Vũ Đức Lập. (2011), *Dao động ô tô*, Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, Hà Nội.
5. Viện kỹ thuật cơ giới quân sự. (2009). "*Nghiên cứu thiết kế, chế tạo xe cơ sở đặc chủng quân sự để lắp đặt tổ hợp pháo phòng không nhiều nòng, tên lửa phòng không tầm thấp*", Đề cương nghiên cứu đề tài độc lập cấp nhà nước.

Simulation of Vehicle Platform Vibrations for Anti-Aircraft Artillery Systems in Single-Shot Mode Using MATLAB - SIMULINK

Abstract: *During battlefield deployment, the vehicle-mounted anti-aircraft artillery system can operate in single-shot or burst-fire modes, with or without the use of stabilizing outriggers. However, combat practice has shown that to ensure mobility and combat readiness, the artillery system is often deployed and fired without the use of stabilizing outriggers. This paper focuses on studying the theoretical foundation of vehicle platform vibrations for the anti-aircraft artillery systems assembled in Vietnam, specifically in single-shot mode without the use of stabilizing outriggers. Based on this, a set of differential equations is developed, and MATLAB - SIMULINK software is employed to simulate the vehicle platform vibrations, providing a reference database for gunners.*

Keywords: Vehicle Platform Vibrations; suspension system; axle system; Anti-Aircraft Artillery Systems; Single - Shot Mode.

❑

Nghiên cứu so sánh ảnh hưởng của bộ điều khiển PD, PI và PID cho hệ thống cân bằng điện tử ESC đến ổn định chuyển động của ô tô

Trần Danh Đồng[1], Vũ Ngọc Tuấn[1], Nguyễn Đình Dũng[2]

[1]Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Khoa Hàng không vũ trụ, Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: trandanhdong18@gmail.com; Tel: 0384121934

Tóm tắt

Hệ thống cân bằng điện tử ESC thường sử dụng các thuật toán điều khiển như PID (Proportional - Integral - Derivative), LQR (Linear Quadratic Regulator), MPC (Model Predictive Control), … để tối ưu hóa phản hồi của hệ thống. Nội dung bài báo này trình bày phương pháp thiết lập mô hình của hệ thống cân bằng điện tử ESC có bộ điều khiển PID và mô hình động lực học chuyển động của ô tô. Các kết quả khảo sát thu được bằng phương pháp mô phỏng số thông qua phần mềm CarSim và Matlab/Simulink nhằm đánh giá so sánh ảnh hưởng của bộ điều khiển PD, PI và PID đối với hệ thống cân bằng điện tử ESC đến quỹ đạo chuyển động và sự ổn định tổng thể của xe, thông qua đó giúp lựa chọn được bộ điều khiển hợp lý.

Từ khóa: *Mô hình động lực học; dao động ô tô; hệ thống cân bằng điện tử; ESC; PID.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, nhu cầu về an toàn trong giao thông ngày càng gia tăng, các hệ thống hỗ trợ lái xe, an toàn chủ động như hệ thống cân bằng điện tử (ESC), đang trở thành một phần không thể thiếu trong thiết kế và sản xuất ô tô hiện đại. Hệ thống ESC đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo sự ổn định của xe khi di chuyển, đặc biệt trong các tình huống khẩn cấp như quay vòng gấp, phanh gấp, hoặc trên bề mặt đường trơn trượt. Các yếu tố như lực ly tâm, tốc độ và điều kiện mặt đường đều có thể làm giảm khả năng kiểm soát của người lái, dẫn đến nguy cơ mất ổn định và gây ra tai nạn.

Hiện nay, có những hướng nghiên cứu chủ yếu về tính ổn định của ô tô như ổn định quỹ dạo chuyển động bằng lái điện tử [1], ổn định bằng điều khiển lực kéo [2], ổn định quỹ đạo chuyển động bằng điều khiển lực phanh [3] cùng với một số luật điều khiển cho hệ thống ESC có thể kể đến như PID [4], Fuzzy [5], …

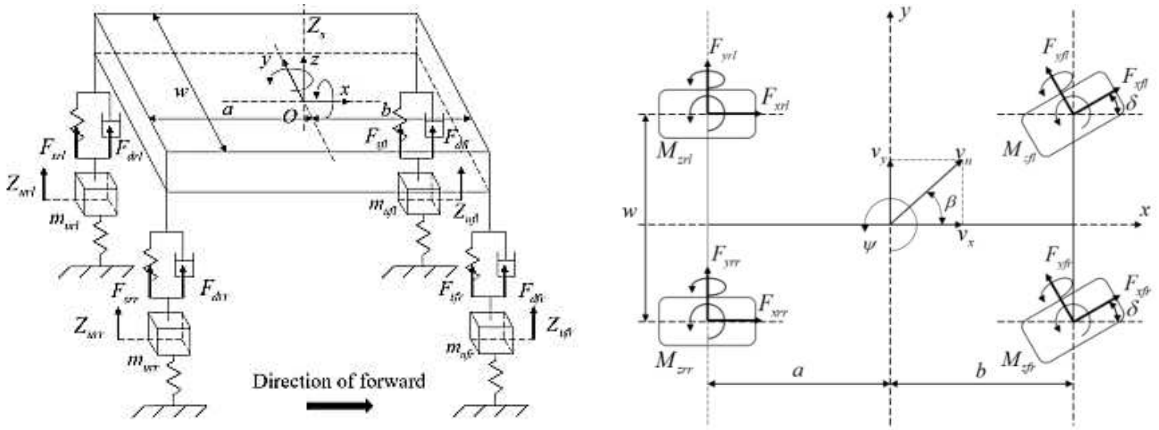
Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số của bộ điều khiển PID đối với hệ thống cân bằng điện tử ESC đến quỹ đạo chuyển động và ổn định của ô tô. Hệ thống ESC được sử dụng là hệ thống hoạt động dựa trên nguyên lý kiểm soát tốc độ góc quay thân xe (yaw rate) bằng cách điều chỉnh lực phanh trên các bánh xe để giữ xe đi đúng hướng. Mô hình sử dụng trong nghiên cứu này là mô hình gồm dao động và quay vòng của ô tô con. Bài báo bao gồm 5 phần trong đó phần 2 nghiên cứu mô hình động lực học dao động của ô tô; phần 3 giới thiệu mô hình hệ thống cân bằng điện tử ESC; phần 4 là kết quả mô phỏng với bộ điều khiển PD, PI, PID và đánh giá; Phần 5 là kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Xây dựng mô hình động lực học

Mô hình động lực học 14 bậc tự do được chia thành hai phần: mô hình dao động (hình 1a) và mô hình động lực học chuyển động (hình 1b). Mô hình dao động bao gồm ba bậc tự do cho chuyển động của thân xe: chuyển động tịnh tiến theo phương thẳng đứng; chuyển động

quay quanh trục dọc xe; chuyển động quay quanh trục ngang xe và bốn bậc tự do ứng với dao động theo phương thẳng đứng của bốn hệ thống treo ở bốn bánh xe. Mô hình động lực học chuyển động gồm bảy bậc tự do là chuyển động tịnh tiến theo phương dọc xe, chuyển động tịnh tiến theo phương ngang xe, chuyển động quay quanh trục thẳng đứng và bốn chuyển động quay của bốn bánh xe.

Mô hình ô tô được xây dựng với các giả thiết: Thân xe được coi là cứng tuyệt đối, có trọng lượng phân bố đối xứng theo trục dọc xe, các phần tử đàn hồi và giảm chấn trong mô hình có đặc tính tuyến tính, bỏ qua hệ số cản của lốp và độ dốc của đường.



Hình 1. Mô hình dao động không gian (a) và mặt phẳng của ô tô hai cầu (b) [6]

Hệ phương trình dao động theo phương thẳng đứng của ô tô:

$$F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr} + F_{srl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr} = m_s \ddot{Z}_s \tag{1}$$

$$(F_{srl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr})b - (F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr} = I_y \ddot{\theta} \tag{2}$$

$$(F_{sfl} + F_{dfl} + F_{srl} + F_{drl})\frac{w}{2} - (F_{sfr} + F_{dfr} + F_{srr} + F_{drr} = I_x \ddot{\theta} \tag{3}$$

Với I_x, I_y là mo men quán tính khối lượng treo đối với trục x và trục y.

Phương trình dao động của bốn bánh xe:

$$F_{tfl} - F_{sfl} - F_{dfl} = m_{ufl} \ddot{Z}_{ufl} \tag{4}$$

$$F_{tfr} - F_{sfr} - F_{dfr} = m_{url} \ddot{Z}_{ufr} \tag{5}$$

$$F_{trl} - F_{srl} - F_{drl} = m_{url} \ddot{Z}_{url} \tag{6}$$

$$F_{trr} - F_{srr} - F_{drr} = m_{urr} \ddot{Z}_{urr} \tag{7}$$

Hệ phương trình mô tả chuyển động của ô tô trong mặt phẳng:

$$F_{xfl}cos\delta - F_{yfl}sin\delta + F_{xfr}cos\delta - F_{yfr}sin\delta - F_{xrl} - F_{xrr} = m_t\left(\dot{v}_x - v_y\dot{\psi}\right)$$

$$F_{yfl}cos\delta + F_{xfl}sin\delta + F_{yfr}cos\delta + F_{xfr}sin\delta + F_{yrl} + F_{yrr} = m_t\left(\dot{v}_y + v_x\dot{\psi}\right)$$

$$-\frac{w}{2}F_{xfl}cos\delta + \frac{w}{2}F_{xfr}cos\delta - \frac{w}{2}F_{xrl} + \frac{w}{2}F_{xrr} + \frac{w}{2}F_{yfl}sin\delta - \frac{w}{2}F_{yfr}sin\delta + aF_{xfl}sin\delta$$

$$+aF_{yfl}cos\delta + aF_{xfr}sin\delta + aF_{yfr}cos\delta - bF_{yrl} + M_{zfl} + M_{zfr} + M_{zrl} + M_{zrr} = I_z\ddot{\psi}$$

Với m_t là khối lượng của ô tô; δ là góc đánh lái

Động lực học của bốn bánh xe được biểu diễn bằng các phương trình sau:

$$I_w\dot{\omega}_{fl} = T_{dfl} - T_{bfl} - T_{xfl} - F_{xfl}R_w \quad (11)$$

$$I_w\dot{\omega}_{fr} = T_{dfr} - T_{bfr} - T_{xfr} - F_{xfr}R_w \quad (12)$$

$$I_w\dot{\omega}_{rl} = T_{drl} - T_{brl} - T_{xrl} - F_{xrl}R_w \quad (13)$$

$$I_w\dot{\omega}_{rr} = T_{drr} - T_{brr} - T_{xrr} - F_{xrr}R_w \quad (14)$$

Trong đó I_w là momen quán tính của các bánh xe, R_w là bán kính động lực học của bánh xe; ω_{fl}, ω_{fr}, ω_{rl}, ω_{rr}, T_{dfl}, T_{dfr}, T_{drl}, T_{drr} và T_{bfl}, T_{bfr}, T_{brl}, T_{brr} là tốc độ góc, momen dẫn động truyền tới và momen phanh tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải;

Mô men phanh tại mỗi bánh xe tính theo diện tích má phanh A_w, hệ số ma sát của má phanh μ_p, bán kính phanh R_p và áp suất phanh P_{pi}:

$$T_{bi} = A_w\mu_p R_{pi}P_{pi} \quad \text{với } i = 1,\ldots,4 \quad (15)$$

Mô hình dao động 7 bậc tự do, mô hình động lực học chuyển động 7 bậc tự do và mô hình lốp được kết hợp lại với nhau mô tả chuyển động tổng quát của thân xe.

3. Mô hình hệ thống cân bằng điện tử ESC với bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID được thiết kế dựa trên cơ sở giảm thiểu sai lệch e giữa tốc độ góc quay thân xe mong muốn và tốc độ góc quay thân xe thực tế.

Tốc độ góc quay thân xe thực tế được đo từ cảm biến và tốc độ góc quay thân xe mong muốn được tính toán từ tín hiệu điều khiển của người lái là góc đánh lái và vận tốc xe. [7]:

$$\dot{\psi}_{mm} = \frac{\delta\dot{x}}{a + b + \dfrac{m\dot{x}^2\left(aC_{\alpha r} - bC_{\alpha f}\right)}{2C_{\alpha f}C_{\alpha r}}} \quad (16)$$

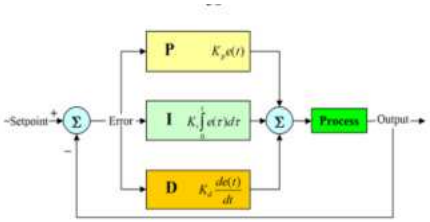
Với $C_{\alpha f}$ và $C_{\alpha r}$ là độ cứng của bánh xe phía trước và bánh xe phía sau

Tuy nhiên vận tốc góc quay thân xe mong muốn phải được giới hạn do hệ số bám của đường - lốp [6]. Giới hạn của tốc độ góc quay thân xe mong muốn được tính như sau [6]:

$$\dot{\psi}_{gh} = \frac{\mu g}{\dot{x}} \quad (17)$$

Vận tốc góc quay thân xe mong muốn được xác định bởi phương trình (16) được chấp nhận nếu nó không vượt quá giới hạn trên được xác định bởi phương trình (17). Nếu nó vượt quá giới hạn trên thì lấy bằng với giá trị giới hạn trên.

Giá trị của sai lệch e quyết định trạng thái quay vòng của ô tô. Khi xe quay vòng sang trái $\delta > 0$, nếu $e > 0$ ô tô ở trạng thái quay vòng thiếu, $e < 0$ ô tô ở trạng thái quay vòng thừa và khi $e = 0$ ô tô ở trạng thái quay vòng đúng. Khi xe quay vòng sang phải $\delta < 0$, nếu $e > 0$ ô tô ở trạng thái quay vòng thừa, $e < 0$ ô tô ở trạng thái quay vòng thiếu và khi $e = 0$ ô tô ở trạng thái quay vòng đúng. Trạng thái quay vòng thiếu xảy ra khi các bánh xe cầu trước bị trượt ngang trong quá trình quay vòng, ngược lại khi quay vòng thừa, các bánh xe cầu sau bị trượt ngang. Do khi bị trượt ngang, lực ngang đạt tới giá trị giới hạn nên không còn khả năng tiếp nhận lực dọc. Như vậy, khi $e > 0$, phanh các bánh xe bên trái và khi $e < 0$, phanh các bánh xe bên phải sẽ tạo ra mô men lệch cân bằng, giúp xe chuyển động theo đúng ý định của người lái.



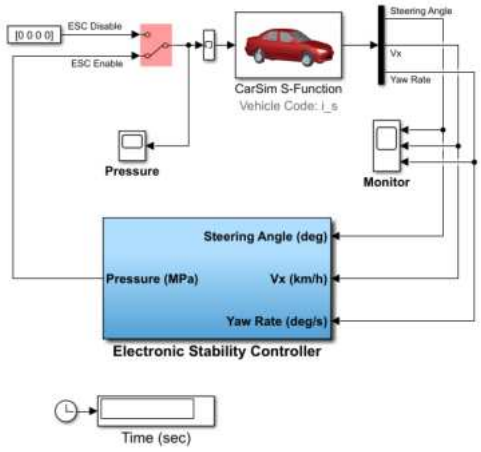
Hình 2. Mô hình cấu trúc bộ điều khiển PID

Hình 2 là cấu trúc bộ điều khiển PID. Bộ điều khiển PID tính toán một giá trị sai số là hiệu số giữa giá trị đo thông số biến đổi và giá trị đặt mong muốn. Bộ điều khiển sẽ thực hiện giảm tối đa sai số bằng cách điều chỉnh giá trị đầu vào. Tín hiệu điều khiển lực phanh thích hợp ở các bánh xe được tính theo công thức [18]:

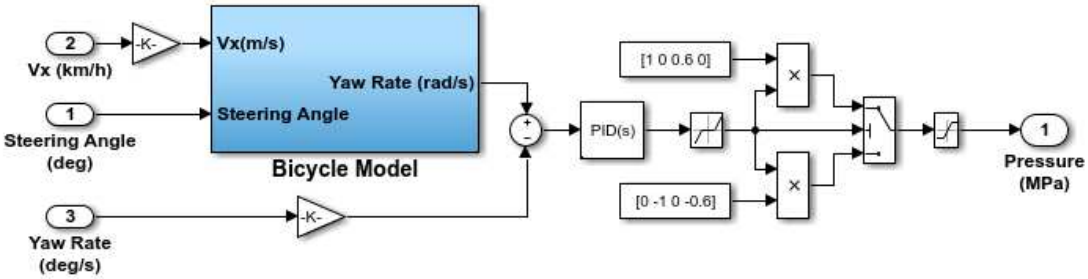
$$u(t) = K_P \mathrm{e}(\mathrm{t}) + K_I \int_0^T \mathrm{e}(\mathrm{t})\mathrm{dt} + K_D \frac{d}{dt}\mathrm{e}(\mathrm{t}) \tag{18}$$

Xác định các hệ số K_P, K_I, K_D thích hợp để giảm tối đa sai lệch giữa tốc độ góc quay thân xe mong muốn và tốc độ góc quay thân xe thực tế. Trong bài báo, tác giả thay đổi các thông số K_P, K_I, K_D và chọn ra bộ thông số để xe hoạt động ổn định trong điều kiện mô phỏng, từ đó so sánh hiệu quả của ba độ điều khiển PD, PI và PID với nhau.

Bộ điều khiển ESC được thiết kế trong Matlab Simulink, tích hợp với mô hình động lực học ô tô được mô phỏng trong phần mềm Carsim. Đầu vào là góc đánh lái, vận tốc xe và tốc độ góc quay thân xe, đầu ra là áp suất phanh trên các bánh xe để điều chỉnh hành vi của xe.



Hình 3. Mô hình liên kết Carsim và Simulink trong bộ điều khiển ESC.



Hình 4. Mô hình mô phỏng bộ điều khiển cân bằng điện tử

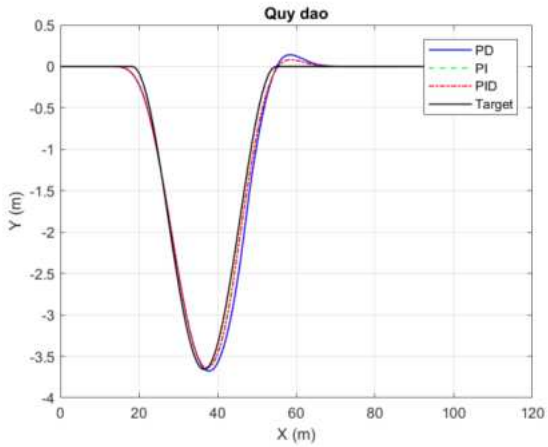
4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Quá trình khảo sát, tác giả sử dụng các thông số của ô tô cụ thể như sau (Bảng 1).

Bảng 1. Thông số của ô tô khảo sát

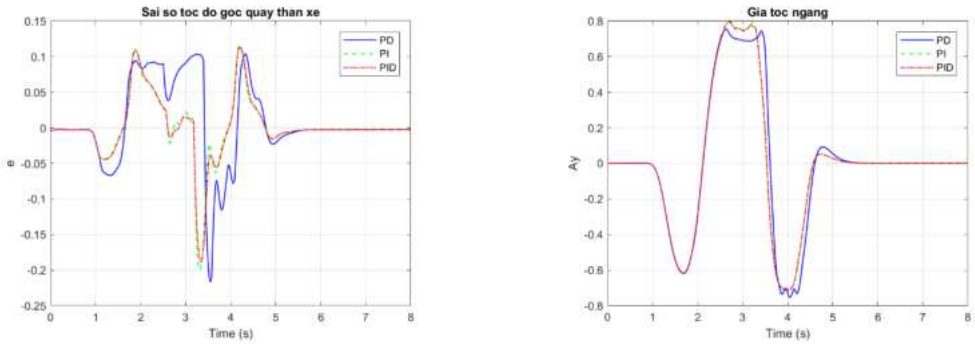
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Chiều dài Chiều rộng Chiều cao	4720 x 1820 x 1679 mm	Khoảng cách từ trọng tâm khối lượng treo đên cầu trước	1050 mm	Thông số lốp xe	225/65R17
Chiều dài cơ sở	2619 mm	Khoảng cách từ trọng tâm khối lượng treo đến cầu sau	1569 mm	Tỷ lệ mô men phanh / áp suất phanh bánh trước	350 Nm/Mpa
Khối lượng được treo / Không được treo	1429 kg 180kg	Chiều cao trọng tâm khối lượng treo	670 mm	Tỷ lệ mô men phanh / áp suất phanh bánh sau	200 Nm/Mpa

Ở phần này, tác giả đánh giá hiệu quả của hệ thống cân bằng điện tử đến quỹ đạo của ô tô khi sử dụng hệ thống ESC với ba bộ điều khiển PD, PI và PID



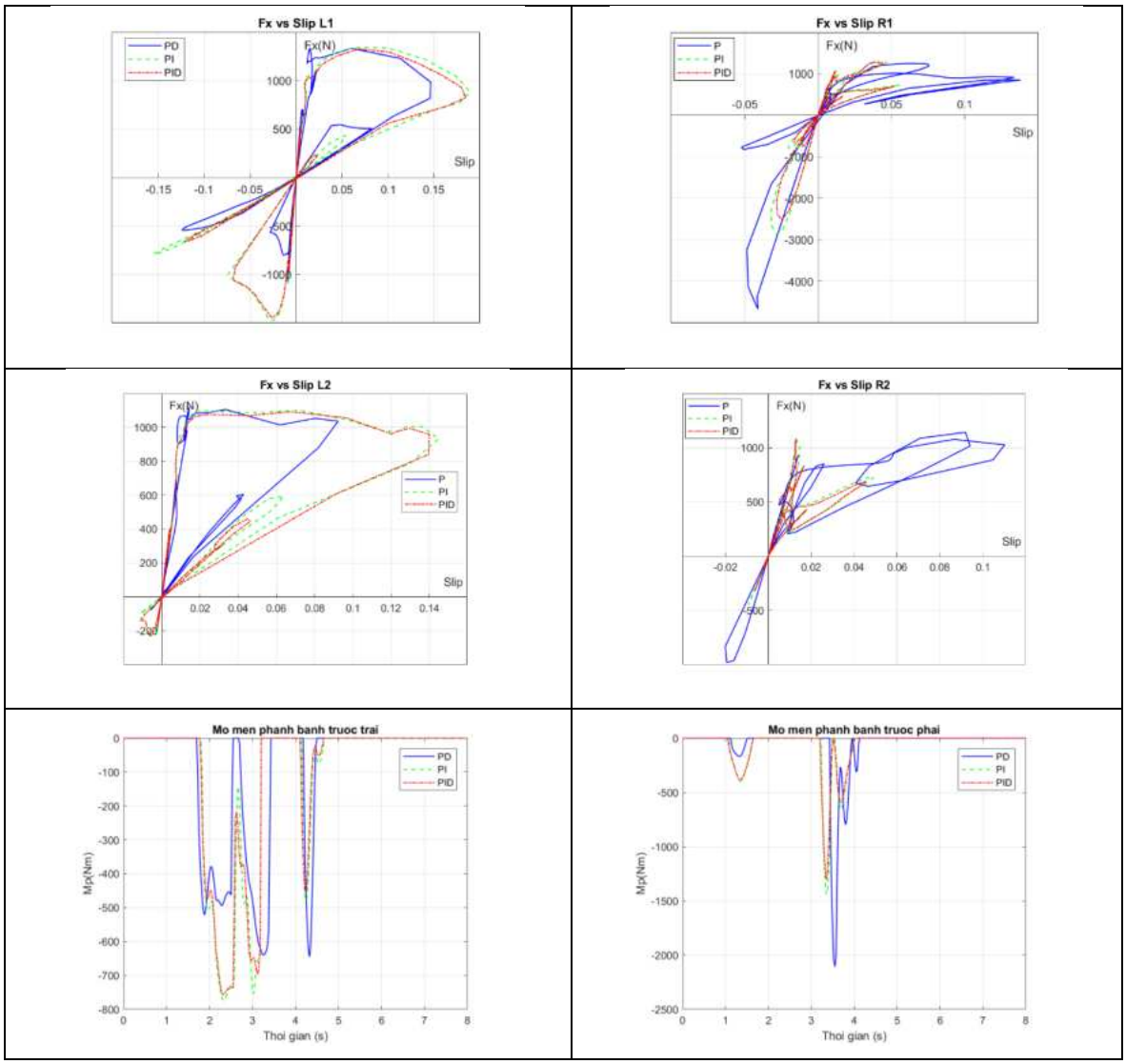
Hình 5. Quỹ đạo chuyển động của ô tô

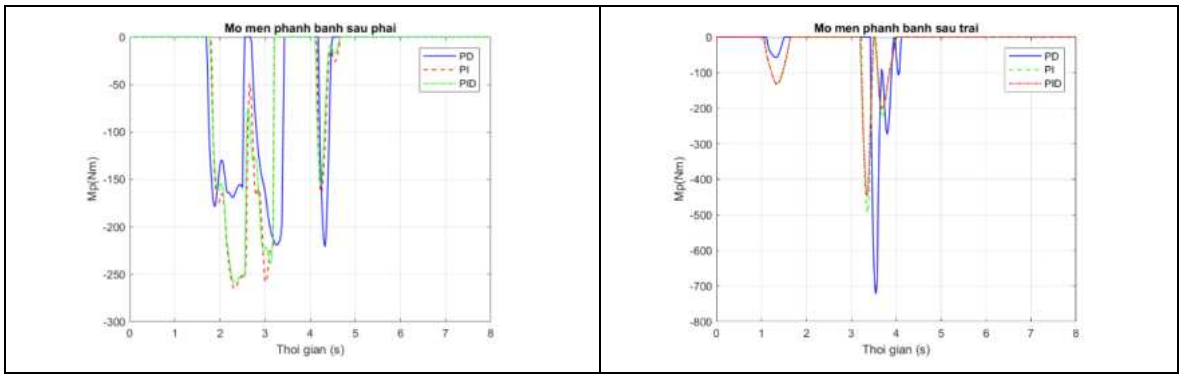
Hình 5 thể hiện quỹ đạo của trọng tâm ô tô trong chế độ chuyển làn kép khi sử dụng bộ điều khiển PD, PI và PID. Trường hợp sử dụng bộ điều khiển PD, quỹ đạo của trọng tâm ô tô bị lệch khỏi qũy đạo mong muốn nhiều hơn so với khi sử dụng bộ điều khiển PI và PID.



Hình 6. Sai lệch góc quay thân xe và gia tốc ngang của ô tô

Hình 6 thể hiện sai số tốc độ góc quay thân xe (e) và gia tốc ngang của ô tô. Các đồ thị cho thấy sự khác biệt khi sử dụng các bộ điều khiển khác nhau. Ta thấy rằng, sai số tốc độ góc quay thân xe càng nhỏ và gia tốc ngang của xe về giá trị 0 nhanh hơn thì quỹ đạo của ô tô càng gần với quỹ đạo mong muốn của người lái.





Hình 7. Phản lực tiếp tuyến Fx theo độ trượt và mô men phanh trên các bánh xe

Hình 7 thể hiện độ trượt và mô men phanh trên các bánh xe. Khi sử dụng các bộ điều khiển khác nhau, hệ thống ESC sẽ điều chỉnh lực phanh dẫn đến thay đổi độ trượt ở các bánh xe.

Bảng 2. So sánh giá trị của các thông số khảo sát

Thông số		**PD controler**	**PI controler**	**PID controler**
Quỹ đạo (RRMSE)		0.2324	0.2394	0.1322
Gia tốc ngang lớn nhất a_{ymax}		0.75488	0.79716	0.79748
Sai lệch tốc độ góc quay thân xe (RMS)		0.058075	0.043849	0.043729
Độ trượt L1	RMS	0.031018	0.033699	0.032459
	max	0.14646	0.18912	0.18456
Độ trượt R1	RMS	0.028213	0.013892	0.013177
	max	0.13777	0.055703	0.051966
Độ trượt L2	RMS	0.013002	0.021285	0.020979
	max	0.092288	0.14496	0.13997
Độ trượt R2	RMS	0.018025	0.010315	0.0097084
	max	0.11012	0.04912	0.045584

Để so sánh rõ hơn hiệu quả của các bộ điều khiển, tác giả đã thống kê giá trị sai lệch tương đối bình phương trung bình của quỹ đạo (RRMSE), giá trị bình phương trung bình (RMS) và giá trị lớn nhất của các thông số khảo sát như trong bảng 2. Chúng ta thấy rằng các giá trị về gia tốc ngang và độ trượt các bánh xe vẫn nằm trong giới hạn cho phép. So với bộ điều khiển PD và PI, sử dụng bộ điều khiển PID sẽ làm giảm sai số tốc độ góc quay thân xe và quỹ đạo sẽ gần hơn với quỹ đạo mong muốn của người lái. Tuy nhiên, bộ điều khiển PI và PID sẽ làm tăng gia tốc ngang của xe. Như vậy, có thể thấy rằng, khi đưa hệ số tích phân I và hệ số vi phân D vào bộ điều khiển P có thể cải thiện được quỹ đạo chuyển động của xe.

5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả tập trung vào xây dựng mô hình động lực học của ô tô và sử dụng bộ điều khiển PID với các biến thể PD, PI cho hệ thống cân bằng điện tử ESC. Kết quả mô phỏng cho thấy sử dụng bộ điều khiển PID sẽ làm giảm sai lệch quỹ đạo của xe so với quỹ đạo mong muốn của người lái. Ngoài ra, kết quả mô phỏng còn thể hiện được vai trò của các hệ số P, I và D đến quỹ đạo chuyển động của xe. Lựa chọn giá trị P, I, D hợp lý thì hệ thống cân bằng điện tử ESC để điều chỉnh hệ thống phanh thích hợp để đảm bảo quỹ đạo và ổn định chuyển động của xe.

Hướng nghiên cứu tiếp theo là sử dụng các thuật toán điều khiển điều khiển khác như LQR (Linear Quadratic Regulator), MPC (model predictive control), Fuzzy Logic cho hệ thống cân bằng điện tử ESC. Từ đó, làm cơ sở để kết hợp các thuật toán điều khiển với nhau nhằm nâng cao độ ổn định và chính xác của hệ thống.

Tài liệu tham khảo

1. Jianhua Guo, Liang Chu, Xiaobing Zhang, Feikun Zhou. (2010). *The Integrated Control of Semiactive Suspension and Electronic Stability Program Based on Fuzzy Logic Method*. Applied Mechanics and Materials, Vol 29, No. 32, pp 2059-2064.
2. Georg Rill. (2005). *Vehicle Dynamics*. Lecture Notes, Fachhochsule Regenburg, University Applied Sciences.
3. William K. Lennon and Kevin M. Passino. (1999). *Intelligent Control for Brake Systems*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.7, No.2.
4. Carl Knospe. (2006). *PID Control*. IEEE Control Systems Magazine.
5. Liang Chu, Xinzhao Gao, Jianhua Guo, Hongwei Liu, Libo Chao, Mingli Shang. (2012). *Coordinated Control of Electronic Stability Program and Active Front Steering*. Procedia Environmental Sciences, Vol 12, pp. 1379-1386.
6. Zheng Wu, Cunfeng Kang, Borun Li, Jiageng Ruan, Xueke Zheng, S. (2024). *Dynamic Modeling*, Simulation, and Optimization of Vehicle Electronic Stability Program Algorithm Based on Back Propagation Neural Network and PID Algorithm.
7. Rajesh Rajamani. (2000). *Vehicle Dynamics and Control*. Springer.
8. Đào Huy Hải. (2023). *Nghiên cứu điều khiển quỹ đạo chuyển động của ô tô bằng hệ thống phanh*. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, Đại học Giao thông Vận tải.

Investigation of the effects of pid controller parameters on the vehicle trajectory in the electronic stability control (esc) system

Abstract: *The Electronic Stability Control (ESC) system commonly uses control algorithms such as PID (Proportional-Integral-Derivative), LQR (Linear Quadratic Regulator), MPC (Model Predictive Control), etc., to optimize the system's response. This paper presents a method for modeling the ESC system with a PID controller and the vehicle's dynamic motion model. The survey results are obtained through numerical simulation using CarSim and Matlab/Simulink to evaluate and compare the effects of PD, PI, and PID controllers on the ESC system, particularly on the vehicle's trajectory and overall stability. Based on this analysis, a suitable controller can be selected.*

Keywords: Vehicle Dynamics Model; Vehicle Oscillations; Electronic Stability Control System; ESC; PID.

❑

Khảo sát sự lão hóa của dầu bôi trơn dựa trên tiêu chuẩn ISO 4406

Lại Việt Anh[1], Trần Văn Nam[2], Vũ Mạnh Dũng[1],
Lê Văn Trung[1], Nguyễn Mạnh Hùng[1]
[1]Bộ môn Xe Ô tô, Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự
[2]Lớp Ô tô quân sự 4, Đại đội 457A, Tiểu đoàn 4, Học viện Kỹ thuật quân sự
Email: anhlv2796@lqdtu.edu.vn ; Tel: 0977.973.896

Tóm tắt:

Bài báo khảo sát sự lão hóa của dầu bôi trơn động cơ theo thời gian sử dụng, cụ thể là nghiên cứu chỉ tiêu về độ sạch của dầu, được đánh giá qua hiện tượng nhiễm bẩn bởi các tạp chất. Nghiên cứu tập trung vào việc đo mật độ hạt có kích thước khác nhau trong dầu, sử dụng thiết bị đo quang học dựa trên tiêu chuẩn ISO 4406. Mục tiêu là đánh giá mức độ nhiễm bẩn và mài mòn của động cơ thông qua phân tích dầu. Thí nghiệm được thực hiện trên mẫu dầu 10w40, với các mẫu dầu được lấy định kì để theo dõi sự thay đổi chất lượng. Kết quả về sự thay đổi mật độ hạt trong dầu liên quan đến quá trình mài mòn của động cơ. Từ đó, có thể sử dụng thông số về độ sạch của dầu để chẩn đoán tình trạng động cơ và dự đoán các hư hỏng xảy ra, thời điểm bảo dưỡng và sửa chữa theo điều kiện khai thác thực tế.

Từ khóa: *Dầu bôi trơn động cơ; thông số đánh giá chất lượng dầu bôi trơn; tạp chất; tiêu chuẩn độ sạch, quá trình mài mòn.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay với sự đa dạng của các phương pháp giám sát và chẩn đoán động cơ [1] cần có một hệ thống các phương pháp và công cụ tổng hợp để đánh giá và quản lý tình trạng của hệ thống bôi trơn cũng như các cụm chi tiết liên quan của động cơ trong quá trình khai thác. Trong khuôn khổ công nghệ hiện đại, các phương pháp bảo trì dự báo, phát hiện sớm các hư hỏng đang phát triển thông qua phân tích các thông số của hệ thống bôi trơn, đặc biệt là dầu bôi trơn.

Dầu, khi lưu thông trong động cơ, là một nguồn thông tin về cường độ mài mòn và mức độ hao mòn của các chi tiết trong động cơ. Mối quan hệ tương quan chặt chẽ giữa tốc độ mài mòn, sự tích tụ hạt trong dầu và sự thay đổi các tính chất vật lý - hóa học của dầu khẳng định sự cần thiết phải phát triển các phương pháp chẩn đoán tình trạng kỹ thuật của các chi tiết trong hệ thống bôi trơn động cơ.

Trong quá trình vận hành động cơ, dưới ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác nhau, dầu mất đi các đặc tính ban dầu của nó: tính chất lý hóa của dầu thay đổi, các hạt bẩn tích tụ trong dầu. Những thay đổi này xảy ra dưới sự ảnh hưởng của nhiệt độ, áp suất và các yếu tố khác [2].

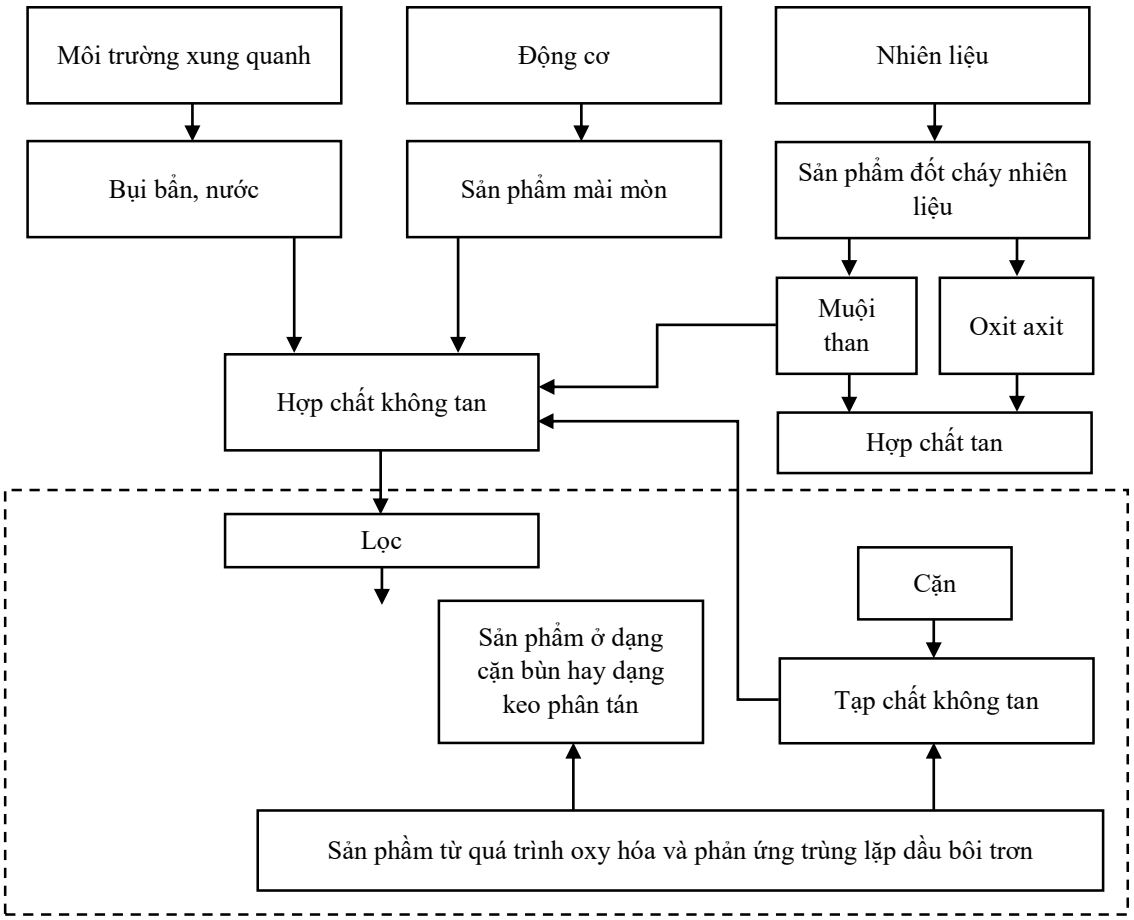
Bài báo tập trung vào việc áp dụng phương pháp thực nghiệm để khảo sát sự thay đổi mật độ hạt theo từng dải kích thước có trong dầu bôi trơn để đánh giá sự suy giảm chất lượng của dầu [8]. Điều kiện khảo sát là khai thác ở miền Bắc Việt Nam.

2. Phương pháp/Thực nghiệm

2.1. Chẩn đoán động cơ thông qua dầu bôi trơn

Định nghĩa chung về sự lão hóa của dầu bao gồm tất cả các thay đổi về cấu tạo hay tính chất của dầu chưa tính đến xem là chất lượng của dầu trong thực tế đã bị ảnh hưởng hay chưa. Thuật ngữ này bao gồm cả sự nhiễm bẩn của dầu. Sự nhiễm bẩn của dầu bôi trơn được hiểu là

sự tích tụ trong dầu những tạp chất không mong muốn, làm giảm những đặc tính khai thác của dầu. Theo nghiên cứu, các tạp chất này có nhiều nguồn gốc khác nhau [3 - 7].



Hình 1. Sơ đồ sự nhiễm bẩn của dầu bôi trơn khi động cơ làm việc

- Sản phẩm oxy hóa: Theo thành phần của dầu bôi trơn động cơ, sản phẩm đầu tiên trong chuỗi phản ứng oxy hóa hydrocarbon là peroxyt. Peroxyt là liên kết hydrocarbon kém bền, thường chuyển thành axit hoặc hydroxit axit.

- Sản phẩm từ quá trình đốt cháy nhiên liệu không hoàn toàn: hình thành các hạt muội than không tan. Quá trình đốt cháy nhiên liệu phụ thuộc vào loại nhiên liệu động cơ sử dụng, quá trình hình thành hỗn hợp nhiên liệu.

- Sản phẩm mài mòn và sự phân hủy phụ gia: Một nguồn ô nhiễm dầu không thể tránh khỏi là các sản phẩm mài mòn của các chi tiết trong động cơ (Fe, Al, Cu, Cr, Pb, ...). Các sản phẩm mài mòn kim loại một phần hòa tan trong dầu, tạo thành các hợp chất dạng xà phòng, một phần khác tồn tại dưới dạng hạt keo không tan.

- Bụi bẩn từ môi trường: các hạt rắn đi vào cùng với không khí nạp. Khi bộ lọc không khí hoạt động không hiệu quả, nguồn ô nhiễm này có thể dẫn đến sự nhiễm bẩn dầu đáng kể.

Có thể thấy rằng, đối với dầu đã qua sử dụng, sự xuất hiện các tạp chất như muội than, hạt kim loại, sản phẩm oxy hóa là điều không thể tránh khỏi trong mọi điều kiện vận hành của động cơ. Đồng thời, sự xâm nhập của bụi, nước, nhiên liệu vào dầu của được coi là hiện tượng ngẫu nhiên, chỉ xảy ra trong những điều kiện khai thác nhất định.

Từ góc độ giám sát và chẩn đoán động cơ, việc phân chia các sản phẩm gây lão hóa dầu thành chất không tan và chất hòa tan quan trọng hơn. Việc phân chia như vậy có thể không mang tính tuyệt đối, vì dầu đã qua sử dụng là một dạng chất lỏng dạng keo, trong đó các thành phần có mức độ phân tán khác nhau.

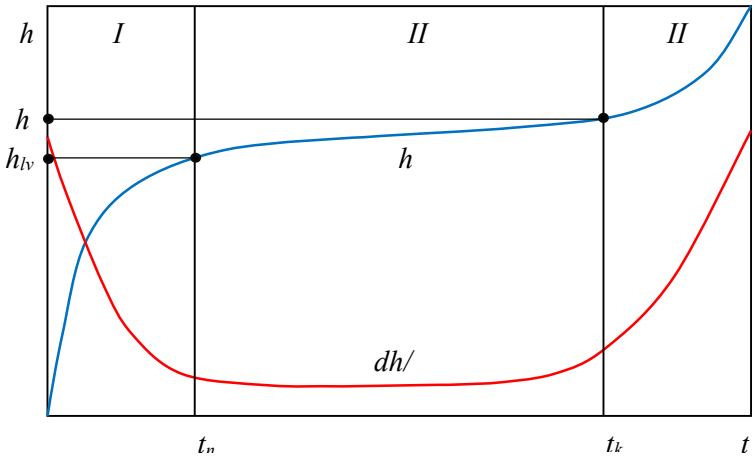
Bảng 1. Phân loại những nguồn chính gây nên sự nhiễm bẩn của dầu

Nguồn gốc gây nhiễm bẩn dầu	**Đặc điểm của sự nhiễm bẩn**	
	Loại	**Thành phần hóa học**
Động cơ	Sản phẩm mài mòn	Fe, Al, Cu, Pb, Cr, ...
Nhiên liệu	Nhiên liệu và sản phẩm của quá trình cháy không hoàn toàn	Bồ hóng (muội than), oxit lưu huỳnh, nước, nhiên liệu
Dầu	Sản phẩm của quá trình oxy hóa dầu và phản ứng trùng hợp	Oxit axit, nhựa, asphaltene, carben và carboid, monome, polime của axit oxycarbonic, ...
	Sản phẩm của quá trình tương tác và phân hủy phụ gia	Ba, Ca, Zn, muối của chúng và các hợp chất hữu cơ kim loại
Môi trường	Bụi bẩn, cát, nước	AlO3, SiO2, và các alumosilicat có thành phần khác nhau, nước

Hãy xem xét quá trình nhiễm bẩn vật liệu bôi trơn như một quá trình Markov rời rạc liên tục theo thời gian. Coi quá trình nhiễm bẩn dầu bôi trơn như một quá trình khuếch tán, điều này phản ánh, theo các nghiên cứu thực nghiệm, bản chất thực tế của quá trình xâm nhập của tạp chất vào dầu, được biểu hiện ở tính liên tục của nó. Tuy nhiên, từ quan điểm chẩn đoán kỹ thuật, để đơn giản hóa việc mô tả trạng thái kỹ thuật của hệ thống bôi trơn và dự báo sự thay đổi của nó trong tương lai, thuận tiện hơn khi sử dụng các trạng thái rời rạc, phản ánh tình trạng chất lỏng làm việc theo mức độ nhiễm bẩn của dầu bôi trơn và được biểu thị bằng các giá trị giới hạn cho phép của mật độ hạt trong dầu. Giả định này được phản ánh trong các tiêu chuẩn hiện hành về độ sạch của chất lỏng làm việc, được xác định theo cấp độ sạch [8].

Nghiên cứu tập trung vào xác định độ sạch của dầu, hay sự gia tăng các thành phần không tan trong dầu theo tiêu chuẩn ISO 4406 - 2021, đánh giá mật độ hạt có kích thước $\geq 4, \geq 6, \geq 14$μm, ở kích thước này, thành phần hạt chủ yếu là sản phẩm mài mòn, là thông tin quan trọng phản ánh về cường độ mài mòn của các chi tiết trong động cơ [9]. Cần lưu ý rằng quá trình mài mòn là một quá trình phức tạp, nhiều cấp độ. Yếu tố khởi phát chính của quá trình mài mòn là sự biến dạng của vật liệu trên bề mặt tiếp xúc dưới tác động của ứng suất tiếp xúc và sự thay đổi của nhiệt độ. Hậu quả của quá trình này là sự tích lũy các khuyết tật cấu trúc trong lớp bề mặt, làm thay đổi kết cấu vật liệu theo hướng trượt, xảy ra các phản ứng hóa học giữa vật liệu ma sát vào sâu bên trong hoặc ngược lại, và sự trao đổi vật chất giữa các bề mặt tiếp xúc, ... Các khái niệm, thuật ngữ và định nghĩa cơ bản trong lĩnh vực mài mòn được quy định trong [10]. Cụ thể, theo [10], kết quả của quá trình mài mòn được định nghĩa là sự mòn.

Đặc điểm điển hình của quá trình mài mòn theo thời gian được thể hiện ở hình 2.



Hình 2. Sự phụ thuộc độ mài mòn h và tốc độ mài mòn dh/dt vào thời gian làm việc

Phần đầu của đường cong này mô tả giai đoạn chạy rà khi $t < t_n$, tốc độ mài mòn lớn. Sau đó, ở giai đoạn II, sự mài mòn diễn ra với tốc độ ổn định $t = (t_n, t_k)$. Giai đoạn này thường được gọi là giai đoạn mài mòn ổn định. Khi $t > t_k$, tốc độ mài mòn tăng mạnh, dẫn đến mài mòn khốc liệt, thường khiến các cặp chi tiết ma sát bị hư hỏng hoàn toàn. Trong giai đoạn chạy rà, các đặc tính vận hành của cặp chi tiết ma sát được hình thành.

Độ nhám hình thành sau khi kết thúc quá trình chạy rà được gọi là độ nhám tối ưu. Độ nhám này có liên quan đến độ nhám ban đầu, nhưng các thông số của nó chủ yếu được xác định bởi các đặc tính cơ lý của vật liệu chi tiết và vật liệu bôi trơn, cũng như chế độ làm việc của cặp chi tiết ma sát (tải trọng, tốc độ, nhiệt độ, ...). Khi đưa các chi tiết vào vận hành sau khi chế tạo hoặc sửa chữa lớn, tài liệu kỹ thuật quy định rõ ràng chế độ chạy rà hoặc chạy thử để quá trình này diễn ra trong thời gian ngắn nhất có thể và tạo điều kiện thuận lợi cho việc khai thác lâu dài. Ngoài ra, giới hạn độ mòn tối đa cho phép (h_{gh}) cũng được quy định, xác định tuổi thọ của cả cặp chi tiết ma sát hoặc các chi tiết thay thế, chẳng hạn như bạc lót cổ trục, vòng bi,... [11].

Do đó, có thể nói rằng thông số về độ sạch của dầu có thể được sử dụng để chẩn đoán tình trạng kỹ thuật thông qua sự thay đổi cường độ tích tụ tạp chất trong hệ thống, điều này có thể giúp quan sát được diễn biến của quá trình mài mòn cũng như dự đoán được thời điểm bắt đầu giai đoạn mài mòn giới hạn mà xe cần sửa chữa mà không cần tháo rời động cơ. Bài báo tập trung vào thực hiện thí nghiệm đo mật độ hạt của mẫu dầu bôi trơn, sử dụng phương pháp chặn ánh sáng.

2.2. Phương pháp thí nghiệm

a. Đối tượng thí nghiệm:

Tiến hành khảo sát mẫu dầu chuyên dụng Yamaha Genuine Oil 10w40 trên động cơ Yamaha Blue Core của Yamaha.



Hình 3. Động cơ Yamaha Blue Core 125 cm^3

Dầu bôi trơn được sử dụng là loại dầu bán tổng hợp (Semi-Synthetic), được pha chế cho các dòng xe sử dụng công nghệ Blue Core, động cơ xe máy 4 thì dung tích nhỏ đến trung bình.



Hình 4. Dầu Yamalube10w40 (Yamaha Genuine Oil 10w40)

- Loại dầu: Dầu khoáng (mineral oil), được pha chế từ dầu gốc khoáng chất lượng cao.

Trong suốt quá trình thí nghiệm, xe được tiến hành bảo dưỡng và sửa chữa định kì theo khuyến cáo của nhà sản xuất. Mẫu dầu được đo theo khuyến cáo của nhà sản xuất cần thay trong khoảng 1200-1500km.

b. Thiết bị, dụng cụ thí nghiệm:

Thiết bị thí nghiệm được thể hiện trên Hình 1 gồm thiết bị và phụ kiện chính:

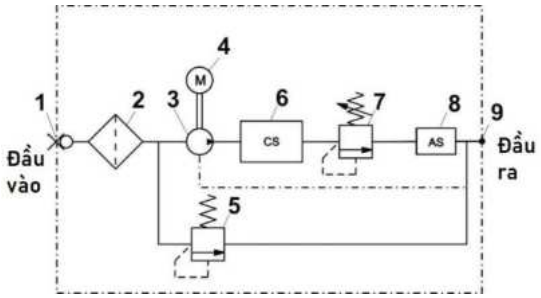


Hình 5. Thiết bị thí nghiệm FCU1310-4-U-AS-1

1. Thiết bị FCU1310-4-U-AS-1; 2. Bộ nguồn, sơ cấp: (90 – 240)V AC > thứ cấp: 24V DC/5A; 3. Ống hồi dầu; 4. Ống hút dầu; 5. Máy đo nhiệt độ EXTECH; 6. USB lưu dữ liệu; 7. Bình chia độ

Thiết bị thực hiện các phép đo ngắn hạn về mức độ nhiễm bẩn hạt rắn, nhiệt độ và % độ bão hòa nước trong dầu với kết quả hiển thị trên màn hình theo các tiêu chuẩn ISO 4406:1987; NAS 1638; ISO 4406:1999; SAE AS 4059.

Phương pháp này có ưu điểm là kiểm soát ô nhiễm tốt, dễ tự động hóa, tuy nhiên dễ bị ảnh hưởng bởi chất lỏng lạ, bọt khí nhỏ hay muội than dẫn đến khúc xạ [12].



Hình 6. Sơ đồ khối thiết bị kiểm tra chất lượng dầu bôi trơn FCU1310-4-U-AS-1

1. Đầu vào; 2. Bộ lọc hút; 3. Bơm bánh răng; 4. Động cơ; 5. Van giảm áp; 6. Cảm biến ô nhiễm quang học; 7. Van cân bằng đối trọng; 8. Modul Aqua sensor; 9. Đầu ra

2.3. Quy trình thực nghiệm

a. Một số điểm cần chú ý trong khi thực hiện thí nghiệm

- Bổ sung dầu sạch: Sau mỗi lần lấy mẫu, dầu trong động cơ sẽ giảm và cần được bổ sung dầu để đảm bảo mức dầu tiêu chuẩn. Việc bổ sung dầu sạch có thể làm thay đổi tính chất mẫu dầu (ví dụ: giảm mật độ hạt hoặc thay đổi độ nhớt). Do đó, cần ghi chú chi tiết lượng dầu bổ sung vào báo cáo phân tích.

b. Thực hiện thí nghiệm

- Lịch trình lấy mẫu:

+ 300km đầu tiên: lấy mẫu sau mỗi khoảng 100km: Tần suất dày để đánh giá sự thay đổi nhanh chóng của dầu mới trong giai đoạn đầu vận hành.

+ Sau đó, lấy mẫu tại các mốc khoảng 600km và 1200km: đánh giá hiệu suất dầu trong các giai đoạn gần thời điểm thay dầu.

+ Thể tích mẫu dầu: Mỗi lần lấy khoảng 500ml, đảm bảo đủ để đo và phân tích.

- Yêu cầu trước khi lấy mẫu:

+ Chạy động cơ trước khi lấy mẫu: Khởi động động cơ và để chạy không tải 10 - 15 phút để đảm bảo dầu đạt nhiệt độ vận hành tiêu chuẩn và lưu thông đều trong hệ thống.

+ Khi lấy dầu ra khỏi động cơ: Dầu ra khỏi động cơ thường ở nhiệt độ 60 - 80˚C. Đảm bảo nhiệt độ của mẫu dầu trước khi đưa vào máy ở trong khoảng 30 - 35˚C.

- Sau khi tiến hành đo bằng thiết bị, dầu đã qua sử dụng được đổ trở lại động cơ, do có sự tiêu hao một lượng dầu nhỏ, nên sau mỗi lần đo thực hiện bổ sung 50ml dầu.

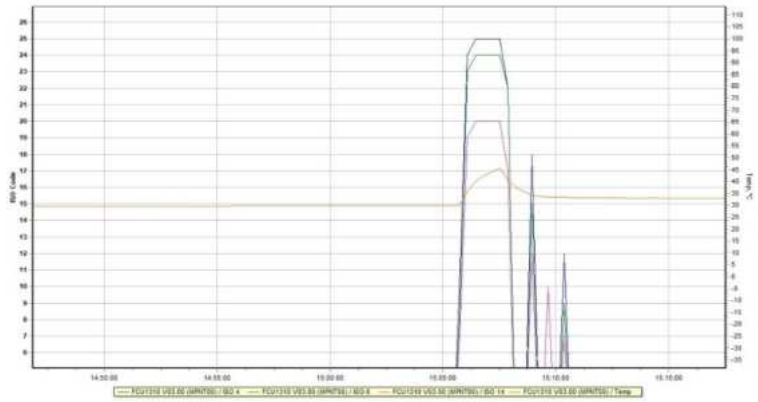
Tiến trình lấy mẫu được thể hiện ở bảng 2.

Bảng 2. Quy trình lấy mẫu thí nghiệm

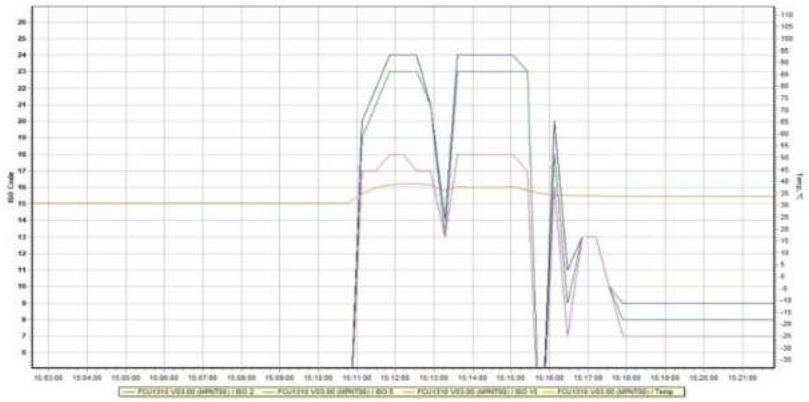
Lần	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Thời gian	21/8/2024	29/8/2024	05/9/2024	16/10/2024	5/12/2024
Công tơ mét (km)	5705	5812	5907	6502	7110
Ghi chú	Bổ sung 50ml	Bổ sung 50ml	Bổ sung 50ml	Bổ sung 50ml	

3. Thu thập và xử lý kết quả thực nghiệm

Kết quả thể hiện độ sạch của dầu theo tiêu chuẩn ISO 4406 được thể hiện ở hình dưới đây (hình 7, 8, 9, 10, 11).



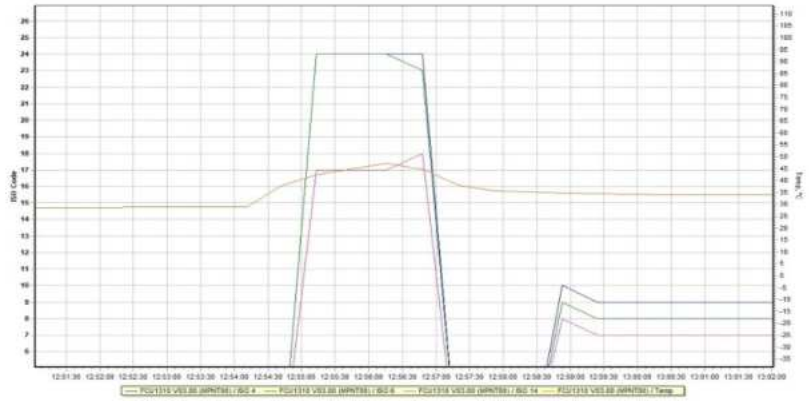
Hình 7. Kết quả lần đo 1 (ngày 21/8/2024, số công tơ mét: 5705km)



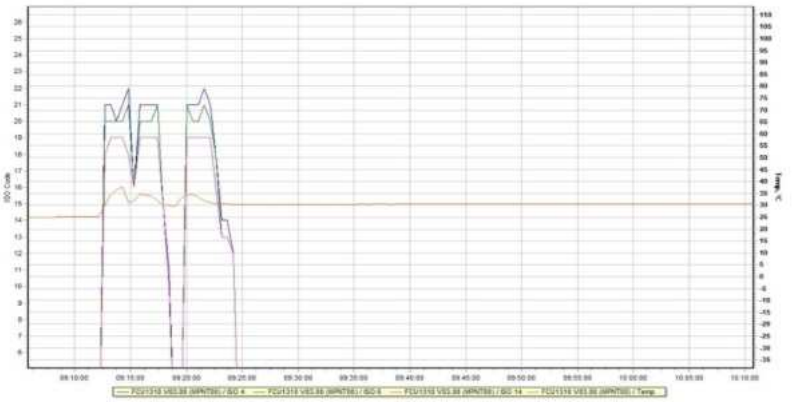
Hình 8. Kết quả lần đo 2 (ngày 29/8/2024, số công tơ mét: 5812km)



Hình 9. Kết quả lần đo 3 (ngày 05/9/2024, số công tơ mét: 5907km)



Hình 10. Kết quả lần đo 4 (ngày 16/10/2024, số công tơ mét: 6502km)



Hình 11. Kết quả lần đo 5 (ngày 5/12/2024, số công tơ mét: 7110km)

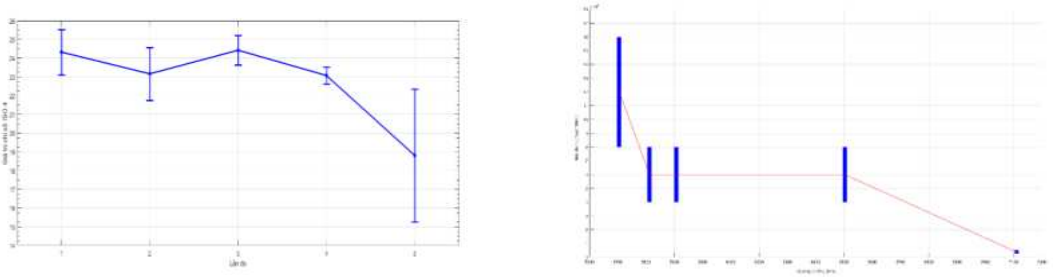
- Ở lần đo thứ 1, 2, 3 chưa quan sát được sự suy giảm đáng kể về chất lượng dầu. Do đó ở lần thứ 4, 5 đã tiến hành đo ở thời điểm xe đã đi được khoảng 600 và 1200km so với công tơ mét của xe ở lần đo thứ 3.

- Mỗi lần lấy mẫu, ta quan sát được sự sai khác về kết quả đo. Điều này là do dầu không hoàn toàn đồng nhất dẫn đến sự khác nhau về mật độ phân bố hạt trong dầu.

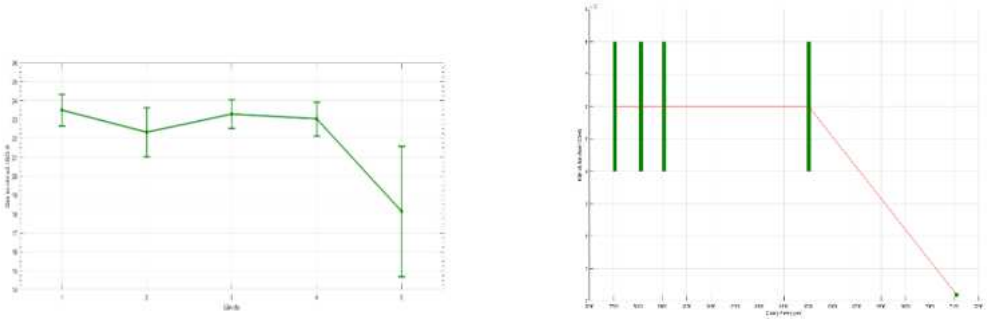
Giá trị về mật độ hạt theo tiêu chuẩn ISO 4406 được thể hiện ở Bảng 2. Từ kết quả thí nghiệm ta xây dựng được biểu đồ thể hiện sự phụ thuộc mật độ hạt theo quãng đường xe chạy (hình 12, 13, 14). Theo đó quan sát được, mật độ hạt có kích thước tương ứng theo tiêu chuẩn ISO 4406:2021 là: ≥ 4, ≥ 6, ≥ 14µm trên quãng đường khảo sát 1200 km có xu hướng ổn định và giảm.

Bảng 2. Giá trị chỉ số ISO 4/6/14 theo quãng đường

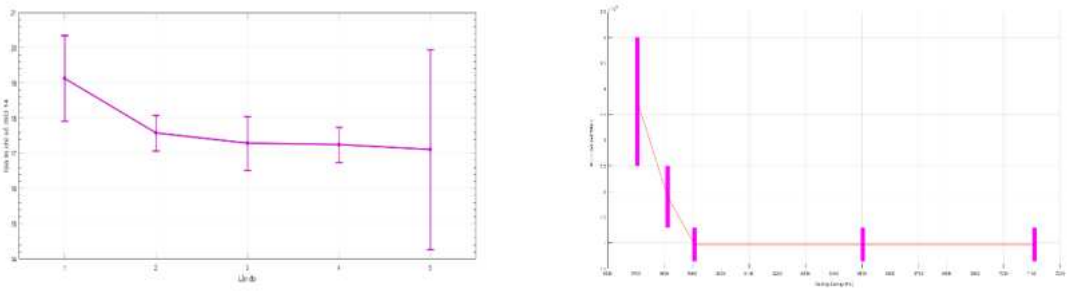
Lần đo	Giá trị trung bình			Độ lệch chuẩn		
	ISO 4	ISO 6	ISO 14	ISO 4	ISO 6	ISO 14
1 (5705 km)	24,33	23,54	19,13	0,84	1,22	1,21
2 (5812 km)	23,17	23,33	17,58	1,3	0,51	1,41
3 (5907 km)	23,43	23,29	17,29	0,76	0,76	0,79
4 (6502 km)	23,08	23,04	17,25	0,89	0,5	0,45
5 (7110 km)	18,81	18,14	17,11	3,45	2,84	3,54



Hình 12. Biểu đồ thể hiện sự thay đổi mật độ hạt có kích thước ≥ 4 µm trong 100ml dầu (theo giá trị chỉ số ISO 4) theo quãng đường



Hình 14. Biểu đồ thể hiện sự thay đổi mật độ hạt có kích thước ≥ 6 µm trong 100ml dầu (theo giá trị chỉ số ISO 6) theo quãng đường



Hình 16. Biểu đồ thể hiện sự thay đổi mật độ hạt có kích thước ≥ 14 µm trong 100ml (theo giá trị chỉ số ISO 14) theo quãng đường

Cần lưu ý rằng, tại thời điểm khảo sát, xe đã chạy được trên 5700km, theo đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc độ mài mòn h và tốc độ mài mòn *dh/dt* vào thời gian làm việc (hình 2), thời điểm này đang là giai đoạn mài mòn ổn định của động cơ, tốc độ mài mòn thấp và ổn định.

Với kết quả thực nghiệm, quan sát được chất lượng của dầu bôi trơn động cơ có độ sạch thấp, trong dầu mới chưa qua sử dụng có nhiều tạp chất từ nhiều nguồn gốc khác nhau (hình 1): thành phần của các hạt tạp chất không tan bao gồm cả các chất hữu cơ và vô cơ. Phần hữu cơ chủ yếu gồm các hợp chất carben, carboid, nhựa, axit oxy, và asphaltene. Phần vô cơ (hay phần khoáng/tro) bao gồm sắt, đồng, chì và các sản phẩm mài mòn khác, cũng như các hợp chất của nhôm, silic, và kim loại có trong thành phần phụ gia. Các tạp chất không tan trong dầu có nguồn gốc khác nhau không nên được xem xét như những hạt riêng lẻ không liên quan đến nhau, chẳng hạn như sắt, bồ hóng, và các sản phẩm ô nhiễm khác. Các hạt kim loại sinh ra từ quá trình mài mòn động cơ, các hạt bồ hóng và bụi xâm nhập vào dầu thường bị bao bọc bởi các sản phẩm oxy hóa dạng nhựa của dầu và cũng có thể hấp thụ các phân tử phụ gia trên bề mặt của chúng. Điều này được chứng minh bởi thực tế rằng các bộ lọc từ tính không chỉ giữ lại các tạp chất kim loại có tính sắt từ mà còn thu giữ các hợp chất nhựa hữu cơ liên kết với các hạt kim loại.

Hiện tượng giảm số lượng hạt có thể phản ánh các hiện tượng liên quan đến sự lão hóa dầu và điều kiện vận hành của động cơ. Lão hóa dầu làm giảm lượng hạt do sự phân hủy của phụ gia, cặn trong dầu, do hiệu quả của bộ phận lọc dầu.

Kích thước của các hạt tạp chất hình thành trong quá trình vận hành của động cơ không giữ nguyên mà thay đổi theo thời gian, do các hạt trong dầu có xu hướng kết tụ thành các hạt lớn, thường được giữ lại ở bộ phận lọc, hoặc lắng đọng trên bề mặt các chi tiết hoặc tạo thành cặn trong các te, làm bẩn động cơ.

Quan sát biểu hiện của sự thay đổi mật độ hạt, ta nhận thấy quá trình này có thể mô hình hóa bằng một hàm phi tuyến:

$$C(d) = C_0 e^{-kd} + M_0 d$$

Trong đó:

C_0 – Mật độ hạt ban đầu (hạt/100ml);

e^{-kd} – Thành phần giảm do lọc dầu, với k là tốc độ lọc(;

$M_0 d$ – Thành phần tăng dầu do quá trình mài mòn động cơ.

4. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu của bài báo, có thể rút ra một số kết luận như sau:

Sử dụng thiết bị FCU 1310 với phương pháp do dựa trên nguyên lý quang học tán xạ ánh sáng, phân loại độ sạch của dầu dựa trên các tiêu chuẩn ISO 4406, NAS 1638, SAE AS4059 khảo sát mức độ thay đổi mật độ hạt không tan trong dầu ở kích thước ≥ 4, ≥ 6, ≥ 14µm. Từ kết quả thực nghiệm có thể xây dựng được mô hình xác định sự thay đổi mật độ hạt theo quãng đường. Điều này có ý nghĩa trong dự báo thời điểm thay dầu bôi trơn theo mức độ nhiễm bẩn của dầu. Ngoài ra còn giám sát được tình trạng kỹ thuật của động cơ, thời điểm xuất hiện hư hỏng bất thường nhờ hiện tượng tăng đột ngột mật độ hạt, trong đó chủ yếu là hạt có kích thước lớn (≥ 14µm). Phương pháp này khi tiến hành đồng thời với các phương pháp phân tích khác như phân tích thành phần hạt và hình dạng hạt mài cung cấp thông tin chính xác và toàn diện về tình trạng kỹ thuật của động cơ.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Khắc Trai. (2003). *Kỹ thuật chẩn đoán ô tô.* Hà Nội, NXB Giao thông vận tải.

2. Vũ Quốc Bảo. (2018). *Giáo trình nhiên vật liệu sử dụng trên ô tô.* Hà Nội, HVKTQS.

3. CMAC. (2011). *Used engine oil analysis - user interpretation guide.*

4. А.В. Бажинов. (2009). *Программно-аппаратный комплекс оценки остаточного ресурса двигателя внутреннего сгорания.* УДК 621.113.5.

5. https://learnoilanalysis.com/lube-oil-test-analysis-lab-lubrication-reliability-maintenance/guide-to interpreting-and-diagnosing-engine-oil-reports/

6. Задорожная Е.А., Оводов П.В. (2015). *Диагностирование узлов трения тепловых двигателей по результатам анализа смазочного материала*. Вестник Оренбургского государственного университета 2015 № 4 (179). УДК 53.08; 532.5: 532.

7. Е.А. Коняев, К.И. Грядунов. (2015). *Методика сбора частиц изнашивания для диагностирования деталей и узлов авиационных двигателей*. Научный Вестник МГТУ ГА.

8. TIÊU CHUẨN QUỐC GIA TCVN 10510:2014 ISO 24254:2007. *Chất bôi trơn, dầu công nghiệp và các sản phẩm liên quan (loại L) – họ E (dầu động cơ đốt trong) – yêu cầu kỹ thuật đối với dầu sử dụng trong động cơ xăng môtô bốn kỳ và hệ thống truyền động kèm theo (phẩm cấp EMA và EMB).*

9. International Standard ISO 4406:2021.

10. TIÊU CHUẨN QUỐC GIA TCVN 5414 : 1991. *Ma sát và mài mòn trong máy – thuật ngữ cơ bản và định nghĩa.*

11. Nguyễn Hoàng Nam. (2006). *Giáo trình Cơ sở khai thác xe quân sự.* Hà Nội, HVKTQS.

12. HYDAC FCU 1310 FluidControl Unit, Operating and maintenance instructions.

Investigation of Lubricant Degradation

Abstract: *The paper investigates the degradation of engine lubricant properties over time, specifically the cleanliness of the oil, which is assessed through contamination by impurities. The study focuses on measuring particle density at various sizes in the oil using an optical particle counter based on ISO 4406 standards. The objective is to evaluate the level of contamination and engine wear through oil analysis. The experiment was conducted on 10W40 oil samples, which were periodically collected to monitor quality changes. The results indicate that variations in particle density within the oil correlate with engine wear processes. Consequently, oil cleanliness parameters can be utilized for engine condition diagnosis and for predicting maintenance intervals.*

Keywords: engine lubricant; lubricant quality parameters; contaminants; cleanliness standard; wear process.

❑

Đề xuất bộ điều khiển chuyển số trong hộp số tự động trên ô tô khi lực cản thay đổi đảm bảo tính năng tăng tốc của ô tô

Nguyễn Viết Anh[1], Nguyễn Văn Trà[1]
[1]*Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự*
[*]Email: vietanh16051998@gmail.com Tel: 0363268757

Tóm tắt

Hộp số tự động đang được sử dụng rộng rãi trên ô tô, trong đó kiểu hộp số sử dụng bánh răng hành tinh với các cấp số truyền cố định được sử dụng phổ biến. Quá trình điều khiển hộp số tự động là một quá trình phức tạp, đòi hỏi một thuật toán điều khiển phù hợp với các chế độ vận hành. Bài báo đề xuất một thuật toán điều khiển chuyển số dựa trên sự thay đổi của lực cản, độ mở bướm ga và vận tốc dài của ô tô, đồng thời xây dựng mô hình bộ điều khiển chuyển số bằng phần mềm Matlab - Stateflow. Thực hiện mô phỏng hệ thống trên mô hình ô tô sử dụng hộp số tự động có bốn cấp số để đánh giá thuật toán điều khiển và mô hình bộ điều khiển chuyển số.

***Từ khóa*:** *Hộp số tự động; Điều khiển chuyển số; Lực cản.*

1. Đặt vấn đề

Trong thiết kế và vận hành ô tô, tính năng tăng tốc đóng vai trò quan trọng, không chỉ đảm bảo khả năng vận hành linh hoạt mà còn đáp ứng các yêu cầu an toàn và tiết kiệm năng lượng. Tuy nhiên, hệ số cản của xe, bao gồm các yếu tố như địa hình, môi trường và tải trọng thường xuyên biến đổi trong điều kiện thực tế, gây ảnh hưởng lớn đến hiệu quả hoạt động của hệ thống truyền lực, đặc biệt là hộp số cơ khí.

Các hộp số cơ khí truyền thống, mặc dù có ưu điểm về độ bền và chi phí, lại gặp hạn chế trong việc thích ứng với sự thay đổi của hệ số cản. Việc duy trì tính năng tăng tốc trong các điều kiện thay đổi đòi hỏi phải có một cơ sở dữ liệu điều khiển chính xác, giúp hộp số tự động điều chỉnh tỷ số truyền để tối ưu hóa hiệu suất vận hành.

Hộp số tự động trên ô tô được trang bị một bộ điều khiển riêng, vận hành theo thuật toán phức tạp dựa trên nhiều thông số đầu vào khác nhau. Tuy nhiên, do các nhà sản xuất không công bố chi tiết thuật toán này, việc nghiên cứu và tiếp cận công nghệ điều khiển hộp số tự động gặp nhiều khó khăn. Trong phạm vi nghiên cứu, bài báo đề xuất một thuật toán điều khiển chuyển số cho hộp số tự động có cấp (sử dụng các cặp bánh răng hành tinh), dựa trên tín hiệu độ mở bướm ga, sự thay đổi lực cản và vận tốc xe.

Nghiên cứu sử dụng mô hình bộ điều khiển chuyển số trong hộp số tự động, được xây dựng bằng phần mềm Matlab – Stateflow theo thuật toán điều khiển đã đề xuất. Sau đó, mô hình này được tích hợp và kế thừa từ các mô hình mô phỏng khác như động cơ đốt trong, hộp số, biến mô và hệ thống ô tô trên Matlab nhằm tạo thành hệ thống hoàn chỉnh. Cuối cùng, tiến hành mô phỏng hoạt động của toàn hệ thống để đánh giá hiệu quả thuật toán điều khiển cũng như mô hình bộ điều khiển hộp số tự động.

2. Cơ sở lý thuyết

Để xây dựng được thuật toán điều khiển chuyển số khi hệ số cản thay đổi, trước hết ta tiến hành xây dựng mối quan hệ giữa mô men cản và mô men kéo tại các bánh xe.

Để đảm bảo cho quá trình hoạt động của ô tô thì mô men kéo phải thỏa mãn điều kiện sau:

$$M_C \leq M_K \leq M_\varphi \quad (1)$$

Ta có mô men kéo tại bánh xe:

$$M_K = M_d . i_{tl} . \eta_{tl} \quad (2)$$

Mô men cản tại bánh xe:

$$M_C = r_b . (P_\Psi + P_w) \quad (3)$$

Trong đó:

M_C là mô men cản tại bánh xe [Nm];

M_K là mô men kéo tại bánh xe [Nm];

M_φ là mô men bám của bánh xe với mặt đường [Nm];

M_d là mô men động cơ [Nm];

i_{tl} là tỉ số truyền lực của hệ thống truyền lực [-];

η_{tl} là hiệu suất truyền lực của hệ thống truyền lực [-];

r_b là bán kính bánh xe [m];

P_Ψ là lực cản tổng cộng của đường [N];

P_w là lực cản không khí [N];

Từ phương trình (1), (2) và (3) ta có $M_C \leq M_K$, hay:

$$M_d . i_{tl} . \eta_{tl} \geq r_b . (P_\Psi + P_w)$$

$$i_{tl} \geq \frac{r_b . (P_\Psi + P_w)}{M_d . \eta_{tl}} \quad (4)$$

Đây là tỉ số truyền cần thiết để khắc phục được lực cản và giúp xe tăng tốc, nghĩa là khi tỉ số truyền cần thiết nhỏ hơn tỉ số truyền tiếp theo trong hộp số thì ở số truyền này lực kéo ở bánh xe sẽ đảm bảo khắc phục được lực cản và giúp xe tăng tốc. Và ngược lại khi lực cản tăng lên làm cho tỉ số truyền cần thiết lớn hơn tỉ số truyền hiện tại của hộp số làm cho lực kéo không đủ để khắc phục lực cản nên xe phải xuống số thấp hơn để tăng lực kéo.

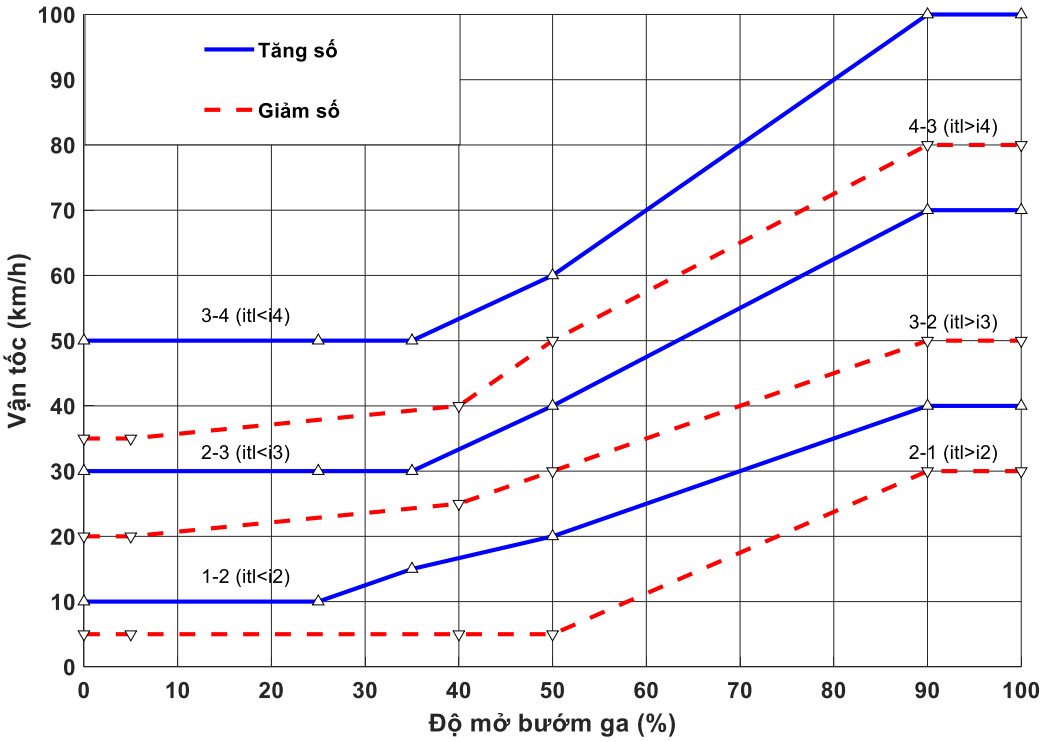
Trong quá trình xe hoạt động trên đường, hệ số cản lăn thay đổi tùy thuộc vào điều kiện của đường làm cho mô men cản cũng thay đổi theo, điều này làm cho tỉ số truyền tại đó không còn đáp ứng được điều kiện hiện tại. Vì thế tỷ số truyền cũng phải thay đổi theo, ta có thể tăng số hoặc giảm số, điều này phụ thuộc vào việc mô men cản tác dụng lên xe tăng lên hay giảm xuống, đảm bảo cho xe vẫn có khả năng tăng tốc tốt.

Biểu đồ các điểm sang số được thể hiện như trên hình 1. Thời điểm chuyển số phụ thuộc vào mức độ mở bướm ga, tỉ số truyền cần thiết và vận tốc của ô tô. Khi tăng tốc, nếu mức độ mở bướm ga càng lớn thì thời điểm chuyển số càng muộn (vận tốc của ô tô càng cao). Ví dụ, thời điểm chuyển từ số 1 lên số 2 được thực hiện ở các điểm:

Nếu độ mở bướm ga ở mức 25% thì sẽ chuyển từ số 1 lên số 2 khi ô tô đạt vận tốc 10 km/h; Nếu độ mở bướm ga ở mức 50% thì sẽ chuyển từ số 1 lên số 2 khi ô tô đạt vận tốc 20 km/h; Nếu độ mở bướm ga ở mức 90% thì sẽ chuyển từ số 1 lên số 2 khi ô tô đạt vận tốc 40 km/h;

Thời điểm chuyển số từ số 2 về số 1 được thực hiện tại các điểm: Nếu độ mở bướm ga ở mức 90% thì sẽ chuyển từ số 2 về số 1 khi ô tô giảm vận tốc xuống dưới mức 30 km/h; Nếu độ mở bướm ga ở mức 50% thì sẽ chuyển từ số 2 về số 1 khi ô tô giảm vận tốc xuống dưới mức 5 km/h; Trường

hợp mức độ mở bướm ga khác các giá trị trên thì thời điểm chuyển số được nội suy theo bản đồ chuyển số như trên hình 1. Thời điểm chuyển từ số 2 lên số 3, số 3 lên số 4 và ngược lại được thực hiện theo quy luật tương tự, được thể hiện trên giản đồ chuyển số.



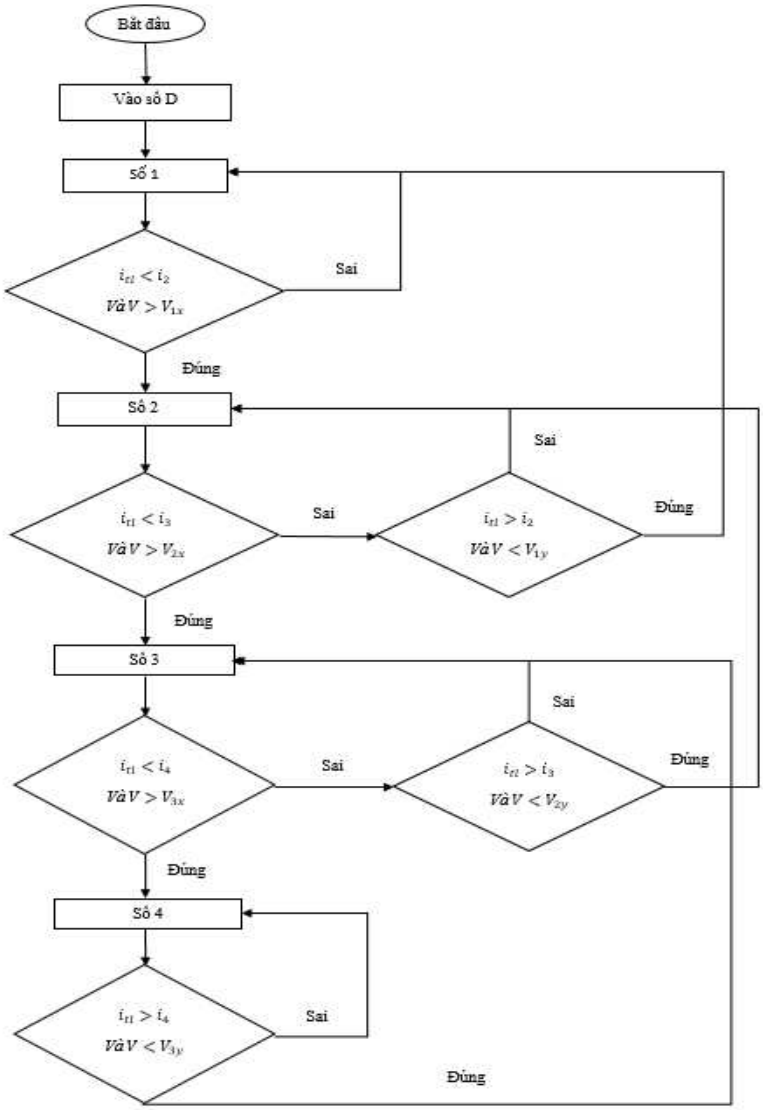
Hình 1. Giản đồ sang số theo điều kiện vận tốc, độ mở bướm ga và tỉ số truyền

- Đề xuất thuật toán điều khiển chuyển số

Giả thiết trường hợp chuyển số khi hộp số được đặt ở chế độ chuyển số tự động (số D - Drive). Thuật toán chuyển số được xây dựng dựa trên hộp số tự động có bốn cấp số, sử dụng tín hiệu giá trị i_{tl}, độ mở bướm ga và vận tốc của ô tô (V) để quyết định thời điểm chuyển số.

Thuật toán điều khiển tăng số được xây dựng theo phương pháp so sánh điều kiện đúng hoặc sai của ba thông số là trị số i_{tl}, độ mở bướm ga và vận tốc của ô tô (V) với các ngưỡng đã được tính toán. Khi hệ thống bắt đầu hoạt động sẽ căn cứ vào độ mở bướm ga để thực hiện quá trình điều khiển chuyển số. Trong trường hợp độ mở bướm ga lớn hơn a%, hệ thống sẽ tiếp tục căn cứ vào trị số i_{tl} và vận tốc dài của ô tô (V) để thực hiện quá trình này. Vận tốc của ô tô tăng dần, đến thời điểm vận tốc lớn hơn mức V_{1x} và tỉ số truyền tại số 2 lớn hơn trị số i_{tl} thì hộp số sẽ chuyển từ số 1 lên số 2, sau một thời gian nếu vận tốc lớn hơn mức V_{2x} và tỉ số truyền tại số 3 lớn hơn trị số i_{tl} thì hộp số sẽ chuyển từ số 2 lên số 3, khi vận tốc vượt mức V_{3x} và tỉ số truyền tại số 4 lớn hơn trị số i_{tl} thì hộp số sẽ chuyển từ số 3 lên số 4 và giữ ở số này.

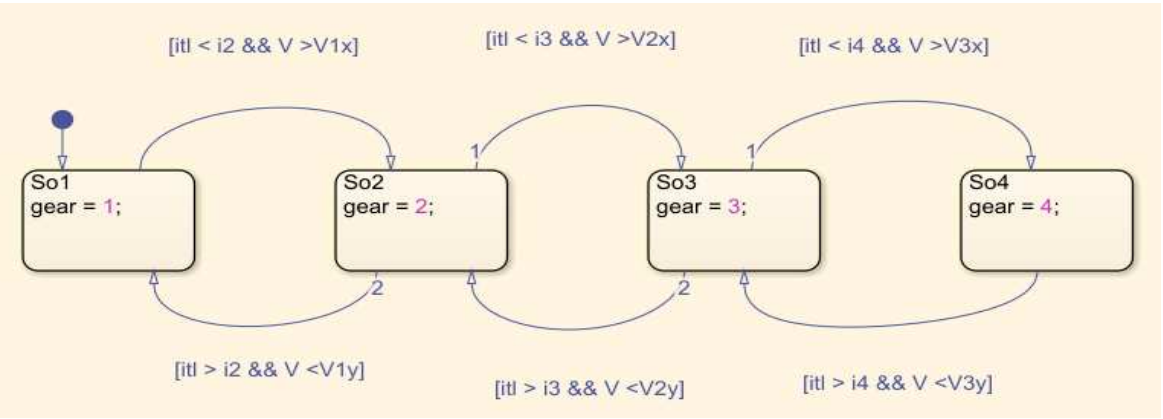
Thuật toán điều khiển giảm số được xây dựng theo phương pháp so sánh điều kiện đúng hoặc sai của ba thông số là trị số i_{tl}, độ mở bướm ga và vận tốc của ô tô (V) với các ngưỡng đã được tính toán. Khi hệ thống bắt đầu hoạt động sẽ căn cứ vào độ mở bướm ga để thực hiện quá trình điều khiển chuyển số. Trong trường hợp độ mở bướm ga nhỏ hơn x%, hệ thống sẽ tiếp tục căn cứ vào trị số i_{tl} và vận tốc dài của ô tô (V) để thực hiện quá trình này. Vận tốc của ô tô giảm dần, đến thời điểm vận tốc nhỏ hơn mức V_{3y} hoặc tỉ số truyền tại số 4 nhỏ hơn trị số i_{tl} thì hộp số sẽ chuyển từ số 4 xuống số 3, sau một thời gian nếu vận tốc nhỏ hơn mức V_{2y} hoặc tỉ số truyền tại số 3 nhỏ hơn trị số i_{tl} thì hộp số sẽ chuyển từ số 3 xuống số 2, khi vận tốc nhỏ hơn mức V_{1y} hoặc tỉ số truyền tại số 2 nhỏ hơn trị số i_{tl} thì hộp số sẽ chuyển từ số 2 lên số 1 và giữ ở số này.



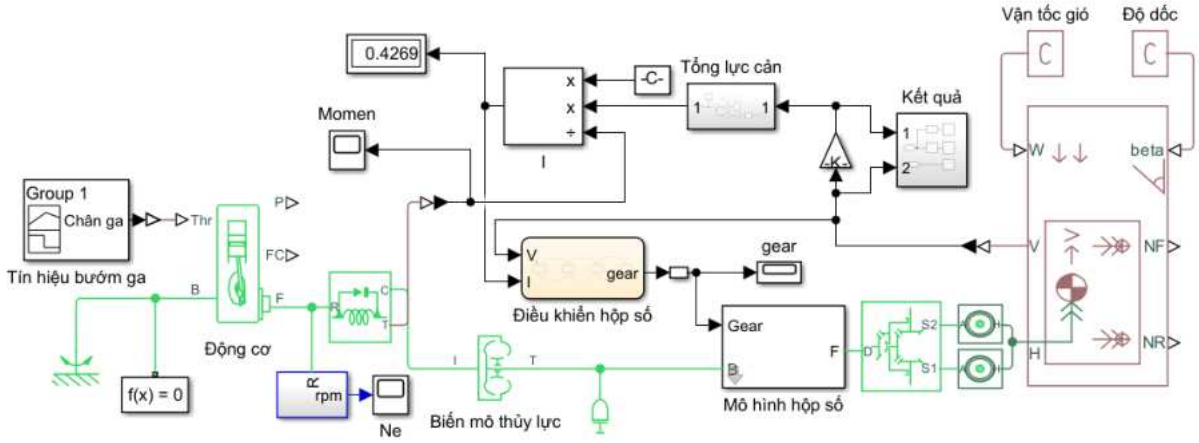
Hình 2. Thuật toán điều khiển chuyển số

- Đề xuất bộ điều khiển chuyển số

Mô hình bộ điều khiển chuyển số được xây dựng trong môi trường Stateflow của Matlab-Simulink dựa trên mô phỏng hộp số có bốn cấp số tiến.



Hình 3. Mô phỏng bộ điều khiển chuyển số bằng Matlab - Stateflow



Hình 4. Mô phỏng toàn bộ hệ thống

Bảng 1. Thông số của xe dùng để khảo sát

TT	Thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Kích thước tổng thể		
	Chiều dài	4540	mm
	Chiều rộng	1760	mm
	Chiều cao	1465	mm
2	Chiều dài cơ sở	2600	mm
3	Bán kính bánh xe	317	mm
4	Khối lượng toàn bộ khi đầy tải	1700	kg
5	Công suất cực đại	103/6400	kW/(vòng/phút)
6	Mô men xoắn cực đại	173/4000	Nm/(vòng/phút)
7	Tỉ số truyền hộp số		
	Số 1	2.847	[-]
	Số 2	1.552	[-]
	Số 3	1.000	[-]
	Số 4	0.700	[-]
	Số lùi	2.343	[-]
8	Tỉ số truyền cầu xe	4.237	[-]

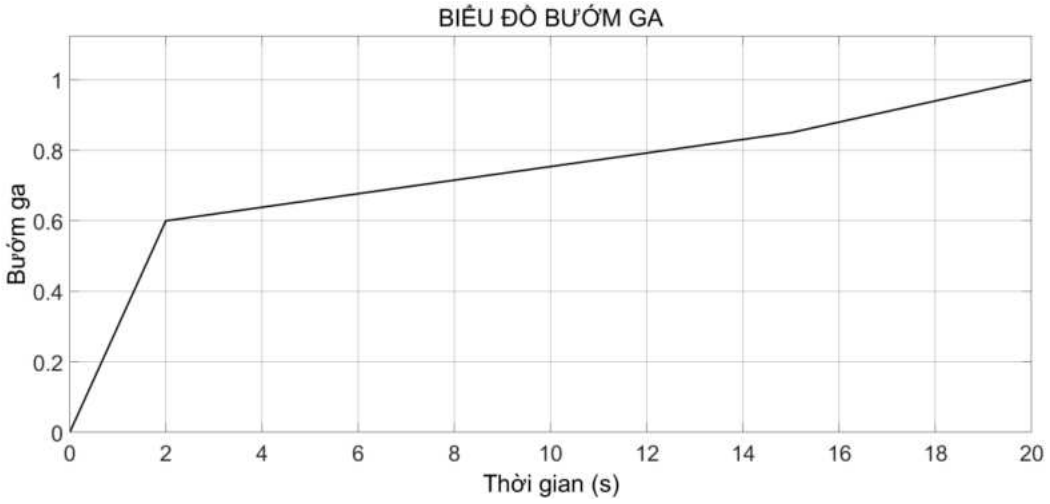
3. Kết quả và nhận xét

Trong khuôn khổ của bài báo, để khảo sát tính năng tăng tốc của ô tô khi lực cản thay đổi, trong quá trình tiến hành xây dựng bộ điều khiển chuyển số, tôi tiến hành khảo sát với các trường hợp lực cản khác nhau ở một chế độ của độ mở bướm ga là như nhau.

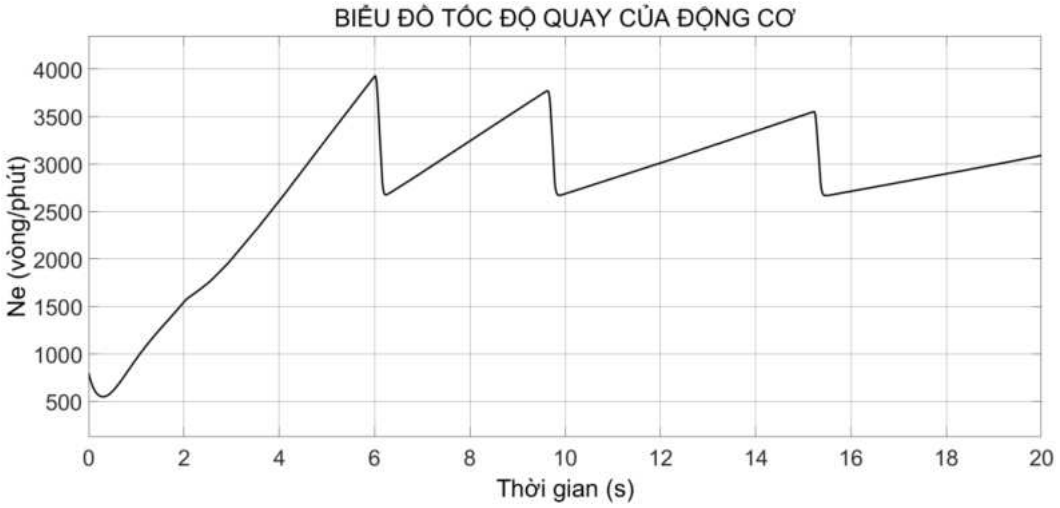
Thực hiện mô phỏng với tín hiệu hệ số cản lăn được giả lập bằng tín hiệu từ khối "signal builder" trong Matlab, vận tốc của ô tô tại thời điểm bắt đầu mô phỏng (t = 0 giây) bằng 0 km/h, thời gian tiến hành khảo sát là 20 giây.

3.1. Kết quả mô phỏng khi lực cản thấp

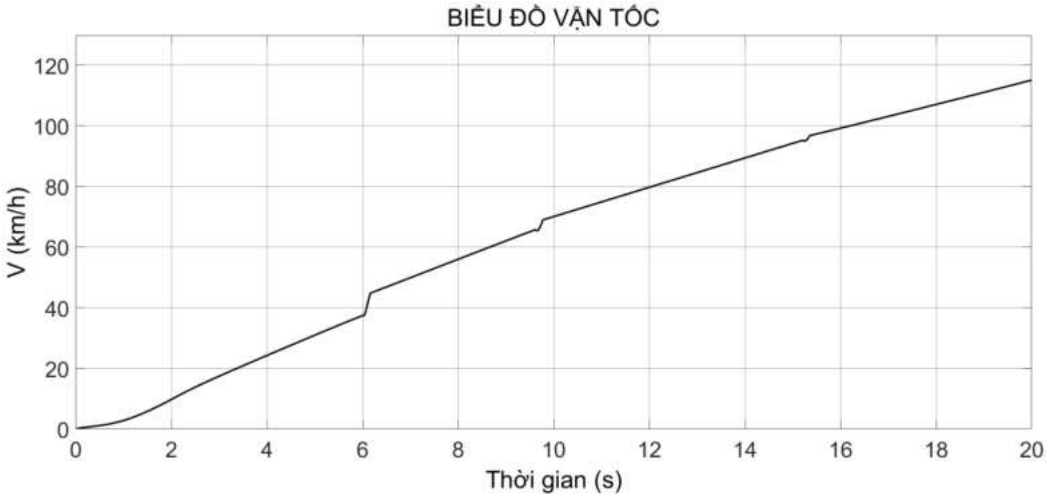
Đường khảo sát là đường khô, bằng phẳng, không có vật cản, có hệ số cản lăn $f = 0{,}015$ và độ dốc $\alpha = 0$.



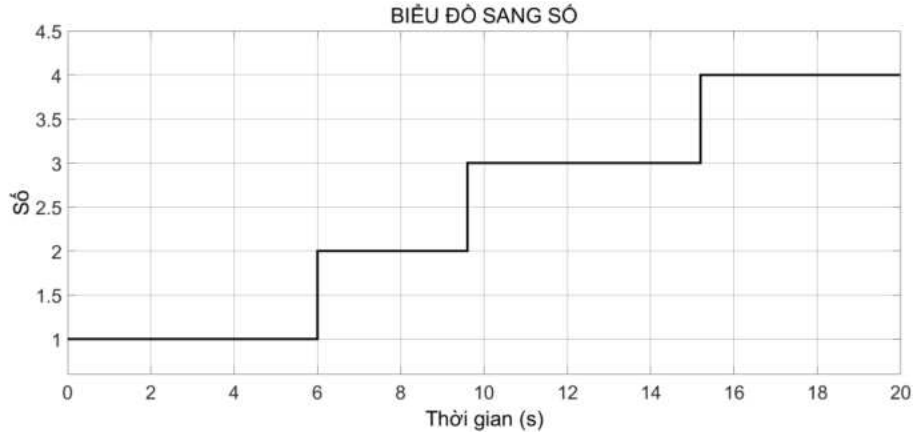
Hình 5. Biểu đồ độ mở bướm ga



Hình 6. Biểu đồ tốc độ quay của động cơ



Hình 7. Biểu đồ vận tốc

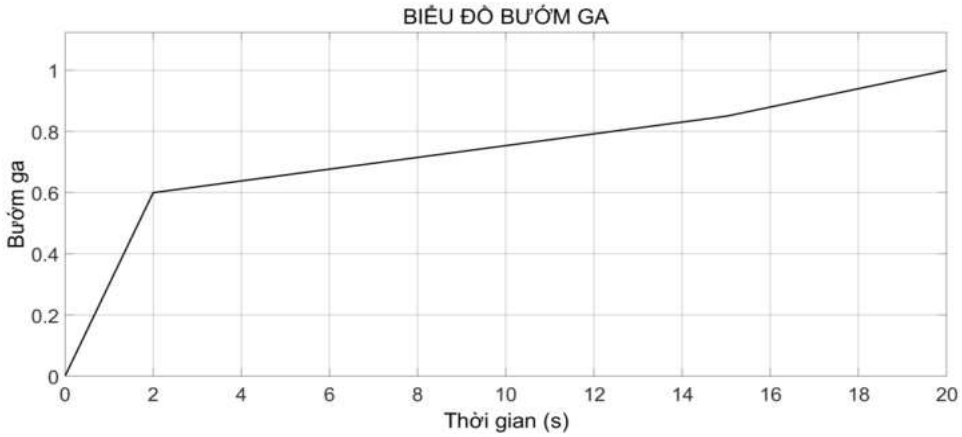


Hình 8. Biểu đồ sang số

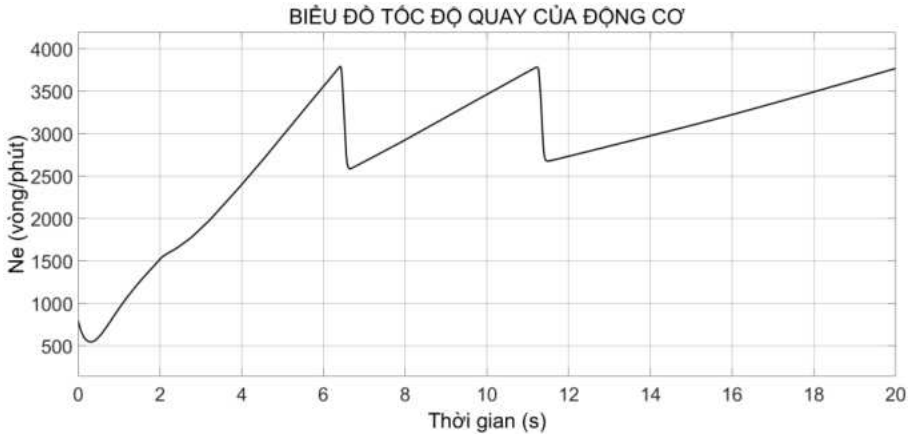
Kết quả mô phỏng cho thấy, sau khoảng 6 giây, vận tốc của ô tô đạt đến ngưỡng 37 km/h, bộ điều khiển thực hiện chuyển số từ số 1 lên số 2. Hộp số duy trì ở số 2 đến thời điểm khoảng giây thứ 9,6. Khi đó vận tốc của ô tô đạt đến ngưỡng 65 km/h, bộ điều khiển thực hiện chuyển số từ số 2 lên số 3. Hộp số duy trì ở số 3 đến thời điểm 15,2 giây. Khi đó vận tốc của ô tô đạt đến ngưỡng 95 km/h, bộ điều khiển thực hiện chuyển số từ số 3 lên số 4. Sau đó hộp số duy trì ở số truyền 4 đến cuối quá trình khảo sát (giây thứ 20).

3.2. Kết quả mô phỏng khi lực cản lớn

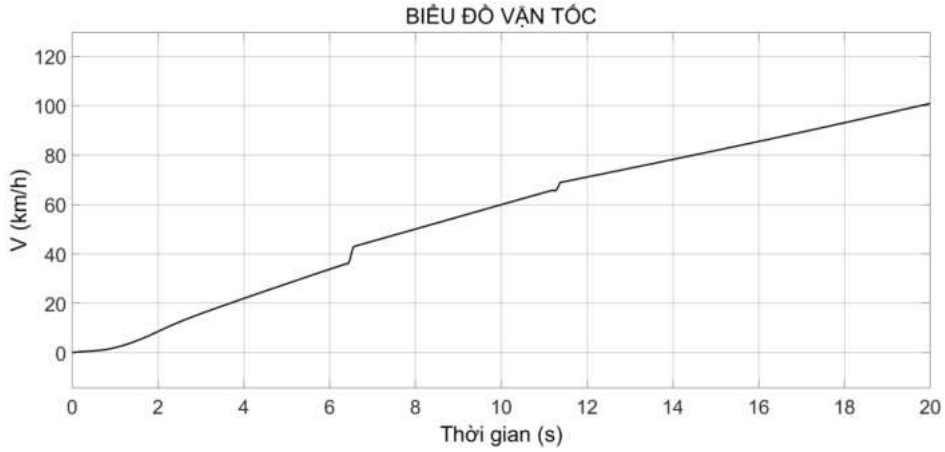
Đường khảo sát là đường không có vật cản, có hệ số cản lăn $f = 0{,}03$ và độ dốc $\alpha = 5^0$.



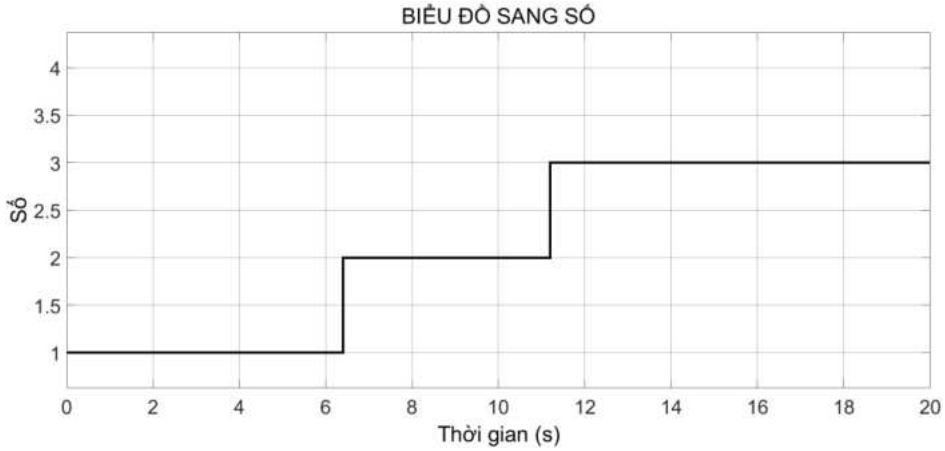
Hình 9. Biểu đồ độ mở bướm ga



Hình 10. Biểu đồ tốc độ quay của động cơ



Hình 11. Biểu đồ vận tốc



Hình 12. Biểu đồ sang số

Kết quả mô phỏng cho thấy, sau 6,5 giây, vận tốc của ô tô đạt đến ngưỡng 37 km/h, bộ điều khiển thực hiện chuyển số từ số 1 lên số 2. Hộp số duy trì ở số 2 đến thời điểm giây thứ 11,2. Khi đó vận tốc của ô tô đạt đến ngưỡng 65 km/h, bộ điều khiển thực hiện chuyển số từ số 2 lên số 3. Sau đó hộp số duy trì ở số truyền 3 đến cuối quá trình khảo sát (giây thứ 20).

4. Kết luận

Bài báo đã đề xuất được một thuật toán điều khiển chuyển số trong hộp số tự động dựa trên thông tin về độ mở bướm ga, lực cản, và vận tốc dài của ô tô. Tác giả đã xây dựng được mô hình bộ điều khiển chuyển số trong hộp số tự động bằng phần mềm Matlab – Stateflow dựa trên thuật toán điều khiển nêu trên. Đồng thời kết hợp, kế thừa các nghiên cứu về mô hình mô phỏng chuyển động của ô tô, kế thừa mô hình mô phỏng hộp số hành tinh và biến mô… để có được một hệ thống hoàn thiện nhằm nghiên cứu, khảo sát hoạt động của bộ điều khiển chuyển số. Các kết quả mô phỏng cho thấy quy luật chuyển số (tăng số và giảm số) phù hợp với hoạt động của hộp số tự động. Các kết quả nghiên cứu mới chỉ là bước đầu về thuật toán điều khiển và bộ điều khiển hộp số tự động kiểu có các cấp số cố định, tuy nhiên kết quả nghiên cứu là cơ sở để đề xuất một thuật toán điều khiển hộp số tự động có nhiều cấp số hơn.

Tài liệu tham khảo

1. Hồ Hữu Hùng. (2018). *Đề xuất bộ điều khiển chuyển số trong hộp số tự động trên ô tô.* Bài báo khoa học và công nghệ, Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.
2. Nguyễn Anh Tuấn. (2006). *Xác định thời điểm sang số tối ưu của hệ thống truyền lực thủy cơ trên xe xích quân sự*". Luận án tiến sĩ, Học viện Kỹ thuật quân sự.
3. Chu Thành Khải. (2015). *Nghiên cứu động học và động lực học hộp số tự động - Mô phỏng hoạt động của hộp số*. Luận văn thạc sỹ, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật TP Hồ Chí Minh.
4. Matlab Help, *https://www.mathworks.com/support.html?s_cid=pl_support*, truy cập ngày 15/3/2017.

Proposal for a Gear Shift Controller in an Automatic Transmission Under Variable Driving Resistance

Abstract: *Automatic gearboxes have been being used extensively in automobiles, in which planetary gearboxes with fixed gear ratios are widely used. The procedure of automatic transmission control is a complicated process that requires a control algorithm that is suitable for operating modes. The article proposes a control algorithm for gear shifting based on the degree of wide open throttle, changing driving resistance and the long-run velocity of the automobile, as well as a model of digital shifting controller by using Matlab – Stateflow software. An automobile model simulation was exected on a four-speed automatic gearbox to evaluate the control algorithm and the model of digital shift controller.*

Keywords: Automatic transmission; Gear shift control; Driving resistance.

❑

Ứng dụng phần mềm ANSYS Workbench nghiên cứu độ bền khung xe lắp tổ hợp pháo phòng không Zu-23-2 ở trạng thái bắn đơn

Chu Nguyên Chương, Nguyễn Văn Trà

Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự

* Email: chuchuong1298@gmail.com, SĐT: 0966623474

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về đánh giá độ bền của khung xe lắp tổ hợp pháo phòng không Zu-23-2 ở trạng thái bắn đơn thông qua ứng dụng phần mềm ANSYS Workbench. Phương pháp nghiên cứu dựa mô hình động lực học và mô phỏng phân tích ứng suất xuất hiện trên kết cấu dưới tác động của lực phát bắn. Nghiên cứu đã xác định được phân bố ứng suất và biến dạng trên khung tổ hợp, từ đó đánh giá độ bền và khả năng làm việc an toàn của hệ thống. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa thiết kế và kiểm chứng độ tin cậy của tổ hợp pháo phòng không trong điều kiện hoạt động thực tế.

Từ khóa: *Ansys workbench; tổ hợp pháo phòng không; phương pháp phần tử hữu hạn; độ bền kết cấu khung vỏ.*

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh chiến tranh hiện đại, các hệ thống phòng không giữ vai trò then chốt trong việc bảo vệ không phận quốc gia trước các mối đe dọa từ trên không, bao gồm máy bay, UAV và tên lửa hành trình. Với đặc thù địa hình phức tạp và yêu cầu tác chiến cơ động cao, Quân đội Nhân dân Việt Nam cần đến các tổ hợp pháo phòng không linh hoạt, đáng tin cậy và phù hợp với điều kiện thực tế.

Tổ hợp pháo phòng không Zu-23-2 được gắn trên khung gầm xe KAMAZ-43118 là một giải pháp tiêu biểu, kết hợp sự hiệu quả của pháo phòng không tầm thấp với khả năng cơ động cao trên các loại địa hình, giúp giảm thời gian triển khai trận địa, mang lại hiệu quả tác chiến vượt trội đối với các mục tiêu tầm thấp. Tuy nhiên, trong quá trình khai thác và sử dụng, các lực phát sinh từ quá trình bắn gây ra những tác động đáng kể đến độ bền và tuổi thọ của khung xe. Điều này đặt ra yêu cầu cần thiết phải phân tích và đánh giá kỹ lưỡng độ bền của hệ thống.

Khung xe có dạng kết cấu thép không gian siêu tĩnh. Việc xác định số bậc siêu tĩnh phụ thuộc vào giả thiết về liên kết khung với phần không được treo (mô hình hóa). Để giải bài toán tìm nội lực có nhiều phương pháp, trong đó phương pháp phần tử hữu hạn là một phương pháp mạnh mẽ trong phân tích cơ học và mô phỏng kết cấu, kết hợp với phần mềm ANSYS Workbench, nghiên cứu có thể đạt được độ chính xác cao.

Do đó, bài báo này tập trung vào việc ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ANSYS Workbench để phân tích độ bền kết cấu của tổ hợp pháo phòng không Zu-23-2 trên khung gầm xe KAMAZ-43118 ở trạng thái bắn đơn trên chân chống. Kết quả nghiên cứu sẽ đánh giá khả năng chịu lực và an toàn kết cấu, cung cấp thông tin hữu ích trong việc đánh giá, cải tiến và tối ưu hóa thiết kế, hướng đến tăng cường hiệu quả hoạt động và đảm bảo an toàn cho tổ hợp.

2. Xây dựng mô hình khảo sát

2.1. Giả thiết xây dựng mô hình

Tải trọng tác dụng lên khung tổ hợp bao gồm hai tải trọng là tải trọng tĩnh và tải trọng động. Việc tính tải trọng tĩnh dựa trên điều kiện chịu tải thực tế của khung tổ hợp ở trạng thái xe đứng yên, có chân chống và đầy tải (có lắp đặt pháo phòng không tầm thấp Zu-23-2). Tính tải trọng động được thực hiện với trường hợp khung xe KAMAZ-43118 chịu lực phát bắn khi lắp đặt pháo phòng không Zu-23-2.

Để đơn giản hóa quá trình khảo sát mà không làm mất đi tính xác thực của mô hình, mô hình tính toán sử dụng các giả thiết sau:

- Khung xe là một kết cấu không gian liên tục.

- Khảo sát hệ khi pháo đặt trên xe, liên kết cứng với khung xe và đứng bắn tại chỗ trên 4 chân chống, toàn bộ trọng lượng tổ hợp phân bố trên chân chống.

- Chân chống đặt trên nền cứng, phẳng hoàn toàn và không biến dạng, bỏ qua sự đàn hồi của hệ thống thủy lực.

- Tải trọng tác dụng lên khung xe bao gồm: trọng lượng xe cơ sở, trọng lượng pháo, các thiết bị đi kèm, lực phát bắn tác dụng lên pháo.

- Trọng lượng khung coi như phân bố đều trên 2 dầm dọc.

- Mối quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu khung xe là tuyến tính.

2.2. Mô hình hóa khung tổ hợp và chia lưới tính toán

❖ *Mô hình hóa khung tổ hợp*

Từ những thông số cơ bản của ô tô KAMAZ-43118 và pháo Zu-23-2 [1,4], tiến hành mô hình hóa 3D khung tổ hợp bằng phần mềm Inventor, sau đó xuất mô hình 3D để tiến hành tính toán trong phần mềm ANSYS Workbench.

Mô hình tính toán được xác định bởi các thông số:

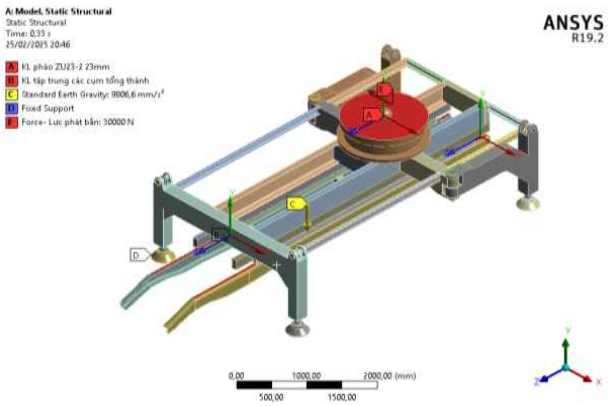
- Khối lượng pháo Zu-23-2: 965 kg (A)

- Khối lượng tập trung các cụm tổng thành: 3000 kg (B)

- Lực phát bắn tác dụng lên giá pháo: 30000 N, đặt tại tâm giá pháo (E)

- Trọng tâm tổ hợp (C)

- Vật liệu: Thép kết cấu, có modun đàn hồi 2×10^{11} N/m^2, hệ số poison 0,3, khối lượng riêng 7850 kg/m^3, ứng suất giới hạn cho phép [σ] = 250MPa.



Hình 1. Mô hình tính toán thiết lập trong phần mềm ANSYS

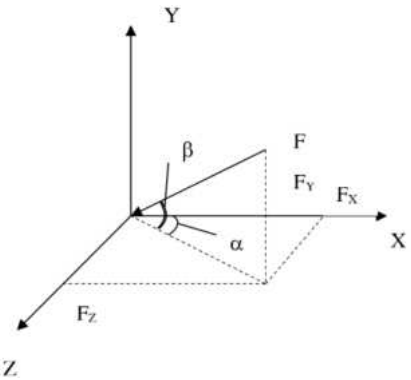
Liên kết các thành phần trong mô hình khung tổ hợp là liên kết tiếp xúc, không có sự trượt hay tách rời giữa chúng. Bốn mặt chân đế thủy lực được được cố định, không cho phép bất kỳ chuyển động nào, giữ ổn định trong quá trình phân tích.

❖ *Chia lưới tổ hợp:*

Sau khi thiết lập mô hình tính toán xong ta tiến hành chia lưới phần tử. Đối với bài toán phần tử hữu hạn, lưới phần tử được chia càng nhỏ thì bài toán càng chính xác. Tổ hợp xe - pháo được chia lưới với giá pháo và khung đỡ giá pháo được chia nhỏ ở mức 50mm, còn lại chia theo mặc định. Tổng cộng, mô hình khung tổ hợp được chia làm 73818 phần tử, 155748 nút.

2.3. Các chế độ tính toán

Gọi $\vec{F}$ là lực phát bắn tác dụng vào giá pháo. Hệ tọa độ được xác định như trên phần mềm ANSYS với gốc toạ độ xác định là trọng tâm của giá pháo (A).



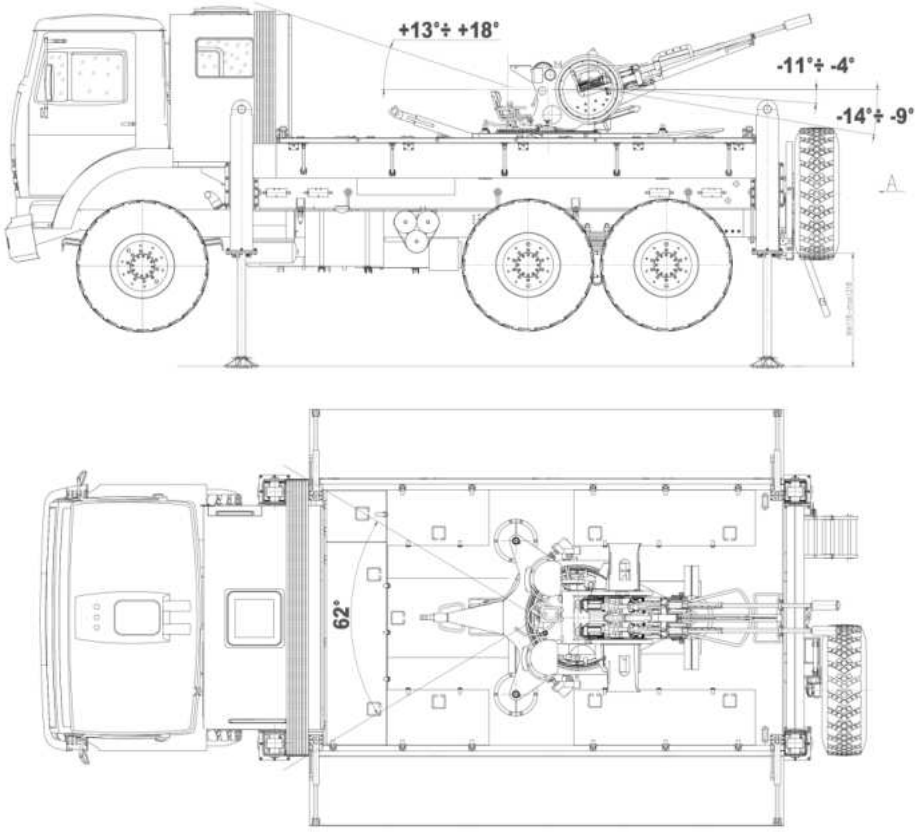
$$\vec{F} = \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z \end{bmatrix}$$

$F_x = F.cos\beta.cos\alpha$

$F_y = F.sin\beta$

$F_z = F.cos\beta.sin\alpha$

Lực phát bắn lớn nhất tác dụng lên giá là F = 30000N. Đồng thời do pháo Zu-23-2 có tần số bắn phát bắn là 3 Hz, nên ta chỉ xét thời gian tác dụng lực phát bắn đơn lên khung là 0,33 giây.



Hình 2. Góc hạn chế bắn của tổ hợp

Bài toán xác định ở 53 vị trí tính toán ứng với các góc bắn theo phương dọc và ngang khác nhau của tổ hợp ở trạng thái bắn đơn trên chân chống.

Bảng 1. Chế độ tính toán cho các vị trí bắn ứng với các góc bắn dọc và góc bắn ngang khác nhau

STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°	STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°	STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°	STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°
1	0	-10	***15***	150	0	***29***	270	30	***43***	0	75
2	30	-10	***16***	210	0	***30***	315	30	***44***	30	75
3	60	-10	***17***	240	0	***31***	345	30	***45***	60	75
4	120	-10	***18***	270	0	***32***	0	45	***46***	90	75
5	150	-10	***19***	315	0	***33***	30	45	***47***	120	75
6	210	-10	***20***	345	0	***34***	60	45	***48***	150	75
7	240	-10	***21***	0	30	***35***	90	45	***49***	210	75
8	270	-10	***22***	30	30	***36***	120	45	***50***	240	75
9	315	-10	***23***	60	30	***37***	150	45	***51***	270	75
10	345	-10	***24***	90	30	***38***	210	45	***52***	315	75
11	0	0	***25***	120	30	***39***	240	45	***53***	345	75
12	30	0	***26***	150	30	***40***	270	45			
13	60	0	***27***	210	30	***41***	315	45			
14	120	0	***28***	240	30	***42***	345	45			

3. Kết quả tính toán

Bảng 2. Kết quả tính toán ở các vị trí

STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°		*Chuyển vị tổng (mm)*	*Biến dạng đàn hồi tương đương (mm/mm)*	*Biến dạng chính lớn nhất (mm/mm)*	*Ứng suất tương đương (MPa)*	*Ứng suất chính lớn nhất (MPa)*
1	0	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,97E-06	2,42E-05	-7,3988
			Lớn nhất	15,766	7,02E-04	6,57E-04	140,34	147,22
2	30	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,45E-06	2,42E-05	-7,5924
			Lớn nhất	15,736	7,05E-04	6,60E-04	141,1	148,06
3	60	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,50E-06	2,42E-05	-7,9221
			Lớn nhất	15,592	7,11E-04	6,66E-04	142,26	149,38
4	120	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-3,66E-07	2,42E-05	-6,3465
			Lớn nhất	15,132	7,23E-04	6,78E-04	144,55	152,02
5	150	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-4,65E-07	2,42E-05	-7,1297
			Lớn nhất	14,941	7,25E-04	6,80E-04	145,05	152,63

STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°		*Chuyển vị tổng (mm)*	*Biến dạng đàn hồi tương đương (mm/mm)*	*Biến dạng chính lớn nhất (mm/mm)*	*Ứng suất tương đương (MPa)*	*Ứng suất chính lớn nhất (MPa)*
6	210	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-3,04E-06	2,42E-05	-8,3898
			Lớn nhất	14,878	7,21E-04	6,76E-04	144,11	151,61
7	240	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-6,54E-07	2,42E-05	-9,5467
			Lớn nhất	15,024	7,15E-04	6,70E-04	142,92	150,26
8	270	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-8,13E-07	2,42E-05	-9,7307
			Lớn nhất	15,245	7,08E-04	6,63E-04	141,66	148,81
9	315	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-2,77E-06	2,42E-05	-8,2583
			Lớn nhất	15,587	7,02E-04	6,57E-04	140,35	147,27
10	345	-10	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-2,73E-06	2,42E-05	-7,8462
			Lớn nhất	15,734	7,01E-04	6,56E-04	140,18	147,05
11	0	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-2,23E-06	2,42E-05	-7,7573
			Lớn nhất	15,76	7,01E-04	6,56E-04	140,14	147,01
12	30	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,59E-06	2,42E-05	-8,249
			Lớn nhất	15,73	7,05E-04	6,60E-04	140,91	147,86
13	60	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,42E-06	2,42E-05	-8,3848
			Lớn nhất	15,583	7,10E-04	6,65E-04	142,08	149,19
14	120	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-5,59E-07	2,42E-05	-6,6458
			Lớn nhất	15,116	7,22E-04	6,77E-04	144,4	151,88
15	150	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-6,88E-07	2,42E-05	-7,6537
			Lớn nhất	14,922	7,25E-04	6,80E-04	144,92	152,49
16	210	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-3,29E-06	2,42E-05	-8,9181
			Lớn nhất	14,859	7,20E-04	6,75E-04	143,96	151,45
17	240	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-6,55E-07	2,42E-05	-10,353
			Lớn nhất	15,007	7,14E-04	6,69E-04	142,75	150,09
18	270	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-7,58E-07	2,42E-05	-10,467
			Lớn nhất	15,232	7,07E-04	6,63E-04	141,48	148,62
19	315	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-2,60E-06	2,42E-05	-8,6288

STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°		*Chuyển vị tổng (mm)*	*Biến dạng đàn hồi tương đương (mm/mm)*	*Biến dạng chính lớn nhất (mm/mm)*	*Ứng suất tương đương (MPa)*	*Ứng suất chính lớn nhất (MPa)*
			Lớn nhất	15,579	7,01E-04	6,56E-04	140,14	147,06
20	345	0	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-3,01E-06	2,42E-05	-8,2111
			Lớn nhất	15,728	7,00E-04	6,55E-04	139,98	146,84
21	0	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-3,37E-06	2,42E-05	-9,8701
			Lớn nhất	15,662	7,00E-04	6,55E-04	139,95	146,86
22	30	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-2,02E-06	2,42E-05	-10,064
			Lớn nhất	15,635	7,03E-04	6,58E-04	140,62	147,59
23	60	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,78E-06	2,42E-05	-9,3512
			Lớn nhất	15,507	7,08E-04	6,63E-04	141,63	148,75
24	90	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,60E-06	2,42E-05	-8,9983
			Lớn nhất	15,312	7,14E-04	6,69E-04	142,7	150,01
25	120	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,28E-06	2,42E-05	-9,5406
			Lớn nhất	15,103	7,18E-04	6,73E-04	143,63	151,06
26	150	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,87E-06	2,42E-05	-8,837
			Lớn nhất	14,936	7,20E-04	6,76E-04	144,07	151,59
27	210	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-2,89E-06	2,42E-05	-10,713
			Lớn nhất	14,883	7,16E-04	6,72E-04	143,25	150,69
28	240	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,48E-06	2,42E-05	-12,642
			Lớn nhất	15,011	7,11E-04	6,66E-04	142,21	149,52
29	270	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-6,02E-07	2,42E-05	-12,253
			Lớn nhất	15,206	7,06E-04	6,61E-04	141,11	148,25
30	315	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-2,52E-06	2,42E-05	-9,2153
			Lớn nhất	15,506	7,00E-04	6,55E-04	139,96	146,9
31	345	30	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-3,43E-06	2,42E-05	-9,8049
			Lớn nhất	15,634	6,99E-04	6,54E-04	139,81	146,71
32	0	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,68E-06	2,42E-05	-10,266
			Lớn nhất	15,573	7,01E-04	6,56E-04	140,11	147,06

STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°		*Chuyển vị tổng (mm)*	*Biến dạng đàn hồi tương đương (mm/mm)*	*Biến dạng chính lớn nhất (mm/mm)*	*Ứng suất tương đương (MPa)*	*Ứng suất chính lớn nhất (MPa)*
33	30	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,75E-06	2,42E-05	-10,183
			Lớn nhất	15,551	7,03E-04	6,59E-04	140,65	147,66
34	60	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,93E-06	2,42E-05	-9,5183
			Lớn nhất	15,446	7,07E-04	6,63E-04	141,48	148,61
35	90	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,86E-06	2,42E-05	-10,144
			Lớn nhất	15,287	7,12E-04	6,67E-04	142,38	149,64
36	120	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,66E-06	2,42E-05	-11,037
			Lớn nhất	15,117	7,16E-04	6,71E-04	143,11	150,49
37	150	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,29E-06	2,42E-05	-10,623
			Lớn nhất	14,98	7,17E-04	6,73E-04	143,47	150,92
38	210	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,76E-06	2,42E-05	-12,124
			Lớn nhất	14,937	7,14E-04	6,69E-04	142,8	150,19
39	240	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,23E-06	2,42E-05	-13,511
			Lớn nhất	15,042	7,10E-04	6,65E-04	141,95	149,23
40	270	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-6,01E-07	2,42E-05	-12,799
			Lớn nhất	15,202	7,05E-04	6,61E-04	141,05	148,2
41	315	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,60E-06	2,42E-05	-9,2473
			Lớn nhất	15,447	7,01E-04	6,56E-04	140,11	147,1
42	345	45	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,98E-06	2,42E-05	-10,075
			Lớn nhất	15,551	7,00E-04	6,55E-04	139,99	146,94
43	0	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,61E-06	2,42E-05	-9,4356
			Lớn nhất	15,347	7,04E-04	6,60E-04	140,87	147,97
44	30	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,76E-06	2,42E-05	-9,4104
			Lớn nhất	15,338	7,05E-04	6,61E-04	141,07	148,2
45	60	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,85E-06	2,42E-05	-10,517
			Lớn nhất	15,3	7,07E-04	6,62E-04	141,38	148,54
46	90	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,86E-06	2,42E-05	-12,044

STT	Góc ngang α°	Góc dọc β°		*Chuyển vị tổng (mm)*	*Biến dạng đàn hồi tương đương (mm/mm)*	*Biến dạng chính lớn nhất (mm/mm)*	*Ứng suất tương đương (MPa)*	*Ứng suất chính lớn nhất (MPa)*
			Lớn nhất	15,242	7,09E-04	6,64E-04	141,7	148,92
47	120	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,76E-06	2,42E-05	-13,046
			Lớn nhất	15,179	7,10E-04	6,65E-04	141,97	149,23
48	150	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,56E-06	2,42E-05	-13,367
			Lớn nhất	15,129	7,10E-04	6,66E-04	142,1	149,38
49	210	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,14E-06	2,42E-05	-13,868
			Lớn nhất	15,114	7,09E-04	6,65E-04	141,85	149,12
50	240	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,08E-06	2,42E-05	-13,885
			Lớn nhất	15,152	7,08E-04	6,63E-04	141,55	148,77
51	270	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,12E-06	2,42E-05	-13,014
			Lớn nhất	15,211	7,06E-04	6,62E-04	141,22	148,39
52	315	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,34E-06	2,42E-05	-10,567
			Lớn nhất	15,3	7,04E-04	6,60E-04	140,87	147,99
53	345	75	Nhỏ nhất	0	1,21E-10	-1,52E-06	2,42E-05	-9,3838
			Lớn nhất	15,339	7,04E-04	6,60E-04	140,83	147,93

❖ **Nhận xét:**

Từ bảng 2, ta thấy:

- Tại vị trí 16 $(\alpha = 210°, \beta = 0°)$ chuyển vị tổng là bé nhất 14,859 mm, tại vị trí 1 $(\alpha = 0°, \beta = -10°)$ chuyển vị tổng là lớn nhất 15,766 mm.

- Tại vị trí 31$(\alpha = 345°, \beta = 30°)$ biến dạng đàn hồi tương đương là bé nhất $6{,}991 \times 10^{-4}$ mm. Tại vị trí 5 $(\alpha = 150°, \beta = -10°)$ biến dạng đàn hồi tương đương là lớn nhất $7{,}253 \times 10^{-4}$ mm.

- Tại vị trí 31 $(\alpha = 345°, \beta = 30°)$ ứng suất tương đương là bé nhất 139,81 MPa. Tại vị trí 5 $(\alpha = 150°, \beta = -10°)$ ứng suất tương đương là lớn nhất 145,05 MPa. Như vậy ứng suất lớn nhất nhỏ hơn ứng suất giới hạn cho phép của vật liệu là $[\sigma]$ = 250 MPa.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày chi tiết việc ứng dụng phần mềm ANSYS Workbench để phân tích và đánh giá độ bền khung của tổ hợp pháo phòng không trong trạng thái bắn đơn trên chân chống. Thông qua mô phỏng số, các đặc tính cơ học như chuyển vị, ứng suất và biến dạng của khung pháo đã được xác định một cách rõ ràng, cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá khả năng chịu tải và ổn định của kết cấu.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, trong trạng thái bắn đơn, các giá trị ứng suất đều nằm trong giới hạn cho phép của vật liệu, đảm bảo khung pháo có khả năng hoạt động an toàn và ổn định trong điều kiện khai thác. Điều này minh chứng cho hiệu quả thiết kế và khả năng chịu tải của tổ hợp pháo phòng không.

Ngoài ra, phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ANSYS Workbench đã chứng minh tính ưu việt trong việc mô phỏng các điều kiện làm việc phức tạp, giảm thiểu thời gian và chi phí thực nghiệm. Các kết quả từ bài nghiên cứu không chỉ góp phần nâng cao độ tin cậy trong thiết kế và sản xuất tổ hợp pháo phòng không mà còn có thể mở rộng áp dụng cho các kết cấu chịu tải động khác trong lĩnh vực quốc phòng.

Nghiên cứu này cũng đặt nền tảng cho việc khảo sát khung tổ hợp trong các điều kiện vận hành khác như bắn không trên chân chống hoặc bắn loạt, đồng thời định hướng các giải pháp cải tiến thiết kế và gia cường kết cấu nhằm đáp ứng tải trọng lớn hơn hoặc các điều kiện tác chiến khắc nghiệt.

Tài liệu tham khảo

1. Vũ Đức Lập. (2004). *Sổ tay tra cứu tính năng kỹ thuật xe*, HVKTQS.
2. Nguyễn Văn Phái. (2003). *Giải bài toán cơ kỹ thuật bằng chương trình Ansys*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
3. Trần Ích Thịnh, Ngô Như Khoa. (2007). *Phương pháp phần tử hữu hạn*, Hà Nội.
4. Nguyễn Mạnh Hùng. (2013). *Nghiên cứu thiết kế bố trí chung xe chuyên dụng lắp đặt tổ hợp pháo phòng không tầm thấp*, Luận án tiến sĩ, HVKTQS.
5. Viện kỹ thuật cơ giới quân sự. (2009). *Nghiên cứu thiết kế, chế tạo xe cơ sở đặc chủng quân sự để lắp đặt tổ hợp pháo phòng không nhiều nòng, tên lửa phòng không tầm thấp*, Đề cương nghiên cứu đề tài độc lập cấp nhà nước.
6. Xiaolin Chen, Yijun Liu. (2018). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench, Second Edition,* CRC Press.

Application of ANSYS Workbench in analysing structural strength of an automobile frame with Zu-23-2 anti-aircraft system in single-fire mode

Abstract: *This paper presents the results of a study evaluating the structural strength of automobile frame mounted with Zu-23-2 anti-aircraft gun system under single-firing conditions using ANSYS Workbench software. The research methodology is based on dynamic modeling and stress analysis simulations on the structure under the impact of firing forces. The study identifies the stress and deformation distribution on the gun frame, thereby assessing the system's strength and operational safety. The findings provide a scientific basis for optimizing the design and verifying the reliability of the anti-aircraft gun system in practical operating conditions.*

Keywords: ANSYS Workbench; anti-aircraft gun system; finite element method; structural strength of the frame.

❑

Human Action Recognition for Human-Robot Interaction Using Transformer Model and Inertial Measurement Unit (IMU) Data

Tien The Nguyen, Tran Cong Tan, Vu Xuan Duc, Xuan-Tung Truong
Institute of Missile and Control Engineering, Le Quy Don Technical University
* Email: *tiennt.isi@lqdtu.edu.vn*, Contact number: 0961970443

Abstract

Effective human-robot interaction (HRI) depends on robots accurately understanding human actions. In this paper, we present an efficient approach to human action recognition (HAR) specifically designed for human-robot interaction. We use transformer model to analyze data collected from inertial measurement unit (IMU). To evaluate the effectiveness of our method, we used a public available UTD-MHAD dataset. Our results demonstrate a significant improvement in action recognition accuracy compared to traditional methods, enabling more reliable and robust HRI. This research can significantly enhance human-robot interaction across various domains by enabling more natural and intuitive interactions.

Keywords: *Human action recognition, human-robot interaction, Inertial measurement unit, Transformer*

1. Introduction

Human action recognition (HAR) plays an important role in a number of real-world applications due to its potentials. It can be applied to diverse areas such as visual surveillance systems [1], autonomous navigation systems [2], and human-robot interaction (HRI) [3]. In context of HRI, human action recognition is particularly crucial because it allows robots to understand and predict human behavior, leading to more natural, safe, and efficient interactions. More specifically, by anticipating human movements, robots can adjust their behavior to avoid collisions or dangerous situations. By perceiving human intentions or social cues, robots can understand the goal and intent of the user, resulting in a more natural and effective interaction.

The aim of HAR is to automatically detect and analyze human actions from the data obtained from diverse sensors such as RGB cameras, depth sensors, range sensors, and inertial sensors. Initially, vision-based HAR's studies used RGB or gray-scale video to recognize human actions due to their popularity and low-cost. These methods captured RGB video sequences from conventional camera to recognize human activities. Although they achieved significant results, using RGB cameras for monitoring human actions exist some drawbacks such as sensitivity to viewpoint, background, and illumination as well as lack of 3D information. To overcome these above limitations, many researches utilized depth imagery instead of RGB video. The depth image captured from depth sensors are insensitive to changes in illumination and provide 3D structural information. Moreover, it also provides a way to achieve 3D skeleton to recognize human actions in a better way. In general, although vision-based HAR's algorithms have considerable results, these methods face some problems like camera position, limited viewpoint, occlusion, and background. Besides, the camera-based HAR system requires powerful hardware resources to run these computationally complex computer vision algorithms. These drawbacks can be addressed by using inertial sensors, which can cope with limited perspective and illumination compared to RGB and depth sensors. Furthermore, inertial sensors can be used for fine-grained HAR and privacy protection.

On the other hand, in the early days, conventional methods for HAR relied on statistical approaches that focused on designing hand-crafted features. However, these hand-crafted approaches have several limitations. They require deep knowledge of the data being analyzed [4] and can only capture a subset of salient features, making it difficult to generalize to unseen data. Recently, with advancements in artificial intelligence and neural networks, deep learning approaches have become increasingly prominent in the HAR field. Many papers have been focused on HAR by deep neural networks, that used Convolutional neural network (CNN), fully convolutional neural network, recurrent neural network (RNN), Long-Short Term Memory (LSTM) and variant of them for time series classification of sensor signals. Although these methods have achieved much significant results, they face some challenges. For instance, CNN-base HAR approaches learn different features (e.g., temporal and spatial) form the input data through CNN networks and then perform recognition to get the result. However, these approaches are not effective for long-term dependency modeling. Similarly, HAR's algorithms based on RNN or LSTM have also several limitations. Specifically, RNN based-methods struggle with the vanishing gradient problem, making it difficult for them to learn long-term dependencies. Despite LSTM based-approaches address some of RNNs' issues, their complex structure increases computational costs and memory usage, making them less efficient for large-scale tasks. Moreover, both RNNs and LSTMs are prone to gradient explosions, which can make training unstable. Their sequential processing nature also limits parallelism, leading to slower training. Unlike RNN and LSTM, which rely on sequential processing and struggle with long-term dependencies, transformer architecture uses a self-attention mechanism to capture relationships across an entire sequence simultaneously. Additionally, their parallel processing capability significantly speeds up training compared to RNNs and LSTMs, which process data sequence to sequence. These advantages make transformers a powerful and efficient choice for HAR tasks.

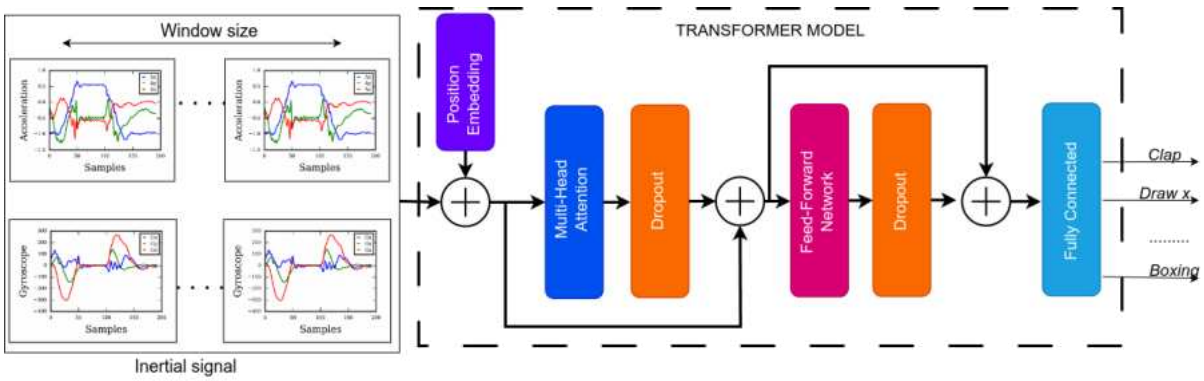


Fig 1. Transformer architecture for HAR

To address aforementioned limitations, we propose a method using inertial sensor based on a Transformer model for HAR. To evaluate the effectiveness of our method, our experiments on public available UTD-MHAD dataset. The obtained results show that the potential of our method to enhance the performance for HAR. The remainder of this paper is structured as

follows: Section 2 outlines the methodology, Section 3 presents the results and discussion, and Section 4 concludes the paper.

2. Methodology

2.1 Transformer model for HAR

The original Transformer model is [6] primarily designed for natural language processing (NLP) tasks, which comprises an encoder and a decoder block. The encoder block consists of two major components: Multi-Head Attention and Feed-Forward Network, each serving a specific function.

Specifically, encoder's Multi-Head Attention allows each position in the input sequence to attend to all other positions, capturing relationships and dependencies between them regardless of their distance in the sequence. It computes attention scores and generates a weighted representation of the input. After the self-attention layer, the output is passed through a position-wise feed-forward network, which processes each position independently and helps in transforming the representations learned from the attention mechanism.

Similarly, decoder block including Masked Multi-Head Attention, Multi-Head Attention, and Feed-Forward Network. In which, Masked Multi-Head Attention allows the decoder to attend to previous positions in the output sequence while preventing it from accessing future positions. This masking ensures that the predictions for a given token depend only on previously generated tokens, maintaining the auto-regressive property. Multi-Head Attention enables the decoder to focus on relevant parts of the encoder's output. It integrates information from the encoded input sequence, allowing the decoder to generate contextually appropriate outputs based on the input. Like in the encoder, Feed-Forward Network layer processes the output of the attention layers, applying transformations to enhance the representation before producing the final output.

The Vision Transformer (ViT) model [7] is a variant of the original Transformer architecture, which was designed to adapt for image classification. It splits an image into small patches, turning them into a sequence of features, and applying the attention mechanism to these features. Inspired by the success of Vision Transformer models in supporting image recognition, we can assume that it can also process 1D time series of signals from sensors such as an acceleration and gyroscope. More specifically, each received sample can be treated as a small segment (or 'patch'), by this way we can apply ViT Transformer for processing 1D time series signal from inertial sensor. The flow of signal can be described as follows:

Let denote acceleration and gyroscope as $\mathbf{a} = \left(a_x, a_y, a_z\right)$, and $\mathbf{g} = \left(g_x, g_y, g_z\right)$. At each timestep t, the input data can be represented as a 6-dimensional vector:

$$\mathbf{h}_t = [\mathbf{a}_t, \mathbf{g}_t] \tag{1}$$

here, $\mathbf{h}_t$ represents the concatenated sensor readings at time t for both the accelerometer and gyroscope.

To match the required input dimensionality of the Transformer, we need to project each 6-dimensional sensor vector $\mathbf{h}_t$, into a higher-dimensional space. To do this, we apply a linear transformation to each sensor vector:

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{W}_e \cdot \mathbf{h}_t + \mathbf{b}_e \tag{2}$$

Where, $\mathbf{W}_e$ is a learnable weight matrix of shape $d_{model} \times 6$, d_{model} is the desired embedding dimension; $\mathbf{b}_e$ is a learnable bias term; $\mathbf{z}_t$ is the resulting embedded vector of size d_{model}, which represents the transformed sensor data.

As mention earlier, Transformer don't have a built-in sense of the order of inputs, so we add positional encoding to capture the temporal order of the sensor data. The positional encoding $\mathbf{PE}(t)$ is added element-wise to the embedded sensor data at timestep t.

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{z}_t + \mathbf{PE}(t) \tag{3}$$

With, x_t is the final embedding used as input to the Transformer.

The input to the Transformer encoder is a sequence of these final embeddings across all timesteps:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, ..., \mathbf{x}_T] \tag{4}$$

Where, T is the total number of timesteps (sequence length).

To fed into Transformer model to recognize human action, we use a window technique with size m to split the input sequence into smaller sub-sequences (windows), each containing m consecutive timesteps.

$$\mathbf{X}_{window} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, ..., \mathbf{x}_m] \tag{5}$$

Now, each window $\mathbf{X}_{window}$ is fed into the Transformer model to achieve the human action class.

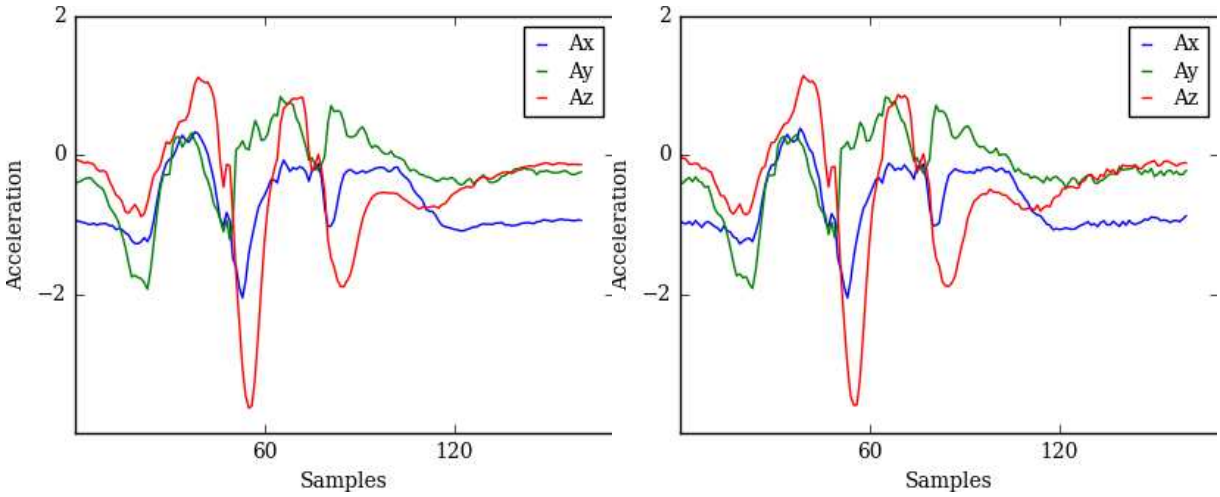
2.2 UTD-MHAD Dataset

The UTD-MHAD dataset [8] consists of four temporally synchronized modalities: RGB videos, depth videos, skeleton positions, and inertial signals. Collected in an indoor environment, UTD-MHAD comprises 861 data sequences from 27 actions performed by 8 subjects. Each subject repeated each action four times. The dataset utilizes Kinect for RGB-D information and wearable inertial sensors placed on the wrist or leg, depending on the action. The measuring range of the wearable inertial sensor is ±8 g for acceleration and ±1000 degrees/second for rotation. The inertial sensor was positioned on the subject's right wrist for actions 1 to 21 and on the right thigh for actions 22 to 27. Inertial data including 3-axis gyroscope and 3-axis acceleration while the skeleton provide 20 joints in total. The sampling rate of this wearable inertial sensor and camera are 50 Hz and 30 frames per second, respectively.

Augmentation:

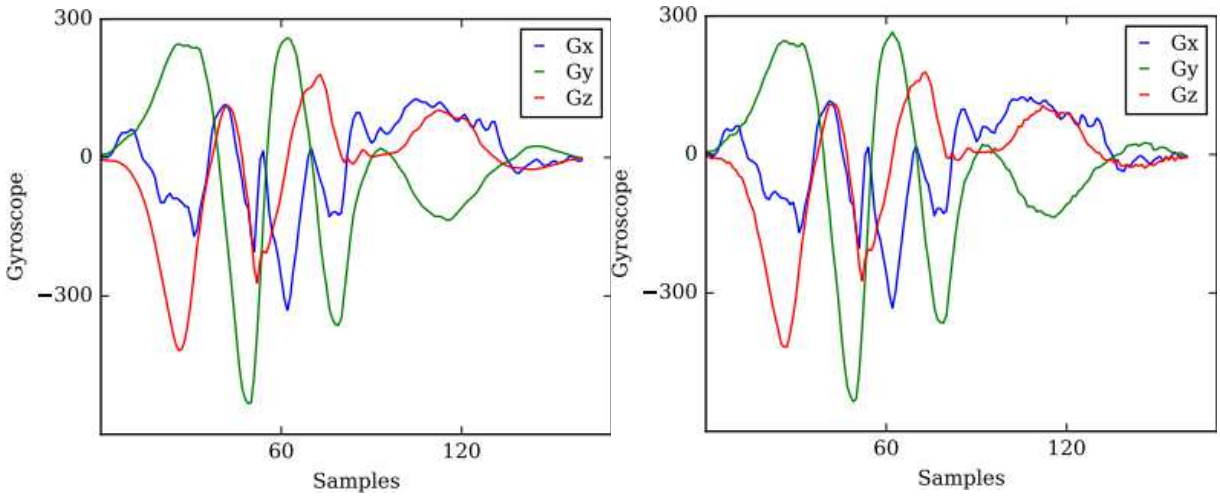
Because the UTD-MHAD dataset has a limited number of samples, making it difficult to train a transformer-based network effectively. To address this issue, we applied data augmentation techniques to inertial data of each sample. Specifically, we increased the number of training and testing samples by applying *signal jittering* augmentation techniques presented in [11]. Specifically, each axis of the gyroscope and acceleration data were jittered 3 times with white Gaussian noise based on an input *jitter factor* = 500. Fig 2 and Fig 3 depicted the signal of acceleration and gyroscope before and after jittering with Gaussian noise.

Finally, after applying augmentation, the total size of the dataset increases significantly from 861 to $861+(861\times3)=3444$ samples. Besides, to get more samples and also a fixed patch length for training, we implemented a window size and a sliding step of 32. This approach benefits the model by allowing it to learn new and unique samples with each iteration. As a result, the size of the data set is 5616 samples.



a) Original signal *b) After jittering*

Fig 2. Left: original acceleration signal. Right: signal obtained after jittering with Gaussian noise.



a) Original signal *b) After jittering*

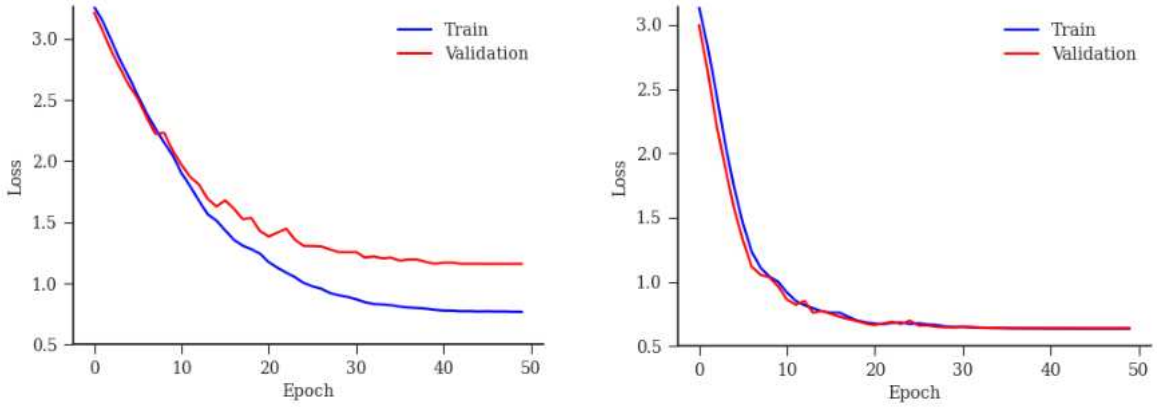
Fig 3. Left: original gyroscope signal. Right: signal obtained after jittering with Gaussian noise.

Training process:

We conducted our experiments on Google Colab for training our model, utilizing a T4 GPU, Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.00 GHz and 50 GB of RAM. Moreover, the implementation scripts were done using Python and the Keras library. The model was trained

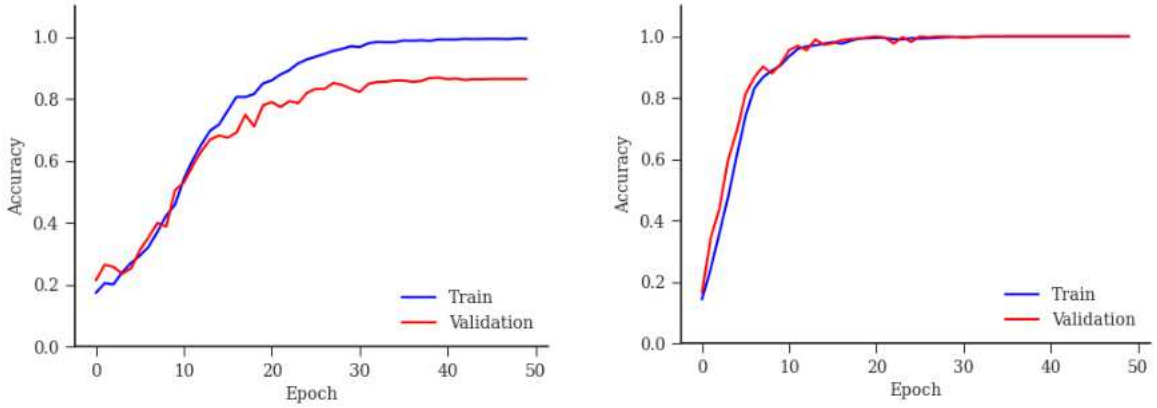
for 50 epochs with several common training parameters for transformer model such as Bath size b is 64; Dropout rate is 0.1; d_{model} is 128; d_{ff} is 256; Optimizer is Adam.

In this task, we used a subject-specific setting for our experiments, where the training, test, and validation sets were randomly split across all subjects. The augmented dataset was further split into training and testing samples by randomly allocating 70% of the data for training, 15% for test, and 15% for validation. We trained the Transformer model for 50 epochs in two scenarios including original dataset and augmented dataset, respectively. The accuracy and loss training are shown in Fig 4 and Fig 5. The results indicated that the performance of transformer is better when the dataset is enough diverse and large as theories.



a) Without augmentation *b) After augmentation*

Fig 4. Loss Training with original and augmented dataset



a) Without augmentation *b) After augmentation*

Fig 5. Accuracy training with original and augmented dataset

3. Results and Discussion

We compared our proposed method with state-of-the-art approaches, which using inertial modalities including accleration and gyroscope for human action recognition. The quantitative comparison on the publicly available UTD-MHAD dataset in terms of recognition accuracy, is summarized in Table 1. Our approach clearly outperformed all other

methods, achieving the highest accuracy. Specifically, our proposed method obtained an accuracy of 85.32% and 99.4% in overall corresponding to original and augmented UTD-MHAD dataset. This demonstrates that the proposed method using inertial data based transformer model, significantly enhances the effectiveness of HAR.

Table 1. Comparison of ther proposed method to others on UTD-MHAD dataset

Method	Modality	Accuracy (%)
C. Chen *et al.* [8]	Acc, Gyro	67.2
R. Memmesheimer *et al.* [9]	Acc, Gyro	72.86
M. Ehatisham-Ul-Haq *et al*. [10]	Acc, Gyro	91.6
Imran et al. [11]	Acc, Gyro	86.51
Ours	Acc, Gyro (Original)	85.32 %
Ours	Acc, Gyro (Augmented)	99. 4 %

4. Conclusion

In this paper, we proposed an efficient method, which used acceleration and gyroscope data for HAR based on transformer architecture. The performance of the method is evaluated on the public available UTD-MHAD dataset. The detailed experimental results indicate that the effectiveness of our method as compared to previous algorithms.

Acknowledgement

References

1. W. Lin, M.-T. Sun, R. Poovandran, and Z. Zhang, “Human activity recognition for video surveillance,” in ISCAS, 2008.
2. M. Lu, Y. Hu, and X. Lu, “Driver action recognition using deformable and dilated faster r-cnn with optimized region proposals,” Appl. Intell., vol. 50, no. 4, 2020.
3. I. Rodomagoulakis, N. Kardaris, V. Pitsikalis, E. Mavroudi, A. Katsamanis, A. Tsiami, and P. Maragos, “Multimodal human action recognition in assistive human-robot interaction,” in ICASSP, 2016.
4. Z. Sun, Q. Ke, H. Rahmani, M. Bennamoun, G. Wang and J. Liu, "Human Action Recognition From Various Data Modalities: A Review," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 45, no. 3, pp. 3200-3225, 1 March 2023.
5. T. Plötz, N. Y. Hammerla, and P. L. Olivier, “Feature learning for activity recognition in ubiquitous computing,” in Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2011.
6. Vaswani, A: Attention is all you need. {Advances In Neural Information Processing Systems} (2017).
7. Dosovitskiy, A: An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. {ArXiv Preprint ArXiv:2010.11929}. (2020).
8. C. Chen, R. Jafari and N. Kehtarnavaz, "UTD-MHAD: A multimodal dataset for human action recognition utilizing a depth camera and a wearable inertial sensor," *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2015, pp. 168-172.
9. R. Memmesheimer, N. Theisen and D. Paulus, "Gimme Signals: Discriminative signal encoding for multimodal activity recognition," *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 10394-10401.

10. M. Ehatisham-Ul-Haq *et al*., "Robust Human Activity Recognition Using Multimodal Feature-Level Fusion," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 60736-60751, 2019.
11. Imran, J., Raman, B. Evaluating fusion of RGB-D and inertial sensors for multimodal human action recognition. *Journal Of Ambient Intelligence And Humanized Computing.*11, 189–208 (2020).

Nhận dạng hành động con người cho tương tác giữa người và rô bốt sử dụng mô hình Transformer và dữ liệu cảm biến đo lường quán tính (IMU)

Abstract: *Hiệu quả tương tác giữa con người và robot (HRI) phụ thuộc vào việc robot hiểu chính xác các hành động của con người. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một phương pháp hiệu quả để nhận diện hành động của con người dùng cho lĩnh vực tương tác giữa người và robot. Chúng tôi sử dụng mô hình Transformer để phân tích dữ liệu thu thập từ thiết bị đo lường quán tính (IMU) để dự đoán hành động con người. Để đánh giá hiệu quả của phương pháp, chúng tôi sử dụng một tập dữ liệu chuẩn UTD-MHAD, có sẵn. Kết quả thu được cho thấy sự cải thiện đáng kể về độ chính xác nhận diện hành động so với các phương pháp truyền thống. Nghiên cứu này có tiềm năng cải thiện đáng kể sự tương tác giữa con người và robot trong nhiều lĩnh vực khác nhau, bằng cách cho phép các tương tác tự nhiên và trực quan hơn.*

Keywords: Nhận dạng hành động con người, tương tác người và rô bốt, cảm biến đo lường quán tính, Transformer model.

Enhancing mmr algorithm and applying to the weapon – target assignment problem

Nguyen Xuan Truong[1*], Van Ba Viet An[2], To Hien Huy Hieu[2]

[1]*Institute of System Integration;* [2] *Department of Command Automation*

Abstract: *The weapon-target assignment (WTA) problem in Command and Control (C2) systems is NP-complete. The maximum margin return (MMR) algorithm, though effective, has limitations: the greedy approach lacks global optimality, while random selection is computationally expensive. We propose an improved MMR algorithm with local search, termed Advanced MMR with Local Search, to enhance optimization. Simulations in Python validate its superiority over Greedy and Random MMR. Results show improved computational efficiency and global optimization. A C++ interface was developed for real-time evaluation in C2 systems across various air defense scenarios.*

Keywords: Weapon-target assignment, maximum margin rerturn, MMR, Command and Control, Air Defense.

1. Introduction

Lloyd and Witsenhausen have shown that the static version of the WTA problem is an NP-Complete problem by modeling it as a nonlinear integer programming problem. Since the static version of the problem is a special case of the dynamic problem, the dynamic version is also NP-Complete[3]. The WTA problem can be evaluated based on two main bases: target-based and asset-based. If the goal of the algorithm is to assign weapons to targets such that the survival probability of the targets is minimized, it is considered target-based. On the other hand, if the problem focuses on increasing the survival probability of the protected entities, it is asset-based.

For asset-based problems, the target's objective has been identified, where as target-based problems do not need to clearly identify the target's objective. This paper focuses on the target-based WTA problem. The problem model is described below:

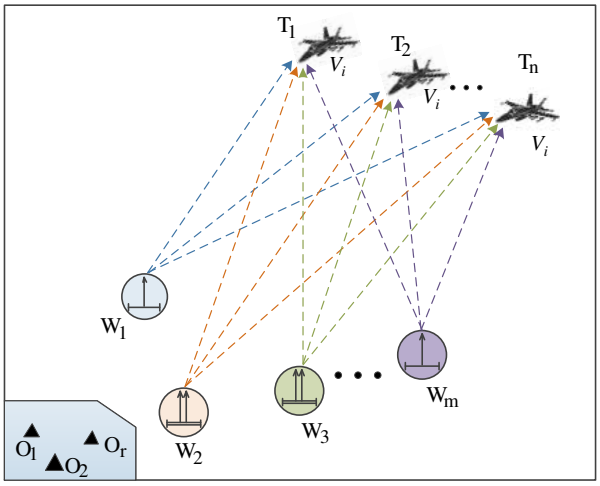


Figure 1. Weapon -Target assignment mathematical model

The mathematical model of the WTA (Weapon-Target Assignment) problem is described as follows:

In the WTA problem, based on minimizing the survival probability of the target with V_i as the common value for target $T_i \in \mathbf{T}$ as the result based on the assessment of the target's

threat level. The requirement of this problem is to find a WTA solution $\overline{X}$ that minimizes the value of the objective function:

$$F\left(\bar{X}\right)=\sum_{i=1}^{n}V_i\times\left[\prod_{j=1}^{m}(1-P_{ij})^{X_{ij}}\right] \quad (1)$$

with the constraint:

$$\sum_{i=1}^{n}X_{ij}=1 \text{ and } X_{ij}=0,1 \quad (2)$$

where: P_{ij} is the probability of destroying target T_i by WTA W_j. X_{ij} is the assignment variable (control parameter), taking the value of 1 if target T_i is assigned to WTA W_j. Conversely, $X_{ij}=0$ if target T_i is not assigned to WTA W_j.

Based on Equation (2), another approach to minimizing the objective function is to maximize the weapon's ability to destroy targets or to maximize the reduction of the objective function. This can be achieved by multiplying the target value by the probability that a weapon can successfully destroy the target when it is selected for that target. This paper minimizes the objective function using this approach; however, each algorithm mentioned below employs a different optimization method.

There are several popular methods to solve the Weapon Target Assignment (WTA) problem, such as Branch and Bound Algorithms [4], Very Large Scale Neighborhood Search (VLSN) Algorithm[5], Maximum Marginal Return (MMR) Algorithm, and Genetic Algorithms (GA)[3][6]. Our method differs from these listed approaches in that we propose an optimal and fast assignment solution for the WTA problem.

We compared the improved MMR algorithm with other algorithms to evaluate its efficiency, and we found that this algorithm produces nearly optimal results within a relatively large search space, suitable for current operational conditions. Additionally, it reduces redundancy during implementation while being relatively easy to install. We also developed software capable of testing the performance of various algorithms in different combat scenarios.

2.1 Greedy MMR Algorithm

The Greedy MMR algorithm processes weapons sequentially from a list and assigns them to targets in order. Each weapon is considered one by one, and for each weapon, the target that maximizes the reduction in the objective function value is selected. In other words, this algorithm optimizes the objective function only at the current step being evaluated, which makes it simple to implement. However, it often fails to achieve optimal results across the global search space[5]. Greedy MMR algorithm is built including the following steps in Fig. 2.

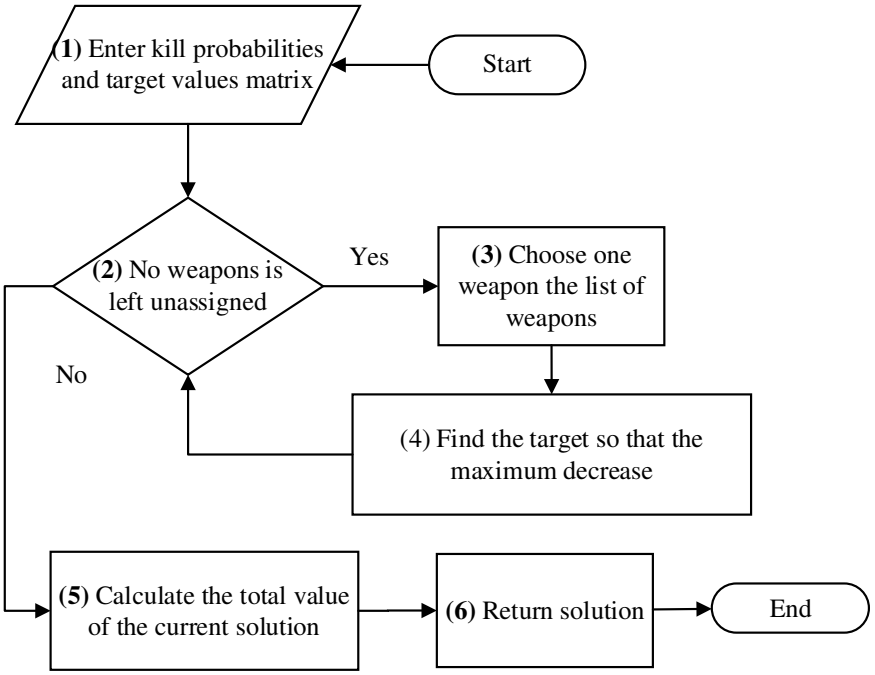


Figure 2. Flowchart of the greedy MMR algorithm

Step 1: Create initial matrices for target values and probabilities of target destruction, with elements randomly generated in the range [0.5, 1].

Step 2: Choose a weapon from the list of available weapons to assign to a target. If there are no remaining weapons, proceed to Step 4. Otherwise, continue to the next step.

Step 3: Sequentially iterate through the list of targets and assign the target to the current weapon such that the reduction in the objective function value is maximized. Then return to Step 2.

Step 4: Recalculate the objective function value after the target has been assigned to the weapon.

Step 5: Output the assignment matrix (mapping targets to weapons) and the total target value after assignment.

It is evident that the algorithm optimizes only for individual weapons without considering the global search space (in this case, the entire space of weapons and targets). Additionally, the lack of post-assignment optimization methods often leads to suboptimal results[7].

2.2 Random MMR Algorithm

The Random MMR algorithm is a non-deterministic approach that randomly selects a weapon and assigns it to a target to achieve the maximum reduction in the objective function value. In this algorithm, a weapon is randomly chosen from the list of unassigned weapons. A target is then selected such that the weapon's assignment achieves the maximum reduction in the objective function value. The process is repeated until no weapons remain unassigned. If the current solution yields a lower objective value than the previous solution, the previous solution is replaced with the current one because it provides better results. The entire process operates within a predefined time limit.

Although the Random MMR algorithm improves its results with each iteration, adjusting the solution is complex, as it requires reevaluating the weapon-target list from start to finish. Random MMR algorithm is built including the following steps in Fig. 3.

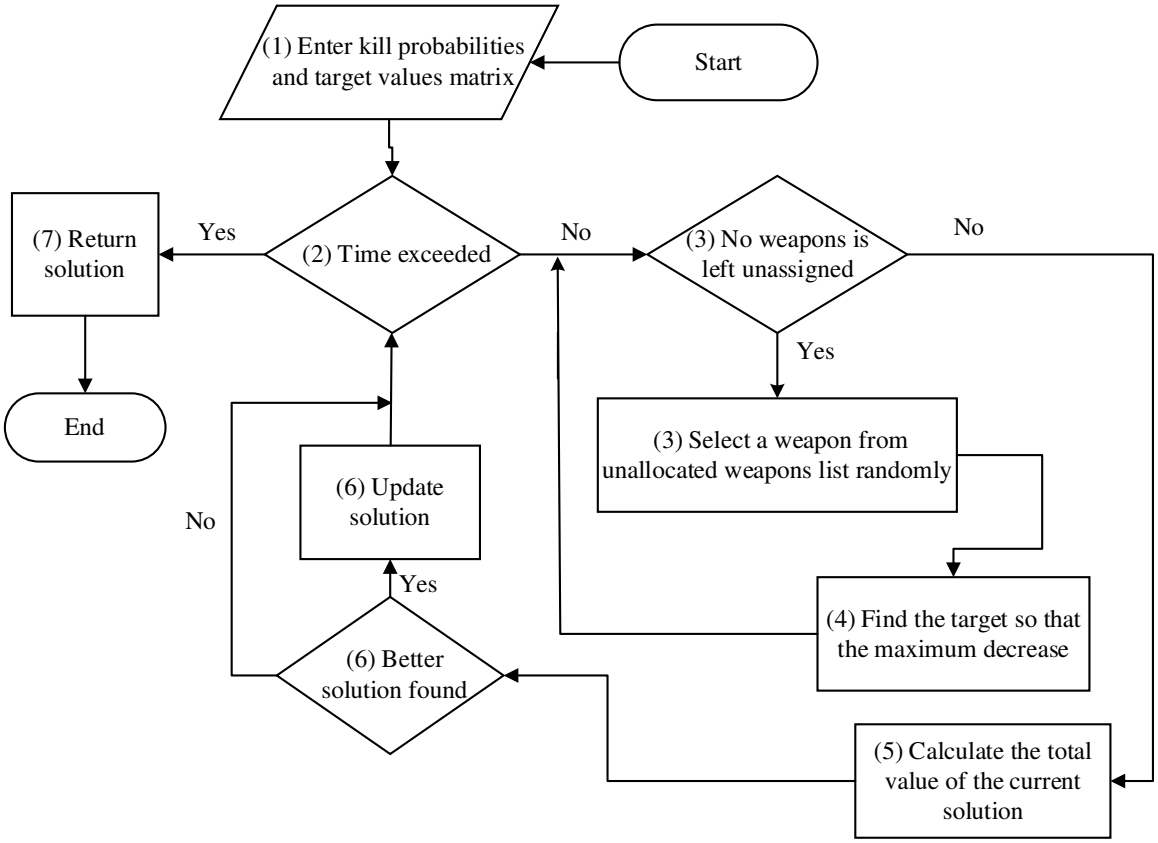


Figure 3. Flowchart of the Random MMR algorithm

Step 1: Create initial matrices for target values and probabilities of target destruction, with elements randomly generated in the range [0, 1].

Step 2: Check if the algorithm's execution time has exceeded the allowed limit. If so, proceed to Step 8. Otherwise, continue to the next step.

Step 3: Choose a weapon from the list of unassigned weapons. If all weapons have been assigned, proceed to Step 5. Otherwise, continue to the next step.

Step 4: Sequentially iterate through the list of targets, selecting a target for the current weapon such that the reduction in the objective function value is maximized. Return to Step 3.

Step 5: Recalculate the total objective function value after assigning a target to the weapon.

Step 6: Update the algorithm's solution if the current objective value is lower than the previous value. Return to Step 2.

Step 7: Output the assignment matrix (mapping targets to weapons) and the total target value after assignment[5][8].

2.3. Advanced MMR Algorithm

The Advanced MMR algorithm identifies weapon-target pairs to maximize the reduction in the solution value. The selection of which weapon to allocate next is based on the weapon-target pair that maximizes marginal gain.

Unlike previous algorithms, the Advanced MMR algorithm optimizes each weapon-target pair rather than first selecting a weapon and then optimizing the target for it. This approach increases the complexity of the algorithm but significantly improves its initial iteration results [8]. Advanced MMR algorithm is built including the following steps in Fig. 4.

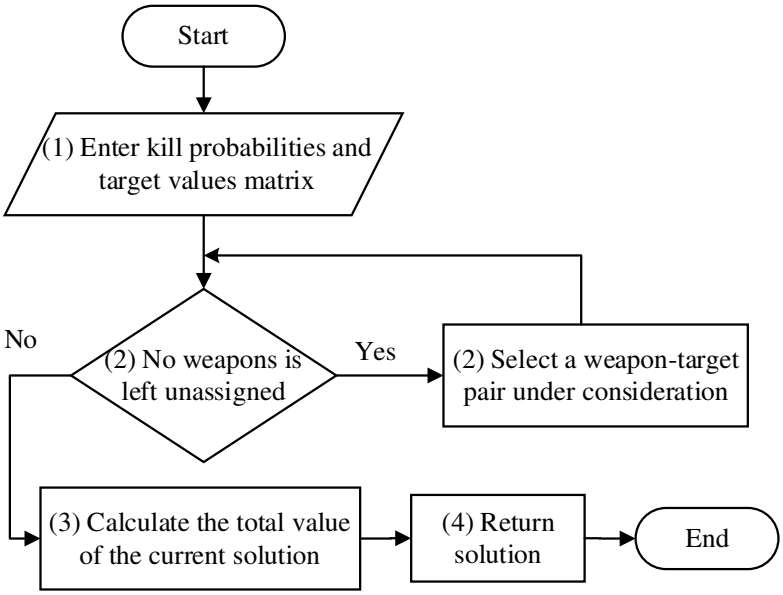


Figure 4. Flowchart of the Advanced MMR algorithm

Step 1: Create initial matrices for target values and probabilities of target destruction, with elements randomly generated in the range [0, 1].

Step 2: Iterate through all unassigned weapon-target pairs and select the pair that achieves the maximum reduction in the objective function value. If no unassigned weapons remain, proceed to Step 4.

Step 3: Recalculate the objective function value after assigning the target to the weapon.

Step 4: Output the assignment matrix (mapping targets to weapons) and the total target value after assignment.

Optimizing weapon-target pairs instead of optimizing targets for individual weapons partially addresses the local nature of the Greedy MMR algorithm. However, the results are still not fully optimal, and no mechanism currently exists to improve the computed results. This limitation calls for a method to re-evaluate alternative assignment options and make adjustments if a new solution yields better outcomes compared to the Advanced MMR algorithm's initial results[5].

3. Enhancing MMR algorithm with Local search

As discussed in previous sections, improving the solution value after obtaining the initial results from the Greedy MMR and Advanced MMR algorithms requires evaluating alternative solutions and comparing them to the initial results. A commonly used method for this purpose is the application of the Local Search algorithm.

Local search algorithm is built including the following steps in Fig. 4.

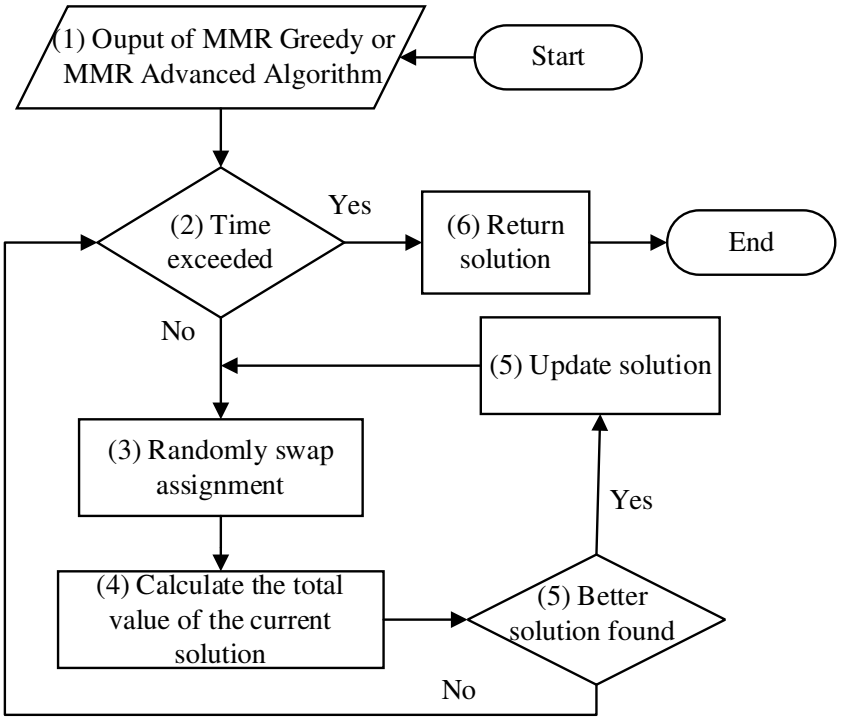


Figure 5. Flowchart of the Local Search algorithm

Step 1: The algorithm takes as input the weapon-target assignment matrix and the solution value returned by the Greedy MMR or Advanced MMR algorithms.

Step 2: Check if the algorithm's execution time has exceeded the allowed limit. If so, proceed to Step 6.

Step 3: Randomly select two elements from the weapon-target assignment matrix and swap their positions in the matrix.

Step 4: Calculate the new solution value.

Step 5: Update the algorithm’s result if the new solution is more optimal. Return to Step 2.

Step 6: Return the final solution value and the optimized weapon-target assignment matrix after applying the Local Search algorithm.

Although the implementation is relatively simple, applying Local Search significantly improves the problem's results while meeting the execution time requirements[4][5].

Below is an example illustrating the application of the Local Search algorithm to improve the results of the Advanced MMR algorithm:

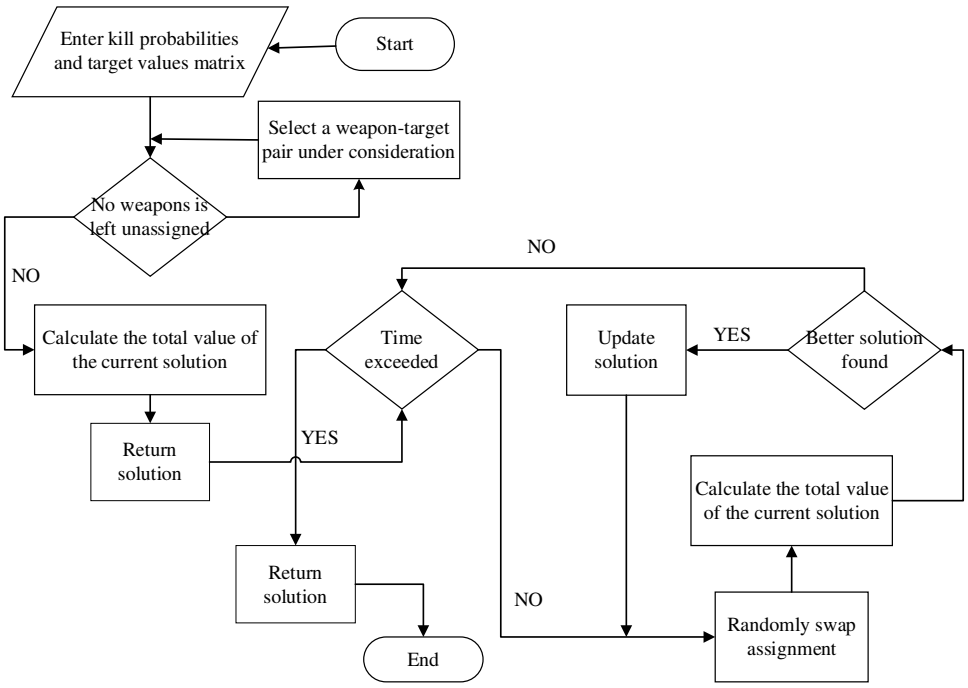


Figure 6. Flowchart of the Advanced MMR algorithm apply Local Search

4. Simulation Testing and Evaluation of Results

To evaluate and compare the effectiveness of the algorithms, we simulate various air defense scenarios by randomly generating target values and weapons with different kill probabilities for each target. Additionally, input parameters such as allowed search time and matrix size are varied to enhance objectivity. Since this paper serves as a foundation for researching, developing, and applying weapon-target assignment algorithms in real combat scenarios, we have designed a simple interface capable of integrating additional algorithms in the future, such as nature-inspired algorithms or artificial intelligence applications. We used a computer CPU Intel(R) Core(TM) i5-11400H @ 2.70GHz 2.69 GHz, RAM 8GB, Windows 11 OS. In the tests we evaluate the accuracy and effectiveness of the proposed method for different air defense scenarios. The input parameters of the problem such as the target's threat value, the kill probability and the cost of use of a missile for each weapon unit are randomly generated with independent distribution in the segment [0; 1]. As follows, We create a matrix of threat value of an aerial target $(0.5 \le V_i \le 1.0)$ and a matrix of 1 missile kill probability $(0.5 \le P_{ij} \le 1.0)$

Experiment 1: Experimenting with the Python to compare the performance between the improved MMR algorithm using local search and other MMR algorithms.

We input the number of weapons, the number of targets, and the allowed search time. Then, we use a matrix generation function to create a target value matrix and a weapon-to-target kill probability matrix, where the elements are assigned random values. The solution value is the value of the objective function described in Section 1 of the paper.

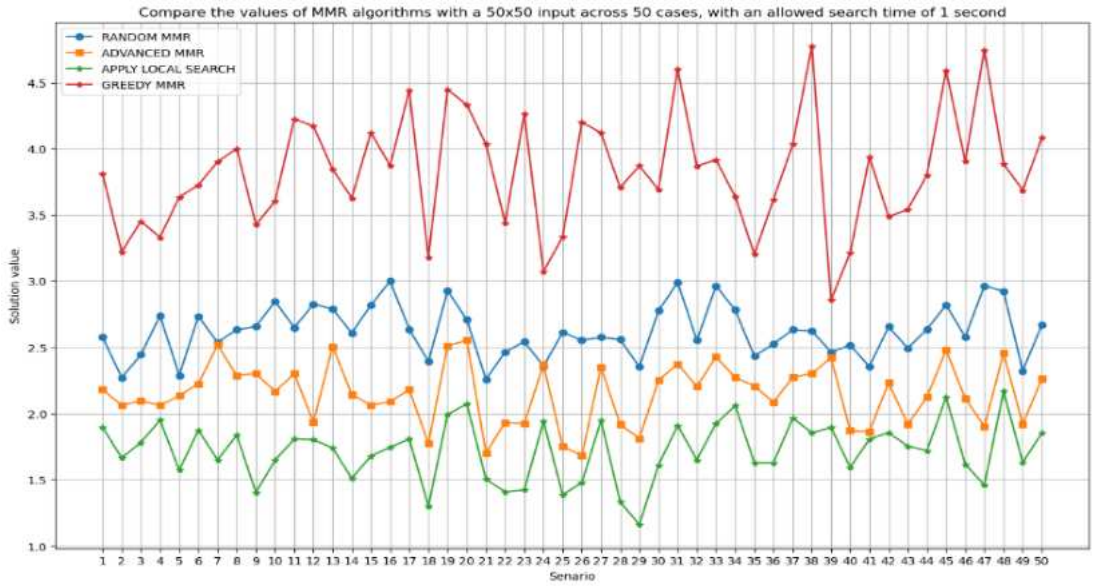


Figure 7. The solution results between the Advanced MMR algorithm using local search and other MMR algorithms

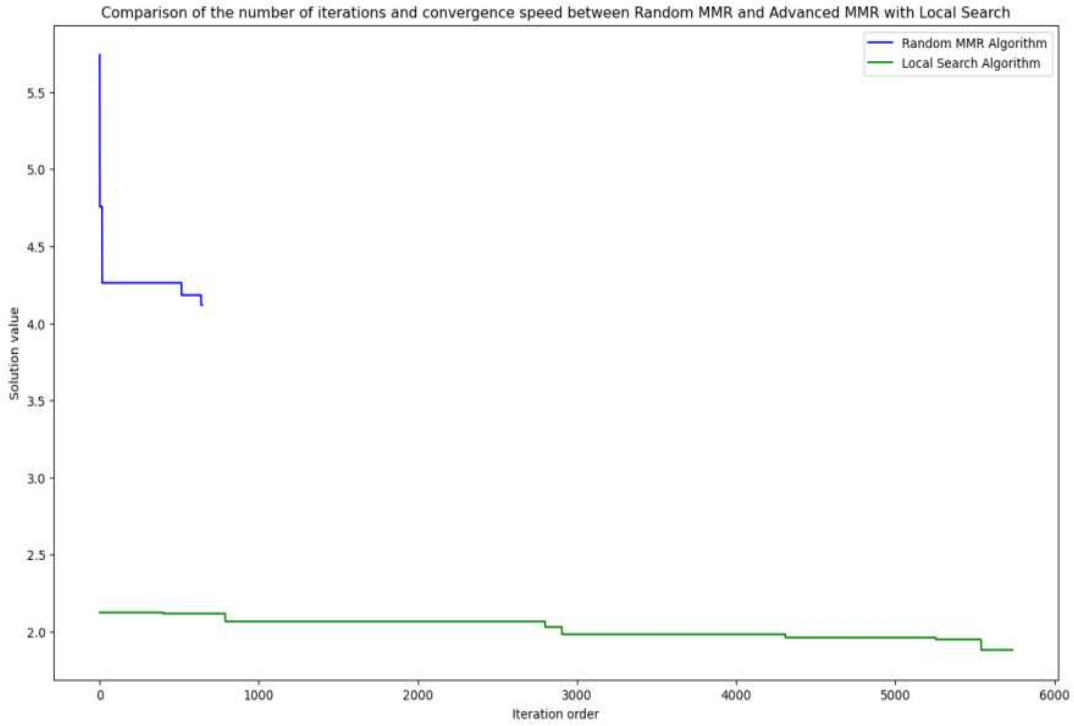


Figure 8. The convergence speed betwenn Random MMR and Advanced MMR apply Local Search

Experiment 2: Testing the applicability of the proposed algorithm in a C2 system. We developed a software interface using the Visual Studio C++ development toolkit and the MFC library. To evaluate the computational performance, the thesis develops a testing software using the C++ programming language on the Microsoft Visual Studio 2022 toolkit. The software simulates a terminal station of the air defense control system. In this software, we art create random various air defense scenarios. We developed a software module that applies the MMR algorithms to calculate the target's threat values, weapon – target assignment matrix and display them in real-time, with a large number of airborne targets, as shown in Figure 9.

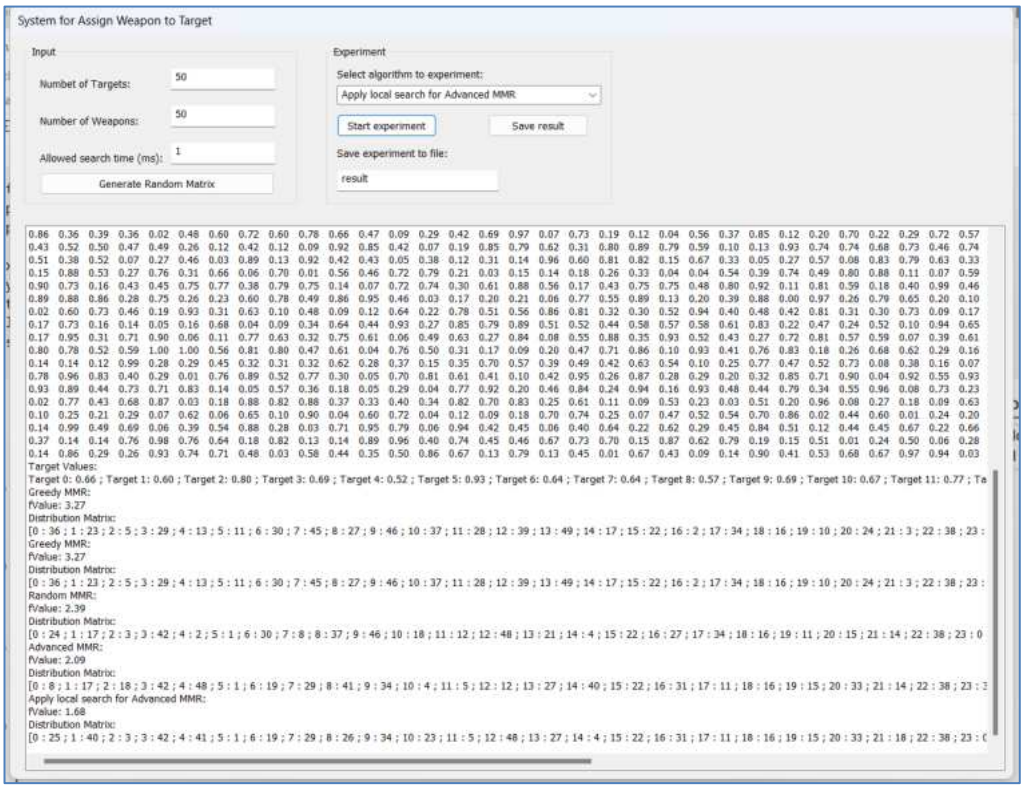


Figure 9. Software testing interface

Evaluation of Experimental Results

In Figure 7, we can see that the Advanced MMR algorithm applying Local Search is more optimal than the MMR algorithms in terms of calculation results and computation time in all given situations. Not only in terms of calculation results, when compared with the Random MMR algorithm regarding the speed of improving results in the global search space, the Advanced MMR algorithm applying Local Search shows a completely superior capability, as it can perform a higher number of iterations and yield a significantly greater number of result improvements. The results will be saved to a file after pressing the "Result" button in the experiment section.

The results returned by the software module align with the theoretical concepts and the simulation outcomes presented in the previous sections. The Advanced MMR algorithm with Local Search demonstrates complete optimization compared to other MMR algorithms. It consistently produces superior results by effectively exploring the solution space and leveraging local search to refine solutions. This approach not only ensures higher-quality outcomes but also achieves faster convergence, as evidenced by both theoretical analysis and experimental simulations.

5. Conclusion

This paper presents an approach for solving the weapon-target assignment problem using the advanced MMR algorithm and applying Local Search to improve the results. The problem's input is generated entirely randomly, ensuring a completely fair evaluation of the algorithm and providing objective results. The proposed algorithm has been tested using the Python programming language and the Visual Studio 2022 tool with the C++ programming language, utilizing the MFC library. It can be observed that the algorithm is suitable for application in the current C2 system, particularly in the context of a complex and multi-target operational environment. Specifically, within one second (fully meeting the real-time

requirements of combat scenarios), the algorithm has provided a relatively effective solution. However, the algorithm has only been applied to a static problem. In cases where the number of targets is fewer than the number of assigned weapons, all weapons are allocated to some target, meaning multiple weapons may be assigned to a single target in a non-sequential manner. This can lead to resource wastage despite achieving a very low objective function value.

References

[1] E. Lawler, *Combinatorial Optimization, Networks and Matroids*, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1976.

[2] C. H. Papadimitriou and K. Steiglitz, *Combinatorial Optimization—Algorithms and Complexity*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1982.

[3] L. Hammond, "Application of a Dynamic Programming Algorithm for Weapon Target Assignment," Weapons and Combat Systems Division, Defence Science and Technology Group, DST Group-TR-3221.

[4] R. K. Ahuja, A. Kumar, K. C. Jha, and J. B. Orlin, "Exact and Heuristic Algorithms for the Weapon-Target Assignment Problem," *Operations Research*, MIT.

[5] M.-K. Shin, D. Lee, and H.-L. Choi, "Weapon-Target Assignment Problem with Interference Constraints Using Mixed-Integer Linear Programming," *arXiv preprint*.

[6] A. C. Andersen, K. Pavlikov, and T. A. M. Toffolo, "Weapon-Target Assignment Problem: Exact and Approximate Solution Algorithms," *Annals of Operations Research*, 2022.

[7] F. Johansson and G. Falkman, "A Suite of Metaheuristic Algorithms for Static Weapon-Target Allocation," Informatics Research Centre, University of Skövde, Sweden.

[8] A. Turan, "Algorithms for the Weapon-Target Allocation Problem," M.Sc. Thesis, Department of Computer Engineering, Supervisor: Prof. Dr. Adnan Yazıcı, Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Halit Oguztuzun, July 2012.

Cải tiến thuật toán mmr áp dụng cho bài toán phân phối hỏa lực

Tóm tắt*: Bài toán phân bổ vũ khí - mục tiêu (WTA) trong hệ thống Chỉ huy và Điều khiển (C2) là một bài toán NP-hoàn chỉnh. Thuật toán lợi nhuận biên tối đa (MMR) tuy hiệu quả nhưng có hạn chế: phương pháp tham lam không đảm bảo tối ưu toàn cục, trong khi lựa chọn ngẫu nhiên có độ phức tạp tính toán cao. Chúng tôi đề xuất thuật toán MMR cải tiến với tìm kiếm cục bộ, gọi là MMR nâng cao với Tìm kiếm cục bộ, để tăng cường tối ưu hóa. Các mô phỏng trên Python xác nhận thuật toán vượt trội hơn MMR Tham lam và MMR Ngẫu nhiên. Kết quả cho thấy hiệu suất tính toán được cải thiện và đạt tối ưu toàn cục. Một giao diện C++ được phát triển để đánh giá theo thời gian thực trong hệ thống C2 qua nhiều kịch bản phòng không.*

Từ khóa: Chỉ định vũ khí, lợi nhuận cận biên, MMR, chỉ huy – điều khiển, phòng không.

Development of a new under-sampling method for accelerating magnetic resonance imaging scans

Khanh Pham Duc[1*], Thinh Dinh Vo Cong[1], Anh Quang Tran[2]

[1]*Department of Control Engineering, Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Vietnam*

Email: khanh.phamduc@lqdtu.edu.vn

Abstract

Compressive sampling (CS) in magnetic resonance imaging (MRI) is a signal processing technique that enables MRI scans to capture high-quality images with fewer data samples than traditional methods require. In this method, the CS-MRI will be applied on the raw data of MRI (K-space) due to its sparsity in this domain. Traditionally, regular and random under-sampling approaches are often used in CS-MRI for accelerating the process of image acquisition. However, the quality of image reconstructed from the under-sampled data is highly defined by the distribution of the under-sampled data in the k-space. In this research, we developed a new under-sampling method that can outweigh the traditional under-sampling methods for improving the efficiency of the CS-MRI. This proposed method is very useful for designing new MRI data acquisition strategies for reducing the imaging time of current MRI systems.

Keyword*: MRI, compressive sensing, under-sampling, MRI acceleration, k-space.*

1. Introduction

In the medical imaging field, MRI has revolutionized the diagnosis of diseases through images, based on the magnetic resonance phenomenon of hydrogen nuclei in tissues of imaged objects. In principle, objects are stimulated with radio pulses (RF) and resonator signals are received using RF coils. Rapid imaging in MRI is an important issue to improve the quality and resolution of images, to avoid the physiological effects on patients or to meet the time requirements when the imaged structures are dynamic. Lauterbur proposed to use the concept of k-space since 1973 for interpreting MR acquisition as Fourier encoding in 2D or 3D spaces[1]. In particular, information gathered by an MRI scanner is samples of the spatial Fourier change of an image. Subsequently, so as to get an image without aliasing artifacts, k-space samples need to fulfill the Nyquist sampling criterion. It has been well-known that, in the field of signal processing, the compressed sensing (CS) can be applied in MRI for accelerating the image acquisition [2-6]. The common strategy of these approaches is to exploit the redundancy of image data for reducing the sampling rate. Thus, the CS-MRI enables fast image acquisition by reducing the scanning time, so that it offers many advantages such as reducing patient burden, motion artifacts, and contrast washout. Since the first introduction of CS by Lustig et al.[6], many other studies have been developed using various sparsifying transforms and optimization algorithms.

In the traditional CS-MRI methods, random under-sampling approaches with fixed compression ratios are simply performed for obtaining the sampled horizontal lines in the binary mask, which are completely based on the power law. Interest signals can be reconstructed using nonlinear approaches such as basic pursuit (l1-BP) [1], orthogonal matching pursuit (OMP) [7], and non-linear gradient conjugate (NGC) [6, 8] . Difference from the simple conventional CS methods, recent the state-of-the-art CS methods have been reported with advanced reconstruction algorithms such as the structured Hankel matrix for solving the image quality degradation issues [9], the deep de-aliasing generative adversarial networks (DAGAN) can reduce aliasing artifacts [10, 11] and the stochastic deep CS for improving the

reconstruction of diffusion tensor cardiac MRI [12]. Although these advanced CS approaches offer undeniable advantages, the highly computational steps of the reconstruction algorithms are still required. The developments of new CS techniques utilizing the well-developed reconstruction algorithms without increasing the computational complexity are still highly recommended, which will ease the clinical workflow in real MRI systems.

In this study, we propose a new under-sampling method by performing random under-sampling in phase encoding directions with a fix amount of sampling data always taken around the original of k-space. In this proposed method, for a same compression ratio, the total number of sampled points is divided into two parts: (i) the large first part is still based on the random distribution in each phase encoding line; (ii) the small second part is densely distributed near the origin of k-space. Because the amount of encoded information is concentrated at the origin of the k-space, the proposed method suggests that the amount of useful information will be collected more and therefore the MRI image reconstruction will be more accurate. Our results based simulation studies have confirmed the significant improvement of image reconstruction fidelity from the original under-sampling methods. The utilization of well-developed reconstruction algorithms in this proposed under-sampling technique also avoid the highly computational complexity as required in many state-of-the-art CS methods.

2. Methods

2.1. MRI Image acquisition

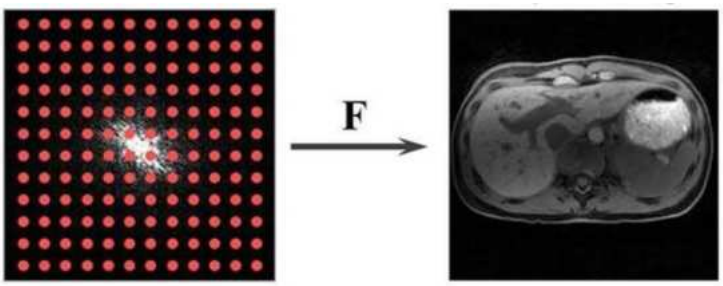
It is supposed that m(x, y) is a 2D image of a slice in the interest object. The analogue obtained signal by a collected coil in k-space is expressed as follows:

$$v(k_x,k_y)=\iint_{xy} m(x,y)e^{-i(k_x x+k_y y)}dxdy \tag{1}$$

where kx and ky are locations of the encoded information in axes x and y of the interesting slice. Using 2D-Fourier transform, m(x, y) can be obtained. The discrete form of Equation 1 is shown as follows:

$$v(k_x,k_y)=\sum_{n_x}^{N_x-1}\sum_{n_y}^{N_y-1} m(n_x,n_y)\ e^{-i(k_x x+k_y y)} \tag{2}$$

Where Nx and Ny are the total numbers of pixels along axes x and y of the slice, respectively. In this paper, the Cartesian trajectory is used for 2D imaging and the encoded information density of the k-space is followed by the power-law (Figure 1). Fig. 1a presents the k-space of an MR image of a brain slice. It can be seen that higher amplitudes of signals mainly concentrate around the origin of the k-space as shown by the bright domain at the center, which indicates more information is distributed at the origin. In practice, the most encoded information is concentrated at the origin due to the low frequencies of phase coding steps and the density of the k-space follows a power law [4, 13]. A full Cartesian sampling of the k-space followed the Nyquist criterion is indicated by red dots (samples) as in the Fig. 1a. By applying the 2-D FFT to the signal in k-space, the MR image can be reconstructed as shown in Fig. 1b.



(a) (b)

Figure 1. The relationship between the k-space domain and MR image. (a) Fully-sampled k-space with samples indicated by red dots. (b) a MR image is reconstructed from its respective k-space by Fourier transform (F) [13].

2.2. Fundamental compressive sampling

Supposed that $x \in R^N$ is the interest signal and it has a sparse linear representation in some domain with x=Φs, where $s \in R^N$ and $\Phi \in R^{N \times N}$ are respectively a L-sparse vector (the exact number of nonzero values in s is L) and the sparsifying matrix. In addition, x is assumed to be sensed by using a linear system $\Psi \in R^{M \times N}$, and then, the acquired measurements, $y \in R^M$, are defined by y = Ψx [14]. To recover x from y, which also corresponds to the recovery of s from y, because the obtained measurements can be expressed as y = Θs, where Θ=ΦΨ as shown in Figure 2 illustrating the basic principle of compressive sampling technique.

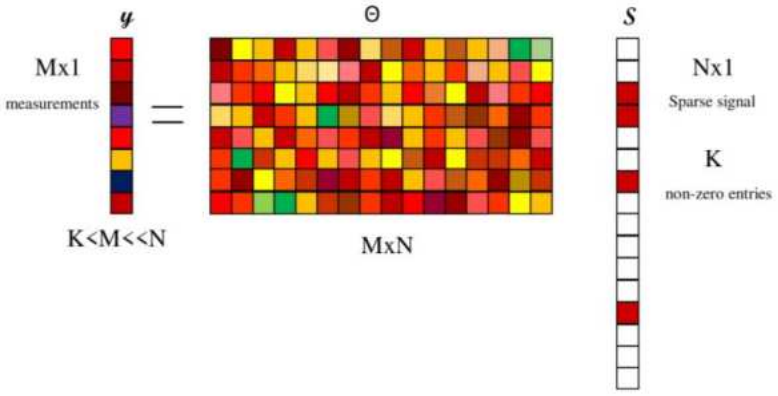


Figure 2. Illustration of basic compressive sampling principle.

In compressed sensing, measurement matrix, Ψ or Θ, is commonly underdetermined. One of the important conditions of CS is the restricted isometry property (RIP), which allows the robust recovery of certain input signals. The RIP condition is satisfied if the number of measurements $M \geq c*K*\log(N/K)$ in which c is a constant[15]. To exactly recover x, the RIP condition is ensured. This is equivalent to the problem that Φ is incoherent with Ψ[16]. When this condition is satisfied, s can be also dependably reconstructed from y, using sparse approximation approaches, such as l1-BP[1] or OMP[7]. In other work, compressed sensing for MRI imaging has been successfully applied by designing a random measurement matrix for data acquisition [17, 18].

2.3. Compressed sensing in MRI

For MR images, a high degree of the sparsity is needed because it suggests that data substance can be represented by a little information. One of these cases is MR angiography, where foundation tissue is ignored but the vessels are shown. It means that in the image domain, this kind of MR image is sparse. For other kinds of MR images, they are not sparse in the image domain but the transform domains [19]. There are several transform techniques such as the discrete wavelet transform (DWT), the discrete cosine transform (DCT), the fast Fourier transform (FFT), and finite difference operations, which can be used for representing the sparsity of these images. In this paper, we focus on MR images that are sparse in the wavelet and frequency domains. If the MR signal in the k-space is acquired with a small number of phase encoding steps, the acquisition time will be respectively reduced. Figure 3 illustrates realizable sampling and under-sampling designs that have been traditionally used in the CS-MRI. Figure 3.A and 3.B are classified as Cartesian sampled k-space by acquiring data with phase encoding steps. While Figure 3.A shows a full sampling followed the Nyquist criteria, Figure 3.B and Figure 3.C respectively show the number of samples is regularly and randomly reduced twice and Figure 3.C the number of samples is randomly reduced twice (the under-sampling ratio r is 0.5).

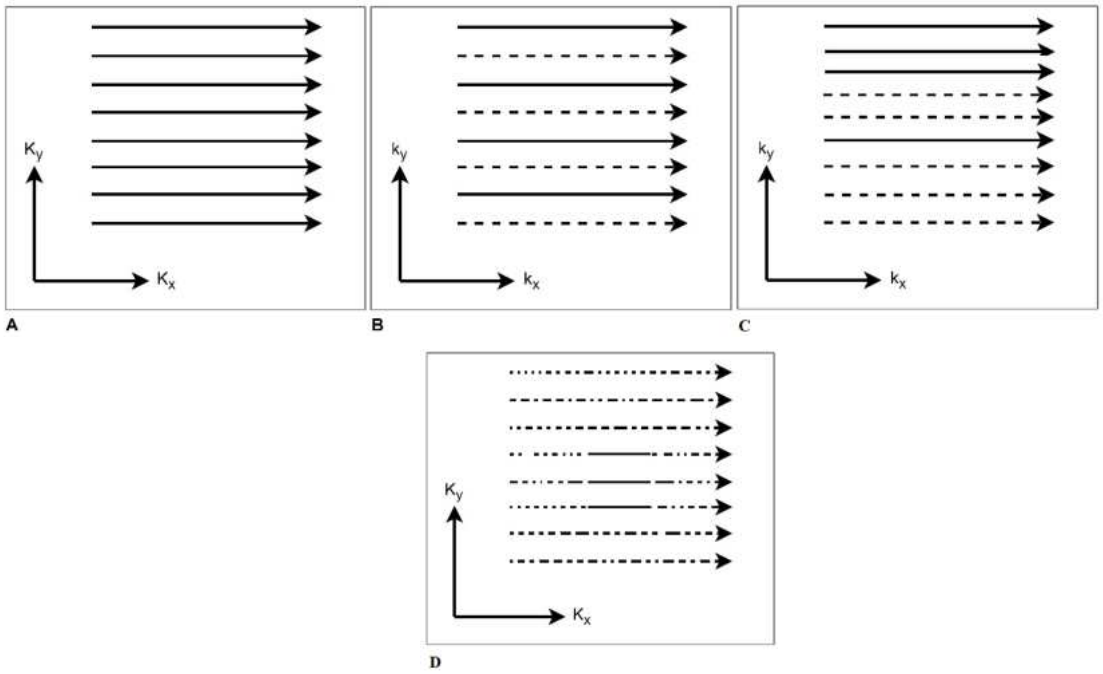


Figure 3. Some traditional sampling and under-sampling methods: (A) fully Cartesian sampled k-space, (B) regular under-sampling and (C) random under-sampling, and (D) the proposed under-sampling method by the same ratio.

In this study, we will propose a new under-sampling method based on randomly under-sampling in each phase encoding data (solid lines) with a consistent amount of data always taken near the original of k-space (Figure 3.D). This method will guarantee not only the incoherent criterion that is needed for the successful image reconstruction using compressive sensing, but also the low-frequency components of Fourier basis functions, which locate at the origin of k-space, are highly correlated with the basic functions of most sparsifying

transformations. Consequently, by collecting encoded information that locates around the origin of k-space, we are able to improve the performance of the MR image reconstruction.

To evaluate the performance of proposed methods, the normalized error is used to compare the error between the recovered object and the initial object. Assuming that m is an N×M initial object and $\hat{m}$ is the recovered object. The normalized error E can be expressed as follows:

$$\varepsilon = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \left| m_{ij} - \hat{m}_{ij} \right| \tag{3}$$

Another performance index, the universal image quality index (Q), is also used for evaluating the proposed under-sampling method as introduced by Wang and Bovik [20]. This index represents the distortion based on three different components: loss of correlation, luminance distortion, and contrast distortion. The Q index is defined as:

$$Q = \frac{4\sigma_{xy}.\bar{x}.\bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)[(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]} \tag{4}$$

Where $\bar{x}$ and $\bar{y}$ are the mean of the original image and the reconstructed one, respectively; σ_x^2 and σ_y^2 are the variances of x and y; and σ_{xy} is the covariance between x and y. The Q index varies between -1 and 1 (Q index reaches to 1 if two images are identical).

3. Results and discussion

3.1. Simulation results

To illustrate the advantage of the proposed method, the different under-sampling ratios r of 0.1, 0.25, and 0.35 are selected for evaluating the reconstructed images from the under-sampled date by all three investigated under-sampling methods. The selection of these ratios is based on the compressed sampling ratio ranging from 30% to 35% of the entire dataset, grounded on the experimental evaluation of image quality indices that differ with this sampling ratio. The data source used in the numerical simulation is original brain MR slice with a 128×128 image size as shown in Figure 4.

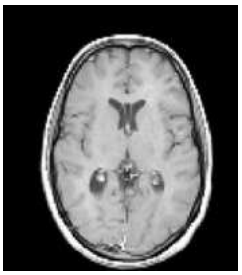


Figure 4. The original brain MR slice image.

Figure 5 presented the reconstructed brain MR slice images using the traditional and the proposed approaches with under-sampling ratios of 0.15, 0.25, and 0.35. It can be seen that the reconstruction quality of the proposed method is noticeably better than the traditional under-sampling methods for all under-sampling ratios. For the ratio of 0.35 (about 3 times acceleration as compared to the fully sampled k-space), the quality of the reconstructed image obtained from the

proposed method shows much better than others even the same amount of sampled data is taken from k-space. From these observations, it obviously confirms that the pattern of sampled data distribution is crucial to define the quality of the reconstructed image in CS-MRI.

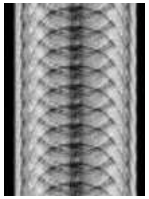
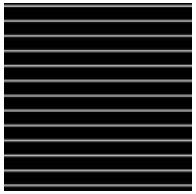
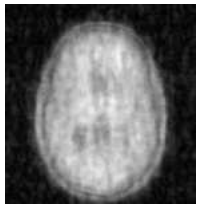
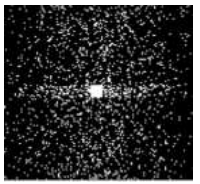
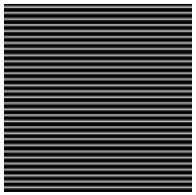
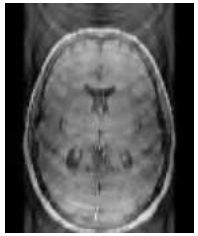
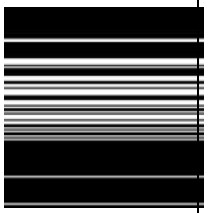
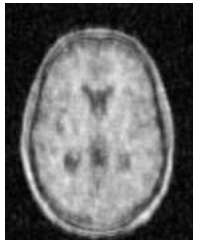
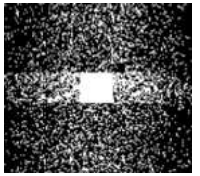
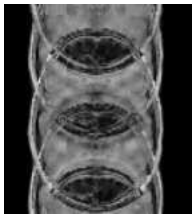
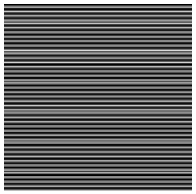
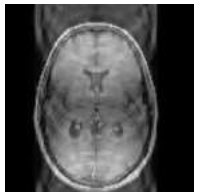
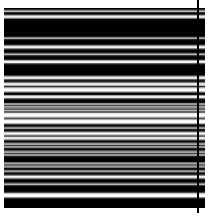
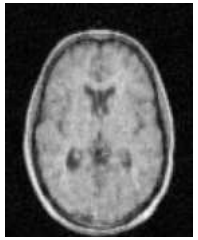
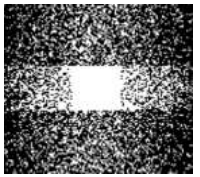
	Regular under-sampling approach		Random under-sampling approach		Proposed under-sampling approach	
	Reconstruction image	Pattern	Reconstruction image	Pattern	Reconstruction image	Pattern
r = 0.1						
r = 0.25						
r = 0.35						

Figure 5. The reconstructed brain MR slice images using three different under-sampling ratios of 0.15, 0.25, and 0.35.

To quantitatively evaluate the efficiency of this proposed under-sampling method, a series of different under-sampling ratios r from 0.1 to 0.5 is statistically simulated (average of 30 simulations). Generally, the quality of the reconstructed image can be acceptable for a very low under-sampling ratio of 0.25, while it is not the case of the traditional methods of regular and random under-sampling method. Importantly, the simulation of the proposed under-sampling method also indicates that the image reconstruction method noticeably outweighs the traditional methods in terms of the image quality based on different image quality indexes (E, Q-index), especially for the low under-sampling ratios. The averaged error E and Q-index of 30 different simulations are shown in Figure 6. It can be seen that the E (left) and Q-index (right) calculated by the new method are significantly lower than the value calculated by the traditional methods, especially at the compression ratio of 0.3.

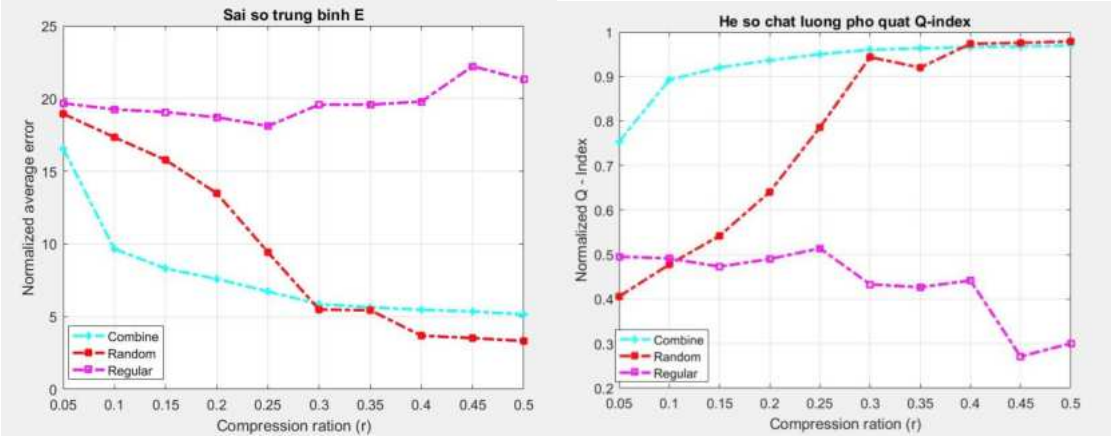


Figure 6. The dependence of the normalized average error E (left) and the Q-index (right) different under-sampling ratio for the investigated under-sampling methods.

3.2 Discussions

The compressed sensing reconstruction implements sparsity of the solution to suppress the incoherent aliasing artifacts and maximizes data consistency between the solution and the available under-sampling data. As shown in Figure 6, the average error of the proposed method decreased about at least 2 times as compared to the traditional methods in the range of under-sampling ratio between 0.1 and 0.3. These observations clearly confirmed that the new proposed under-sampling can be used to accelerate the MRI acquisition without significantly affecting the image reconstruction as compared to the traditional methods samples of regular and random under-samplings. The regular under-sampling method has shown the worst efficiency as it created the aliasing artifacts on the reconstructed images, while the random method has image quality, but its stability is low due to completely random distribution of the sampled data in k-space.

It is well-known that the energy distribution of the k-space is followed by the Gauss distribution, so more high-energy points are located around the center of the k-space. In the new proposed under-sampling method, a certain amount of sampled data is always taken around the origin of k-space when the rest part of sample data is randomly distributed. This under-sample method ensures the important information around the center of k-space is always selected and the random under-sampled data guarantees the incoherence criteria in the compressed sensing methods.

4. Conclusion

For the first time, we propose a simple and efficient under-sampling approach based simulations is suggested in this research for quality improvements of MRI image reconstruction using compressive sensing. Based on the fact that more information is concentrated at the origin of the k-space, instead of using the traditional regular and random under-sampling approaches, a new under-sampling is proposed with randomly under-sampled in each phase-encoding step and a certain amount of sampled data always taken around the center of k-space. The statistical simulations have confirmed the efficiency of the appointed under-sampling method as compared to the investigated traditional under-sampling methods, which is highly beneficial for developing new MRI data acquisition strategies aimed at reducing the imaging time of existing MRI systems.

References

1. Lauterbur, P.C., *Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance.* Nature, 1973. **242**: p. 190-191.
2. Ong, F., R. Heckel, and K. Ramchandran. *A Fast and Robust Paradigm for Fourier Compressed Sensing Based on Coded Sampling*. in *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2019.
3. Li, Y., et al., *Chaotic-Like K-Space Trajectory for Compressed Sensing MRI.* Journal of Medical Imaging and Health Informatics, 2015. **5**(2): p. 415-421.
4. Phong, D.V., et al. *Fast image acquisition in magnetic resonance imaging by chaotic compressed sensing*. in *2011 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro*. 2011.
5. Tran Duc, T., et al. *Accelerated parallel magnetic resonance imaging with multi-channel chaotic compressed sensing*. in *The 2010 International Conference on Advanced Technologies for Communications*. 2010.
6. Lustig, M., D. Donoho, and J.M. Pauly, *Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging.* Magnetic Resonance in Medicine, 2007. **58**(6): p. 1182-1195.
7. Tropp, J.A. and A.C. Gilbert, *Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit.* IEEE Transactions on Information Theory, 2007. **53**(12): p. 4655-4666.
8. Candes, E.J., J. Romberg, and T. Tao, *Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information.* IEEE Transactions on Information Theory, 2006. **52**(2): p. 489-509.
9. Jin, K.H., D. Lee, and J.C. Ye, *A General Framework for Compressed Sensing and Parallel MRI Using Annihilating Filter Based Low-Rank Hankel Matrix.* IEEE Transactions on Computational Imaging, 2016. **2**(4): p. 480-495.
10. Yang, G., et al., *DAGAN: Deep De-Aliasing Generative Adversarial Networks for Fast Compressed Sensing MRI Reconstruction.* IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018. **37**(6): p. 1310-1321.

11. Yu, S., et al., *Deep De-Aliasing for Fast Compressive Sensing MRI.* IEEE Transactions on Medical Imaging, 2017. **37**: p. 1310 - 1321.
12. Schlemper, J., et al., *Stochastic Deep Compressive Sensing for the Reconstruction of Diffusion Tensor Cardiac MRI*, in *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention* 2018. p. 295-303.
13. Feng, L., et al., *Compressed sensing for body MRI.* Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2017. **45**(4): p. 966-987.
14. Sandilya, M. and S.R. Nirmala, *Compressed sensing trends in magnetic resonance imaging.* Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017. **20**(4): p. 1342-1352.
15. Candes, E.J. and T. Tao, *Decoding by linear programming.* IEEE Transactions on Information Theory, 2005. **51**(12): p. 4203-4215.
16. Candès, E. and J. Romberg, *Sparsity and incoherence in compressive sampling.* Inverse Problems, 2007. **23**(3): p. 969-985.
17. Haldar, J.P., D. Hernando, and Z. Liang, *Compressed-Sensing MRI With Random Encoding.* IEEE Transactions on Medical Imaging, 2011. **30**(4): p. 893-903.
18. Lustig, M., et al., *Compressed Sensing MRI.* IEEE Signal Processing Magazine, 2008. **25**(2): p. 72-82.
19. Yoon, J.H., et al., *Rapid Imaging: Recent Advances in Abdominal MRI for Reducing Acquisition Time and Its Clinical Applications.* Korean journal of radiology, 2019. **20**(12): p. 1597-1615.
20. Zhou, W. and A.C. Bovik, *A universal image quality index.* IEEE Signal Processing Letters, 2002. **9**(3): p. 81-84.

Phát triển phương pháp lấy mẫu thưa mới để tăng tốc tạo ảnh chụp cắt lớp cộng hưởng từ hạt nhân

Tóm tắt: *Lấy mẫu nén (CS) trong chụp cộng hưởng từ (MRI) là một kỹ thuật xử lý tín hiệu cho phép thu nhận ảnh MRI chất lượng cao với số lượng dữ liệu thu nhận ít hơn so với các phương pháp tạo ảnh truyền thống. Trong phương pháp này, việc thực hiện CS-MRI sẽ được áp dụng trên dữ liệu thô của MRI (không gian tần số K) do đặc tính thưa thớt của nó trong miền này. Thông thường, các phương pháp lấy mẫu thưa tuần tự và ngẫu nhiên thường được sử dụng trong CS-MRI để tăng tốc quá trình thu nhận hình ảnh. Tuy nhiên, chất lượng của hình ảnh được tái tạo từ dữ liệu lấy mẫu thưa lại được xác định chủ yếu bởi cách phân bố của dữ liệu trong không gian tần số K. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã phát triển một kỹ thuật lấy mẫu thưa mới cho kết quả vượt trội hơn so với các phương pháp truyền thống nhằm nâng cao hiệu suất của phương pháp CS-MRI. Kỹ thuật được đề xuất này sẽ rất hữu ích trong việc thiết kế các giải pháp thu nhận dữ liệu MRI mới để rút ngắn thời gian chụp của các hệ thống MRI hiện tại.*

Từ khóa: MRI, lấy mẫu nén, lấy mẫu thưa, tăng tốc độ tạo ảnh MRI, không gian tần số K

Development of a cost-effective polymerase chain reaction device

Trần Đình Chiến[1], Vương Trí Tiếp[2], Trần Anh Quang[2]

[1]*Lớp KTYSNC 35 - Hệ 2 - Học viện kỹ thuật Quân sự;* [2]*BM ĐTYS, Học viện kỹ thuật quân sự*

Tranchien.hvktqs@gmail.com; Tel: 0969626383

Abstract

Polymerase Chain Reaction (PCR) is a powerful laboratory technique used to amplify small segments of DNA, making millions to billions of copies of a specific DNA sequence for various applications. In Vietnam, PCR devices are commonly equipped in most hospitals and many research facilities. However, most of these devices are highly expensive and have to be imported from abroad. In this research, we develop an inexpensive PCR device for biomedical engineering applications. This device is based on self-designed circuit boards and mechanical parts. We optimize hardware and thermally controlling program with the Proportional-Integral-Derivative (PID) algorithm for reducing the cost and improving efficiency of the device. Practical tests on this device have shown promising results which are comparable with some other commercial devices. This opens a chance for the design and manufacture of less costly PCR devices that can be applied to different fields in Vietnam.

Keywords: *Polymerase Chain Reaction; thermal cycler; PID.*

1. Introduction

The Polymerase Chain Reaction (PCR) machine, also known as a thermal cycler [2, 11, 12, and 18], is a crucial technology in the field of molecular biology, designed to replicate and amplify specific segments of Deoxyribonucleic Acid (DNA). With the rapid advancements in molecular biology research, the demand for PCR machines with high precision, flexibility, and cost-effective production has become increasingly important. In Vietnam, PCR equipment is commonly installed in most hospitals and many research institutions. However, the majority of these devices are highly expensive and must be imported from abroad. Mastering the technology and being able to research and develop low-cost PCR machines is essential.

The challenge lies in optimizing the performance of PCR machines, including integrating new technologies, optimizing control algorithms, and improving hardware design. The core component of PCR devices is the temperature control system, which must meet stringent requirements due to the precise thermal control demands of the PCR process. Some proposed control solutions involve using Proportional-Integral-Derivative (PID) temperature control systems to ensure fast heating and cooling rates while maintaining high precision in PCR devices [5, 7, and 10]. However, optimizing the control algorithm in conjunction with hardware, particularly designing a suitable heating unit, plays a critical role in the performance of thermal cycling processes.

In this study, the authors researched and developed a PCR device based on a highly stable PID temperature control system, with an optimized control program and appropriately designed hardware. Experimental tests on this device have shown promising results, comparable to some commercial devices. This opens up opportunities for designing and manufacturing low-cost PCR machines that can be applied across various fields in Vietnam.

2. Methods

2.1 The principle of PCR

The PCR technique is based on the enzymatic replication of DNA. The key principle of this method is based on the natural process of DNA replication but is performed in vitro [19]. In PCR, a short segment of DNA is amplified using primer mediated enzymes. DNA Polymerase synthesises new strands of DNA complementary to the template DNA. The DNA polymerase can add a nucleotide to the pre-existing 3'-OH group only. In general, PCR amplifies a target DNA sequence exponentially by cycling through three main steps as shown in Figure 1.

Step 1: Denaturation:

The double-stranded DNA (targe DNA) is heated to a high temperature (usually 94–98°C) to break the hydrogen bonds between the complementary strands, separating them into two single strands.

Step 2: Annealing:

The reaction is cooled (typically 50–65°C) to allow short, single-stranded DNA primers (specific to the target sequence) to bind (anneal) to their complementary sequences on the single-stranded DNA. The primer nucleic acid sequences are chosen to flank the target region, so that on amplification the target is increased.

Step 3: Extension (or Elongation):

The temperature is raised to an optimal level for DNA polymerase activity (usually 72°C for Taq polymerase), allowing the enzyme to synthesize a new DNA strand by adding nucleotides complementary to the template strand, starting from the primer.

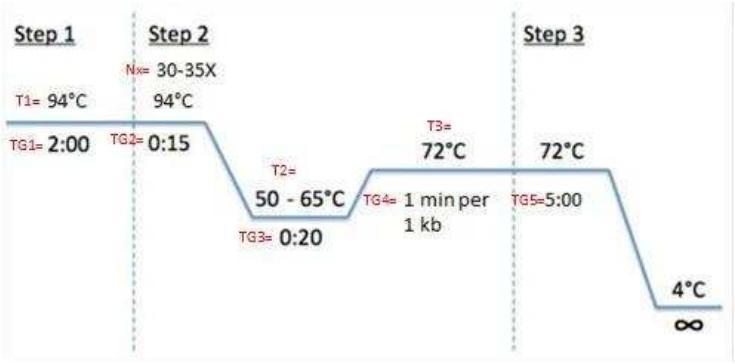


Figure 1. The thermal cycling process of the machine.

PCR then continues with additional cycles that repeat the aforementioned steps. The newly synthesized DNA segments serve as templates in later cycles, which allow the DNA target to be exponentially amplified millions of times. Each cycle doubles the number of DNA molecules, resulting in exponential amplification. For example, after n (usually 25-30) cycles, the DNA quantity is theoretically 2^n times the starting amount. Finally, the mixture of products is kept at 7° C to protect the DNA from damage overnight.

2.2 Technical methods

The technical method of the PCR hardware is designed to optimize performance and ensure accuracy during thermal cycling. The main steps include:

- **Powering the device**: The machine is powered on, and a touchscreen is used to customize and set up the thermal cycling program through a Human-Machine Interface (HMI) screen.
- **Thermal cycling process**:
  Determine the maximum heating rate, cooling rate, and temperature accuracy/uniformity (±0.5°C).
- **Executing the PCR protocol**:
  - Initial step: Heat the mixture at 96°C for 5 minutes.
  - Perform denaturation (melting) at 96°C for 30 seconds.
  - Annealing at 68°C for 30 seconds.
  - Elongation at 72°C for 45 seconds.
  - Repeat steps 2 to 4 approximately 25 times (adjustable based on requirements).
  - Hold the mixture at 7°C overnight to protect the DNA.
- **Temperature Control and Heat Lid**: Ensure that temperature is accurately controlled according to specifications. Use a heat lid to prevent evaporation, ensuring stability during the PCR process.
- **Computer Interface**: Connect to a computer via a Universal Serial Bus (USB) port to log data and monitor the PCR process.

The technical method is developed to achieve precision and flexibility in executing PCR cycles while providing user interaction and adjustable settings.

2.3 The design of hardware and control program

Based on the tecnical method of the PCR device, the hardware is developed as illustrated in the block diagram in Figure 2 and the connection diagram in Figure 3. The main component of the device is the central processing unit (MCU), which uses the ATmega2560 IC by Atmel. This MCU is chosen to meet the computational speed requirements, ensuring efficient processing and control. Temperature signals read from sensors are pre-processed and sent to the central processing unit, which controls the power block to achieve the desired temperature based on the PID control algorithm. The communication system includes an HMI screen, control buttons, and computer software, allowing users to configure operating modes, monitor device status, and display warnings during operation.

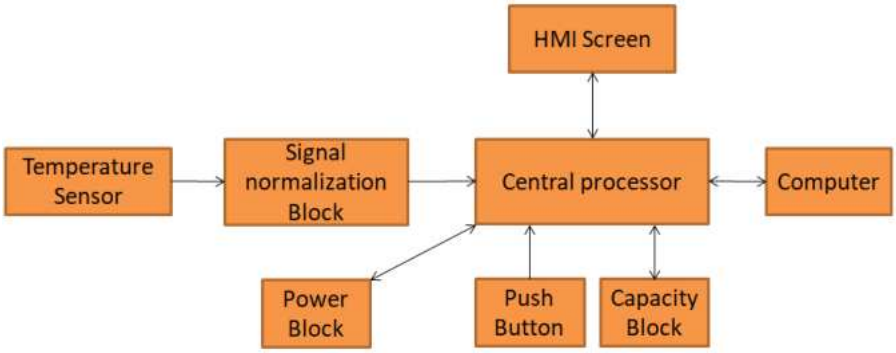


Figure 2. Block diagram of the PCR device

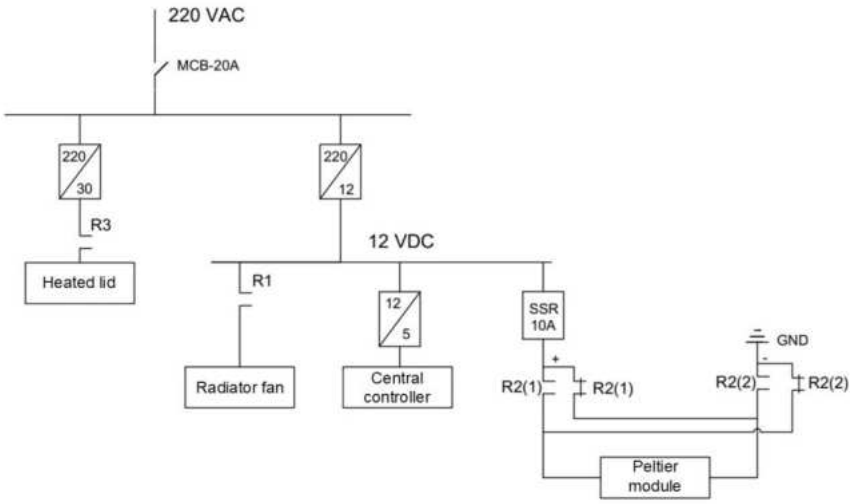


Figure 3. The electrical connection diagram of the device

The selection of temperature sensors and heating elements plays a crucial role in determining the quality of thermal cycling, which significantly impacts the amplification efficiency of the PCR device. In this study, the signal conversion and normalization block for the PT1000 temperature sensor is designed to standardize voltage signals in the range of 0–5 VDC, making them convenient for reading and processing.

The heating element chosen is the Peltier thermoelectric module, a type of electronic device that converts electricity into a temperature gradient. When powered, one side of the Peltier module absorbs heat from its surroundings and becomes cold, while the other side releases heat and becomes hot. With a supply voltage (up to 15.5 VDC), the Peltier module can generate a significant temperature difference, with one side becoming extremely cold and the other intensely hot. This makes Peltier modules widely used in temperature control applications such as CPU cooling systems, mini refrigerators, or medical devices.

In this study, the hardware and control software are designed to meet the technical requirements of the PCR device as follows:

- **Maximum heating rate**: 4°C/second;
- **Cooling rate**: 3°C/second;
- **Temperature accuracy/uniformity**: ±0.5°C;
- **Heat lid**: Includes a heat lid to prevent evaporation.

2.4. The design of mechical parts

The mechanical design process for the PCR thermal cycler typically includes the following steps:

- **Requirement analysis**: Identify the functional and technical requirements of the PCR thermal cycler, including precise temperature control, system stability, compatibility with various sample types, and safety standards.
- **Research and architectural design**: Create an overall architectural diagram of the PCR thermal cycler, determining the location and dimensions of key components such as the temperature block, sensors, display screen, and other parts.
- **Detailed design**: Design each specific component of the PCR thermal cycler, including the temperature block, temperature sensors, heating and cooling systems, control unit, and display screen.
- **Simulation and testing**: Use simulation software to test the performance of the design, ensuring that the PCR thermal cycler operates as expected and meets technical requirements.

- **Prototyping**: Build a prototype of the PCR thermal cycler to test the performance and reliability of the design. Conduct tests under both real-world conditions and controlled environments to ensure that the thermal cycler operates reliably and accurately.
- **Optimization and adjustments**: Based on the test results, make adjustments and optimize the design to improve the performance and reliability of the PCR thermal cycler.
- Following these requirements, the research team has completed the detailed mechanical design of the PCR thermal cycler.

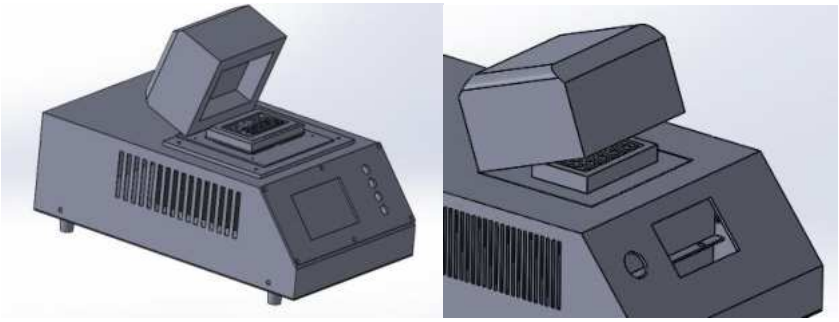


Figure 4. 3D design of the machine

3. Results

3.1. Hardware

The hardware structure of the device after construction and assembly is shown in Figure 5. The display and control buttons are arranged at the front of the device, ensuring convenience during operation and use. The heating components are designed on both the bottom and the lid, which remain sealed during operation. The specific parameters of the device are summarized in Table 1.

The primary performance parameters of the machine are designed to meet the basic requirements of commercial electric PCR machines commonly available in medical facilities across the country. The sample chamber has a capacity that allows for the amplification of 96 different samples in a single run, with a temperature accuracy of ±0.1°C and a rapid temperature change rate (3°C/second), ensuring high amplification efficiency for the device.

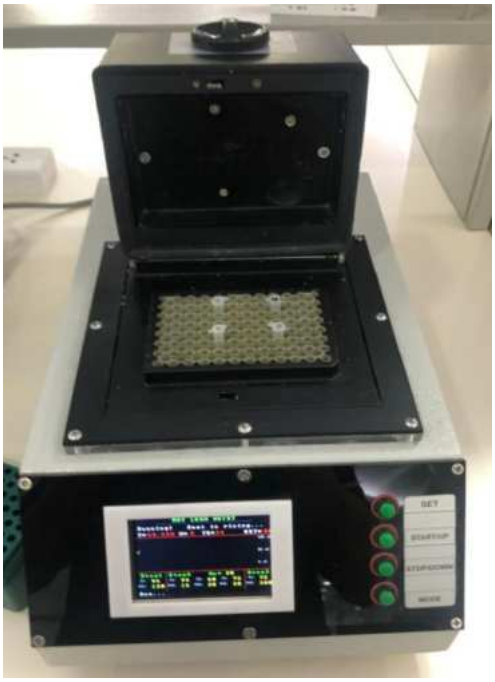


Figure 5. Image of the thermal analyzer

Table 1. Evaluation table of test results

Specifications	Test results
Sample volume	96 positions for 0.2 ml PCR tubes, 0.2 mL×12 PCR 8 strips or 96-well plates.
Heating temperature	From 4°C to 105 °C
Cap temperature	From 30°C to 110°C
Temperature display accuracy	±0,1 °C
Uniform temperature at 55 °C	<0,3 °C
Maximum heating/cooling rate	3 °C / second
Temperature gradient setting range	From 30°C to 99 °C
Gradient range	From 1-42 °C
Thermal block structure	Aluminum
Power off protection	Yes
Power	200-240V, 50/60Hz
Size [W × D × H]	280 × 370 × 250 mm
Weight	11 kg

3.2. Evaluation of the PCR device with samples

After being fully assembled, the device underwent testing and comparison with commercial devices available at the Testing Center of the 108 Central Military Hospital. These tests were conducted with particular attention to the performance, accuracy, and reliability of the device in diagnosing and analyzing test samples, ensuring that it meets medical standards as illustrated in Figure 6. Test samples were placed at various positions within the sample well tray to evaluate the uniformity of the device's internal heating components.

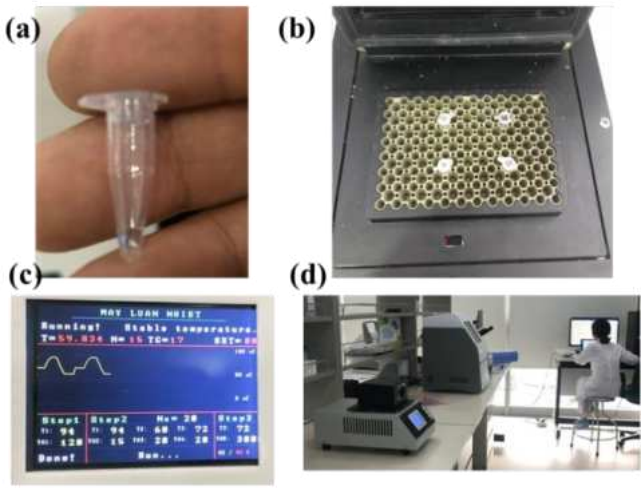


Figure 6. Image of the thermal analysis machine test at the hospital.a) DNA sample is prepared in an 500uL eppendorf tube, b)the sample tubes are placed at different positions in the chamber, c)The PCR parameters are set up on the screen of the device, d)The PCR device is performed under supervision of technicians.

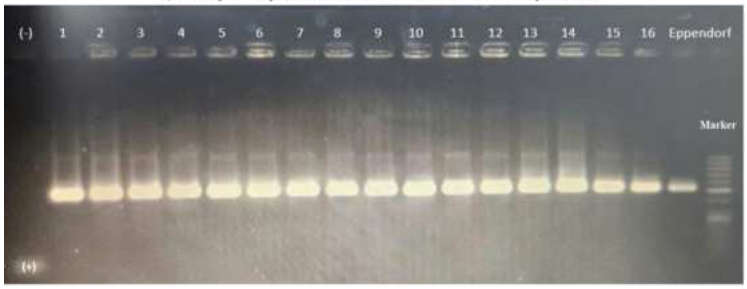
The test results demonstrated successful amplification across 16 samples placed at different positions (Figure 7a). Testing the device with samples positioned as shown in the

figure allowed for an evaluation of the uniformity of the thermal cycling component within the device. The target DNA samples were contained in 500 µL Eppendorf tubes, which were securely sealed during amplification.

The heating element located on the lid of the device plays a critical role in maintaining stable temperatures within the tubes and preventing sample evaporation. After 27 amplification cycles (27CT) on the PCR device, the results for the 16 samples are shown in Figure 7b, with distinct characteristic bands visible on the electrophoresis gel for all samples, aligning clearly with the marker bands on the right. These results demonstrate the device's effectiveness and uniformity in DNA amplification across all sample positions within the chamber.



a) 16 samples are placed at different wells in the device for amplification



b) The amplification of 16 samples are captured by the agarose gel electrophoresis machine

Figure 7. The results of practical evaluation with the developed PCR device

Conclusion

In this study, we successfully developed a cost-effective PCR device optimized for biomedical engineering applications in Vietnam. By employing self-designed hardware and a PID-based thermal control system, the device demonstrated high uniformity and efficiency in DNA amplification, with performance comparable to commercial alternatives. Practical testing confirmed the reliability and effectiveness of the system across multiple samples, validating its potential for various diagnostic and research applications. This achievement not only provides a viable solution to the high cost of imported PCR devices but also lays the foundation for further innovation in locally manufactured biomedical equipment, contributing to the advancement of molecular biology research and healthcare in Vietnam.

Reference

1. Chunxiao Liu; Jin Zhu; Yushan Xie; Zewen Yang. (2021). *Design of PID Temperature Control System for RNA Virus Detection.* IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE)
2. J. Yan, X. F. Chen, J. F. Xiong, J. C. Jiang, F. X. Xia and J. H. He. (2021). "Effect of the thermal inactivation on SARS-CoV-2 at different temperatures on real-time quantitative PCR detection[J]", *Laboratory medicine and clinical practice*, vol. 18, no. 02, pp. 214-216.
3. M. Z. Shen, Y. Zhou, J. W. Ye et al.(2020). "Recent advances and perspectives of nucleic acid detection for coronavirus", *Journal of Pharmaceutical Analysis*, vol. 10, no. 02, pp. 97-101.

4. B. W. Alto, B. R. Wasik, N. M. Morales and P. E. Turner. (2013). "Stochastic temperatures impede RNA virus adaptation[J]", *Evolution*, vol. 67, no. 04, pp. 969-979.
5. A. R. Song, D. L. Zhou and Y. L. Liu. (2021). "Design of the boiler temperature control system based on incremental PID control[J]", *Electronic measurement technology*, vol. 44, no. 06, pp. 11-16.
6. X. G. Jiang, W. L. Wang and S. X. Qi. (2000). "High-precision PID temperature controller [J].(In Chinese)", *Electronics and Automation*, no. 05, pp. 13-15.
7. J. L. Song, Y. Zhang and W. C. Zhao. (2021). "Research on Control Strategy of Pneumatic Soft Actuator Based on Fuzzy PID Algorithm[J]", *Mechanical Engineer*, no. 07, pp. 52-54.
8. X. R. Ren and L. X. Ma. (2021). "Research on the main steam temperature control system based on fuzzy PID load tracking[J]", *Electronics technology*, vol. 34, no. 05, pp. 18-23.
9. Y. S. Cai, J. Zhu, L. Shi and J. Z. Zhang. (2021). "Fuzzy Adaptive PID Control of Large Aperture Fast Steering Mirror[J]", *Infra-red technique*, vol. 43, no. 06, pp. 523-531.
10. T. Y. Feng, Y. Wang and J. J. Ma. (2017). "Application of conventional incomplete differential type PID algorithm in electro-hydraulic actuator control[J]", *Microcomputer and Application*, vol. 36, no. 24, pp. 4-7.
11. Ji Li, Shihao Liu, Shilin li. (2020). *PCR Instrument Temperature Control System Based on Multimodal control*. Chinese Control And Decision Conference (CCDC)
12. Chunxiao Liu, Xiaobo Li, Haoming Chen, Yun Yan. (2021). *Constant temperature control system based on RNA virus detection*. Chinese Control Conference (CCC).
13. Pan Aixian, Zhao Weihua and Chen Dezeng. (2008, May). "Temperature Control of Gene Amplification (PCR) Analyzer", *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, pp. 823-827.
14. Chen Shi et al. (2007). "Research progress of PCR temperature control technology", *Measurement and Control Technology*, no. 11, pp. 20-22+26.
15. Zhang Wenchao, Liu Xiaoguang and Wu Qinqin. (2004). "Research and Application of Temperature Control System for Gene Amplification Analysis (PCR) Instrument", *Journal of East China University of Science and Technology*, no. 02, pp. 203-206.
16. He Qixin et al. (2017). "Multichannel Semiconductor Laser Temperature Control System", *Acta Optica Sinica*, vol. 37, no. 11, pp. 187-194.
17. Peng Shaokang, Wang Huaijie and Liu Yuxian. "Research on Temperature Control of PCR Instrument Based on Fuzzy PID Control Algorithm", *Instrument Technology*, vol. 016, no. 03, pp. 34-371.
18. Xu Xiufeng et al. "Time-delay temperature control system for PCR based on Smith.
19. Bustin, S.A. (2009). The PCR Revolution: Basic Technologies and Applications. 1-325.

Tóm tắt: *Phản ứng Chuỗi Polymerase (PCR) là một kỹ thuật phòng thí nghiệm mạnh mẽ được sử dụng để khuếch đại các đoạn DNA nhỏ, tạo ra hàng triệu đến hàng tỷ bản sao của một trình tự DNA cụ thể cho nhiều ứng dụng khác nhau. Tại Việt Nam, các thiết bị PCR thường được trang bị tại hầu hết các bệnh viện và nhiều cơ sở nghiên cứu. Tuy nhiên, phần lớn các thiết bị này có giá rất cao và phải nhập khẩu từ nước ngoài. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả phát triển một thiết bị PCR giá rẻ cho các ứng dụng trong kỹ thuật y sinh. Thiết bị này được chế tạo dựa trên các bo mạch và các bộ phận cơ khí tự thiết kế. Các thiết kế phần cứng và chương trình điều khiển với thuật toán PID được tối ưu hóa để giảm chi phí và nâng cao hiệu quả của thiết bị. Các thử nghiệm thực tế trên thiết bị này đã cho thấy kết quả đầy hứa hẹn, có thể so sánh với một số thiết bị thương mại khác. Điều này mở ra cơ hội cho việc thiết kế và sản xuất các thiết bị PCR giá rẻ, có thể ứng dụng vào nhiều lĩnh vực khác nhau tại Việt Nam.*

Từ khóa: Chỉ định vũ khí, lợi nhuận cận biên, MMR, chỉ huy – điều khiển, phòng không.

Điều hướng robot có nhận thức xã hội: Tự động điều hướng có tính đến yếu tố cảm xúc của con người

Phạm Trần Quyền Anh*, Phạm Trung Dũng, Trần Công Tân, Trương Xuân Tùng
Bộ môn Tự động & Kỹ thuật tính, Viện TL và KTĐK, Học viện Kỹ thuật Quân sự
* Email: anhquyentp34@gmail.com ; Điện thoại: 0986 745 900

Tóm tắt

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là tích hợp thuộc tính cảm xúc của con người vào hệ thống điều hướng cho robot hai bánh vi sai có khả năng nhận thức xã hội, nhằm đảm bảo sự thoải mái về mặt tâm lý và an toàn về mặt vật lý cho cả con người và robot. Nghiên cứu sử dụng thông tin về con người từ môi trường mô phỏng Gazebo để xác định vùng không gian cá nhân dựa trên trạng thái cảm xúc của họ. Các tác giả đã thiết kế một số tình huống mô phỏng và kiểm tra ba trạng thái cảm xúc: tích cực (vui vẻ), trung tính và tiêu cực (giận dữ).Kết quả mô phỏng cho thấy rằng việc tích hợp yếu tố cảm xúc vào vùng không gian cá nhân có tác động đáng kể đến điều hướng của robot, tâm lý thoải mái, sự an toàn của con người và robot. Cụ thể, khi một người đang giận dữ, robot nên điều hướng xa hơn khoảng cách tiêu chuẩn để tăng cường cảm giác an toàn và thoải mái. Ngược lại, việc giảm khoảng cách điều hướng không được khuyến khích ngay cả khi người đó đang vui vẻ, nhằm tránh xâm phạm không gian cá nhân một cách không mong muốn. Để đánh giá tác động này, nghiên cứu sẽ sử dụng bộ chỉ số SII (Social Interaction Index) nhằm đo lường mức độ an toàn và thoải mái trong các thí nghiệm mô phỏng. Chỉ số này cung cấp cơ sở định lượng để phân tích tác động của các trạng thái cảm xúc khác nhau đến hành vi điều hướng của robot, đảm bảo kết quả nghiên cứu có tính khách quan và đáng tin cậy.

Từ khóa: *Robot tự hành hai bánh vi sai; bản đồ chi phí phân lớp; robot có nhận thức xã hội; điều hướng robot; mô hình không gian cá nhân.*

1. Giới thiệu về nghiên cứu

Một hệ thống điều hướng robot có nhận thức xã hội hiệu quả không chỉ dừng lại ở việc tránh chướng ngại vật, mà còn phải hoạt động cùng con người trong môi trường động với sự tương tác xã hội. Để tạo ra hành vi điều hướng hiệu quả và được xã hội chấp nhận bài khảo sát [1] đã đề xuất 8 nguyên tắc mà robot phải tuân theo đó là: an toàn; thoải mái; dễ hiểu; lịch sự; tuân thủ các quy tắc và tiêu chuẩn hành vi được chấp nhận trong xã hội; robot phải hiểu và phân tích được trạng thái cảm xúc, ý định và hành vi của con người để đưa ra phản ứng thích hợp; robot cần chủ động điều chỉnh hành vi dựa trên hoàn cảnh thay đổi mà không cần sự can thiệp trực tiếp từ con người và cuối cùng robot phải điều chỉnh hành vi phù hợp dựa trên bối cảnh cụ thể. Việc tuân thủ các nguyên tắc trên là chìa khóa để robot được con người chấp nhận và ngăn ngừa gây ra bất kỳ sự khó chịu nào[2]. Từ lập luận trên, nhóm nghiên cứu nhận thấy nguyên tắc robot phải hiểu và phân tích được trạng thái cảm xúc của con người để đưa ra phản ứng thích hợp là một phần không thể tách rời của điều hướng robot có nhận thực xã hội. Hầu hết các thuật toán điều hướng robot hiện đại hoạt động trong môi trường giả định rằng tất cả con người đều có cùng một trạng thái cảm xúc. Tuy nhiên, cảm xúc có tác động đáng kể đến hành vi của con người trong tương tác với robot. Cảm xúc của con người sẽ thay đổi giới hạn không gian cá nhân của người đó [3].Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu mở rộng hệ thống điều hướng robot có nhận thức xã hội. Trong đó, thuộc tính cảm xúc của con người được xem xét để tạo ra các quỹ đạo cho robot. Các quỹ đạo được tạo ra đã đáp ứng được nguyên tắc đảm bảo an toàn và tâm lý thoải mái cho con người. Hệ thống giả định rằng thuộc tính cảm xúc của con người đã được xác định bao gồm 3 trạng thái đó là tích cực, tiêu cực và trung tính. Trạng thái cảm xúc này được mô hình hóa bằng bản đồ chi phí phân lớp.

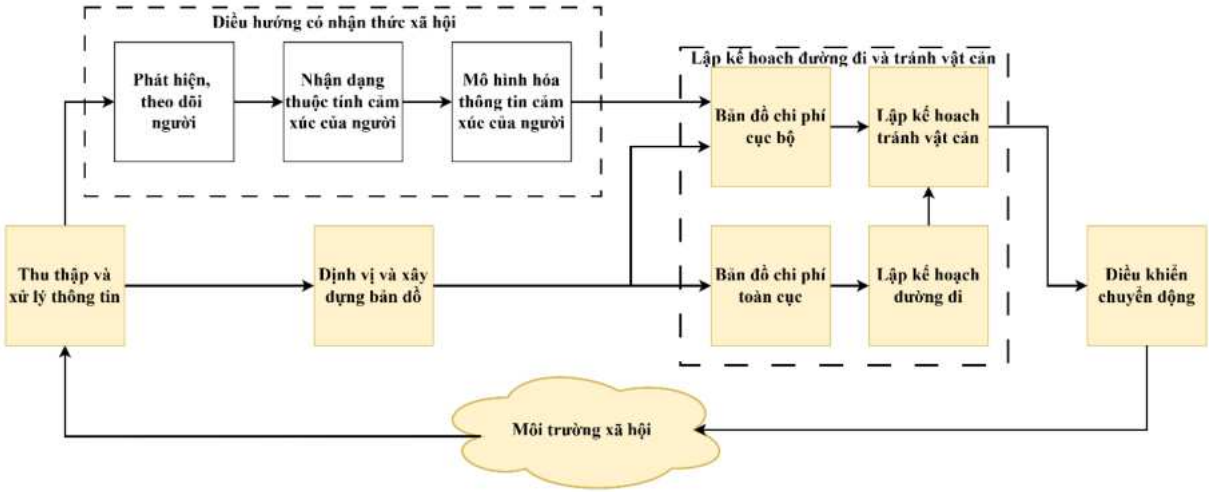
2. Các nghiên cứu liên quan

Điều hướng robot có nhận thức xã hội có ích cho việc hỗ trợ robot di động tạo những hành vi được xã hội chấp nhận. Để tạo ra các hành vi được xã hội chấp nhận, robot phải hiểu hành vi của con người trong môi trường xã hội. Edward T. Hall và cộng sự đã đề xuất các tiêu chí proxemic cho con người xác định 4 vùng không gian xung quanh con người: (i) vùng không gian thân mật, (ii) vùng không gian cá nhân, (iii) vùng không gian xã hội và (iv) vùng không gian công cộng [4]. Để một robot có những hành vi được xã hội chấp nhận, nó phải tránh xâm nhập vào vùng không gian cá nhân của con người. Các phương pháp điều hướng robot cho phép robot di động tiếp cận con người đã được nghiên cứu kỹ lưỡng trong những năm qua. Có những thuật toán được sử dụng rộng rãi để lập kế hoạch đường dẫn trên môi trường tĩnh như Dijkstra, A*, D* [5], D* Lite [6] và RRT* [7]. Ngoài ra, các phương pháp nói trên được nghiên cứu cho môi trường tĩnh và động nhưng không có phương pháp nào trong số chúng có thể đạt được điều hướng xã hội. Một robot di động có thể tiếp cận một người đang đứng, di chuyển hoặc ngồi bằng cách sử dụng các khung tiếp cận con người thông thường. Phương pháp tiếp cận cửa sổ động (DWA) [8] cung cấp cơ chế tránh va chạm cho robot di động trong môi trường năng động. DWA chọn cách tốt nhất để tiếp cận hoặc vượt qua con người bằng cách rút ra một ước tính gần đúng quỹ đạo của robot và hu mans. Các nhà nghiên cứu đã điều tra sở thích của mọi người về cách tiếp cận khi ngồi và trình bày chiến lược lập kế hoạch con đường dựa trên chi phí để bắt chước những sở thích này [9]. Trong một nghiên cứu khác, các tác giả đã đề xuất một khuôn khổ cho phép robot di động sử dụng thông tin không gian để thiết lập và duy trì đối thoại với các cá nhân đang đứng [10]. Các khuôn khổ này chủ yếu được thiết kế để tiếp cận một người. Mặc dù chúng có thể được sử dụng để tránh chướng ngại vật và tạo quỹ đạo không va chạm trong môi trường có con người sinh sống, nhưng chúng không mang lại sự an toàn về thể chất cho con người. Một cách khác để tiếp cận con người là sử dụng sơ đồ chi phí dựa trên lý thuyết proxemics. Hệ điều hành robot (ROS) [11] cung cấp các plugin sơ đồ chi phí nhiều lớp và cho phép người dùng làm việc với các lớp riêng biệt như bản đồ tĩnh, chướng ngại vật, lạm phát và các lớp do người dùng chỉ định khác (ví dụ: sơ đồ chi phí xã hội, cảm biến phạm vi). Plugin này có thể đăng ký các đối tượng và con người, sau đó thay đổi sơ đồ chi phí bằng cách thêm chi phí Gaussian xung quanh các đối tượng và con người đã đăng ký. Bằng cách sử dụng các chi phí bổ sung này, robot có thể điều hướng xung quanh mọi người trong quỹ đạo không va chạm bằng cách tôn trọng vùng cá nhân của họ [12]. Mô hình lực lượng xã hội (SFM) [13] là một phương pháp khác để mô tả chuyển động của người đi bộ. SFM không chỉ được sử dụng để dự đoán hành vi của người đi bộ mà còn có thể được sử dụng như một công cụ quy hoạch địa phương [14]. Một cách tiếp cận khác đề xuất một sơ đồ học tập có thể học hành vi điều hướng của con người bằng cách quan sát họ. Cách tiếp cận này có lợi ích là thích ứng với các điều kiện khác nhau và tăng hiệu quả theo thời gian chỉ bằng cách học về các quan sát. Cách tiếp cận này cố gắng sử dụng mô hình hành vi của con người trên người lập kế hoạch địa phương. Học tăng cường sâu được sử dụng trong [15] cho một robot di động để học hành vi điều hướng của con người bằng cách sử dụng DQN.[16] Sử dụng phương pháp diễn viên-phê bình để học tăng cường để tạo mô hình cho robot di động. [17] Mở rộng cách tiếp cận dải đàn hồi thời gian bằng cách dự đoán hành vi của con người và sử dụng thông tin này để tạo ra một kế hoạch điều hướng xã hội. Hơn nữa, tâm trạng và tình trạng cảm xúc của mọi người có thể ảnh hưởng đến hành vi của họ. Ví

dụ, trong tâm trạng tiêu cực, tốc độ đi bộ cơ bản của người đi bộ có khả năng giảm [18]. Điều này cũng có thể ảnh hưởng đến khoảng cách ưa thích của họ trong vùng proxemic tùy thuộc vào tâm trạng của họ, tức là không gian cá nhân của một người có thể giảm hoặc tăng tùy thuộc vào tâm trạng của họ [19]. Có một số nghiên cứu liên quan đến việc sử dụng cảm xúc của con người vào các biểu tượng của robot trong tài liệu điều hướng xã hội. Một trong số chúng [20] sử dụng ước tính cảm xúc từ cả khuôn mặt và quỹ đạo của người đi bộ để tạo quỹ đạo cho robot hình người. [21] Đề xuất một vùng proxemic có thể điều chỉnh tùy thuộc vào tâm trạng của mọi người. Mặc dù đây là một công việc tương tự như công việc của chúng tôi, nhưng chúng tôi cũng đã tiến hành một cuộc khảo sát toàn diện hơn để điều tra các vùng tương ứng thích ứng tùy thuộc vào cảm xúc giữa tương tác giữa con người- con người và con người- robot, cũng như kỳ vọng đối với trẻ em và người già trong cùng một tình huống.

3. Điều hướng robot có nhận thức xã hội tính đến yếu tố cảm xúc của con người

Bài báo này đề xuất một cở sở điều hướng cho robot có thể tích hợp thuộc tính cảm xúc của con người nhằm tạo ra quỹ đạo tránh người đứng yên đảm bảo đảm an toàn và tâm lý thoải mái cho con người. Hình 1 cho thấy kiến trúc của hệ thống được đề xuất. Hệ thống bao gồm hai phần: 1) điều hướng cơ bản và 2) điều hướng có nhận thức xã hội. Phần đầu tiên bao gồm khối thu thập và xử lý thông tin, khối định vị và xây dựng bản đồ, khối lập kế hoạch đường đi và tránh vật cản và khối điều khiển chuyển động. Phần thứ hai bao gồm khối phát hiện, theo dõi người, khối nhận dạng thuộc tính cảm xúc của người và khối mô hình hóa thông tin cảm xúc của người.



Hình 1. Hệ thống được đề xuất bao gồm 2 phần: Phần điều hướng có nhận thức xã hội và phần điều hướng cơ bản

3.1. Phát hiện, theo dõi người

Khối phát hiện, theo dõi người có nhiệm vụ phân biệt người với các đối tượng khác trong môi trường hoạt động của robot đồng thời duy trì cung cấp thông tin về vị trí của người cho hệ thống điều hướng của robot. Trong bài báo này, môi trường hoạt động của robot được mô phỏng bằng phần mềm Gazebo [22]. Thông tin phát hiện, theo dõi người được trích xuất từ thông tin về trạng thái của môi trường mô phỏng (model state) do phần mềm Gazebo tạo ra. Bằng kỹ thuật này, nhóm nghiên cứu đã giải quyết bài toán phát hiện, theo dõi người trong

môi trường mô phỏng. Sau khi người được phát hiện, theo dõi, việc tiếp theo là nhận dạng cảm xúc của người đó.

3.2. Nhận dạng thuộc tính cảm xúc của con người

Nhóm nghiên cứu sử dụng thuộc tính cảm xúc của con người để tăng hoặc giảm bán kính của vùng tương tác xã hội được sử dụng để mô hình hóa cho thông tin về cảm xúc của con người. 3 cảm xúc khác nhau đã được sử dụng đó là: 1) Vui vẻ, 2) Giận dữ và 3) Trung lập hoặc không xác định. Bán kính vùng tương tác xã hội của cá nhân được chọn cho cảm xúc như sau: đối với một người có cảm xúc hạnh phúc, nó là 1,3 m, đối với một người có cảm xúc trung lập, nó là 1,65 m và đối với một người có cảm xúc giận dữ, nó là 2,0 m.

3.3. Mô hình hóa thông tin cảm xúc của con người

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng mô hình không gian xung quanh con người được đề xuất trong [23] và sử dụng nó để tích hợp thông tin cảm xúc của người. Theo đó mô hình không gian cá nhân và xã hội được sử dụng để mô phỏng vùng lân cận của con người trong môi trường robot sẽ bao gồm: Không gian cá nhân cơ bản, không gian cá nhân mở rộng, không gian tương tác xã hội động (Dynamic Social Zone- DSZ).

3.3.1. Không gian cá nhân cơ bản

Theo [23], không gian cá nhân cơ bản xung quanh người pi được mô hình bằng hàm Gaussian hai chiều $f_i^p(x,y)$ có giá trị cực đại tại tâm $\left(x_i^p, y_i^p\right)$ và giảm dần khi ra xa khỏi $\left(x_i^p, y_i^p\right)$. Phương trình (1) biểu diễn mô hình không gian cá nhân cơ bản xung quanh người pi.

$$f_i^p(x,y) = A^p exp\left(-\left(\frac{\mathrm{d}\cos\left(\theta-\theta_i^p\right)}{\sqrt{2}\sigma_0^{px}}\right)^2 + \left(\frac{d\sin\left(\theta-\theta_i^p\right)}{\sqrt{2}\sigma_0^{py}}\right)^2\right) \quad (1)$$

Trong đó, d, θ, và θ_i^p được tính như sau:

$$d = \sqrt{\left(x-x_i^p\right)^2 + \left(y-y_i^p\right)^2} \quad (2)$$

$$\theta = atan2\left(\frac{\left(y-y_i^p\right)}{\left(x-x_i^p\right)}\right) \quad (3)$$

$$\theta_i^p = \begin{cases} \theta_i^{pv} \text{ nếu } v_i^p > 0, \\ \theta_i^{ph} \text{ nếu } v_i^p = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Ở đây, (x,y) là tọa độ của một ô trong bản đồ lưới $\mathbf{M}_{\text{n, m}}$, $\left(x_i^p, y_i^p\right)$ và θ_i^p , θ_i^{pv}, θ_i^{ph} là vị trí, hướng, hướng chuyển động và hướng ánh nhìn của người pi tương ứng. A^p là biên độ đã chọn, và σ_0^{px} và σ_0^{py} là độ lệch chuẩn của hàm Gaussian. Một tập hợp ba tham số chính $[A^p; \sigma_0^{px}; \sigma_0^{py}]$ phụ thuộc vào vận tốc và hướng nhìn được sử dụng cho hàm $f_i^p(x,y)$. Hình 2b minh họa một ví dụ về không gian cá nhân cơ bản với các đường viền được thiết lập bởi tập tham số [1; 0,45; 0,45].

3.3.2. Không gian cá nhân mở rộng

Không gian cá nhân mở rộng là không gian được tính toán bằng cách kết hợp không gian cá nhân cơ bản với các yếu tố bổ sung như thông tin di chuyển của người, tư thế tay, hướng nhìn. Không gian cá nhân mở rộng của người pi được định nghĩa trong Phương trình 5 và được thể hiện trong Hình 2c như sau:

$$f_i^{eps}(x,y) = max\left(w_1 f_i^{p}(x,y), w_2 f_i^{lh}(x,y), w_2 f_i^{rh}(x,y)\right) \quad (5)$$

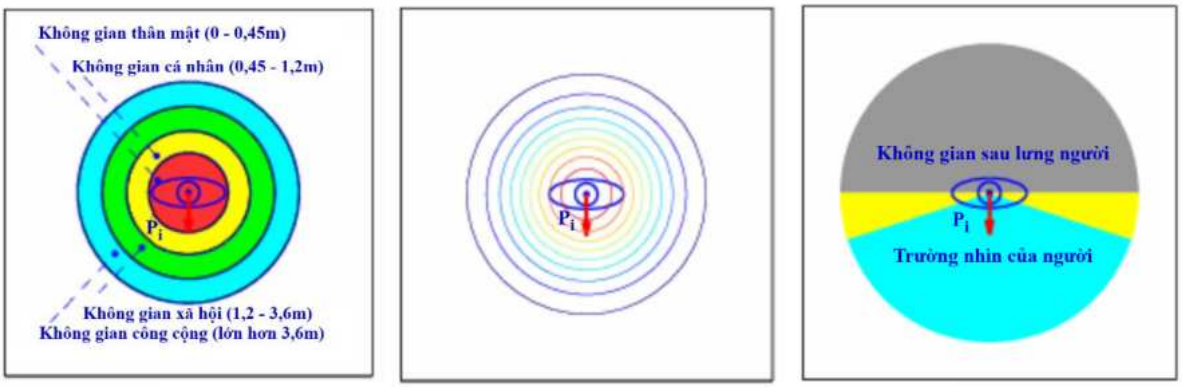
Trong đó $f_i^{p}(x,y)$, $f_i^{lh}(x,y)$, $f_i^{rh}(x,y)$ lần lượt là mô hình không gian cá nhân cơ bản, tay trái, tay phải sử dụng hàm Gaussian. Hàm $F_{eps}(x,y)$ biểu diễn không gian cá nhân mở rộng của tất cả con người trong vùng lân cận của robot, được tính theo Phương trình 6.

$$F_{eps}(x,y) = max\left(f_1^{eps}(x,y), \dots, f_N^{eps}(x,y)\right) \quad (6)$$

3.3.3. Không gian tương tác xã hội động

Không gian tương tác xã hội động (DSZ) là không gian được tính toán bằng cách kết hợp không gian cá nhân mở rộng và không gian tương tác xã hội. DSZ được định nghĩa theo Phương trình 7. Nó được tích hợp vào hệ thống lập kế hoạch chuyển động để đảm bảo an toàn thoải mái cho con người cả về mặt vật lý và tâm lý.

$$F_{\mathrm{dsz}}(x,y) = max\left(w_3 F_{eps}(x,y), w_4 F_{sis}(x,y)\right) \quad (7)$$



a) Mô hình Hall: không gian xung quanh người | *b) Mô hình không gian cá nhân cơ bản* | *c) Khu vực định hướng xung quanh một người con người*

Hình 2. Mô hình không gian xung quanh sử dụng trong điều hướng robot

3.3.4. Bản đồ chi phí

Nghiên cứu này sử dụng gói costmap_2d trong ROS để triển khai các mô hình không gian đã được mô tả trước đó. 4 lớp khác nhau đã được sử dụng: (i) Lớp Tĩnh (Static Layer), (ii) Lớp Chướng ngại vật (Obstacles Layer), và (iii) Lớp Lạm phát (Inflation Layer) và (iv) Lớp điều hướng xã hội (Social Navigation Layers). Lớp tĩnh đại diện cho các phần không thay đổi của sơ đồ chi phí. Lớp chướng ngại vật được sử dụng để xác định và đánh dấu các

chướng ngại vật như đã đọc bằng quét laser. Lớp lạm phát tối ưu hóa hoặc thêm chi phí cho các đối tượng quan trọng hoặc có giá trị để thể hiện bản đồ chi phí thực tế hơn cho robot sử dụng. Và cuối cùng, lớp điều hướng xã hội tích hợp thuộc tính cảm xúc đã được nhận dạng của người. Lớp này cũng đại diện cho không gian cá nhân được điều chỉnh bằng thuộc tính cảm xúc của người,tức là ranh giới của vùng này robot không nên vượt qua.

3.3.5. Bản đồ chi phí toàn cục và cục bộ

Bản đồ chi phí toàn cục sử dụng 3 lớp đó là: lớp tĩnh, chướng ngại vật và lạm phát. Sau đó, công cụ lập kế hoạch đường đi sử dụng bản đồ chi phí này để tạo ra quỹ đạo tối ưu từ điểm xuất phát tới điểm đích trên bản đồ. Bản đồ chi phí cục bộ sử dụng 4 lớp bao gồm 3 lớp trên và thêm lớp diều hướng xã hội có tích hợp thêm thuộc tính cảm xúc của con người. Công cụ lập kế hoạch tránh vật cản sẽ căn cứ vào quỹ đạo tối ưu đã được tạo ở trên và thông tin từ bản đồ chi phí cục bộ tạo ra tham số vận tốc tịnh tiến và vận tốc quay để gửi tới khối điều khiển chuyển động.

3.4. Công cụ lập kế hoạch đường đi và tránh vật cản

Công cụ lập kế hoạch đường đi được sử dụng để tạo ra một lộ trình toàn cục cho robot hướng tới mục tiêu. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu áp dụng thuật toán A* để tìm con đường ngắn nhất, đồng thời tối ưu hóa theo các giá trị bản đồ chi phí toàn cục. Mặc dù robot có thể đi theo lộ trình này để đạt mục tiêu, nhưng công cụ lập kế hoạch tránh vật cản đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chuyển động của robot nằm trong giới hạn của hệ thống động cơ và bánh xe, ngăn ngừa va chạm hoặc hỏng hóc. Ngoài ra, công cụ này còn phản ứng với các chướng ngại mới xuất hiện sau khi lộ trình toàn cục đã được thiết lập. Ví dụ, khi robot đang di chuyển, một người có thể bất ngờ xuất hiện trên hoặc gần lộ trình, và công cụ lập kế hoạch tránh vật cản sẽ giúp robot phản ứng phù hợp. Trong nghiên cứu này, nhóm áp dụng thuật toán TEB để tối ưu hóa quá trình lập kế hoạch tránh vật cản.

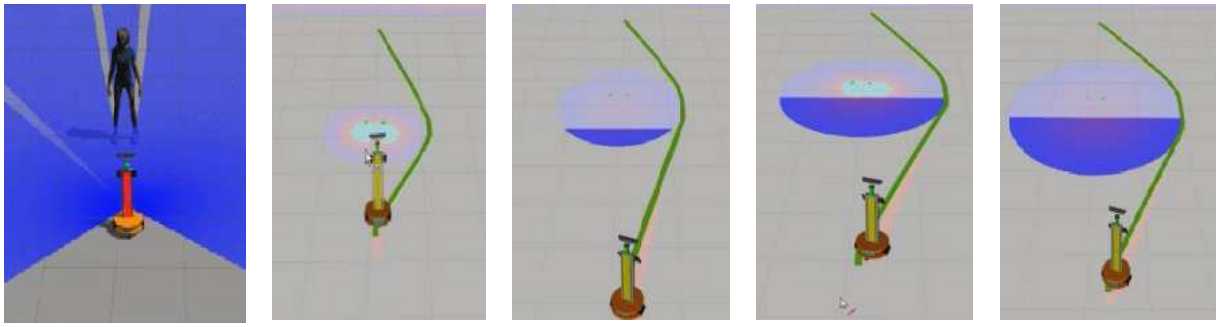
4. Kết quả thí nghiệm

4.1. Thiết lập thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, nhóm thiết lập các thí nghiệm mô phỏng được thực hiện bằng công cụ Gazebo và Rviz. Mục đích của các thử nghiệm này là đánh giá tính hiệu quả của hệ thống sau khi được tích hợp thêm yếu tố cảm xúc của con người.

4.1.1. Tránh một người với thông tin về cảm xúc

Kịch bản của thí nghiệm thể hiện trong Hình 3a. Trong đó, robot sẽ thực hiện tránh lần lượt 1 người đứng im với 3 trạng thái cảm xúc. Trường hợp thứ nhất thể hiện trong Hình 3c: robot tránh người có tâm trạng vui vẻ thân thiện. Trường hợp thứ hai thể hiện trong Hình 3d: robot tránh người có tâm trạng không xác định. Trường hợp thứ ba thể hiện trong Hình 3e: robot tránh người có tâm trạng giận dữ không thân thiện. Trong nghiên cứu này, bán kính vùng không gian cá nhân được thay đổi theo cảm xúc: đối với cảm xúc hạnh phúc, nó là 1,3 m; đối với cảm xúc trung lập, nó là 1,65 m và đối với cảm xúc giận dữ, nó là 2,0 m. Các chỉ số này lớn hơn khoảng cách đảm bảo an toàn về vật lý và thoải mái về tâm lý khá nhiều.



a) Kịch bản tránh 1 người trong Gazebo | *b) Khi chưa có thông tin về cảm xúc* | *c) Khi người có cảm xúc vui vẻ, thân thiện* | *d) Khi người có cảm xúc không xác định* | *e) Khi người có cảm xúc giận dữ, không thân thiện*

Hình 3. Bản đồ chi phí phân lớp và quỹ đạo của robot thay đổi khi biểu hiện cảm xúc của con người thay đổi

4.1.2. Tránh nhóm người với thông tin cảm xúc

Trong thí nghiệm này, robot sẽ thực hiện tránh nhóm 2 người như thể hiện trong Hình 4a và nhóm 3 như thể hiện trong Hình 4b trong trường hợp chưa thêm thông tin cảm xúc của từng người trong nhóm và trong trường hợp thông tin cảm xúc của họ đã được xác định và tích hợp vào hệ thống điều hướng robot. Đối với nhóm 2 người, kịch bản là robot thực hiện tránh nhóm trong đó 1 người có cảm xúc giận dữ, 1 người có cảm xúc trung lập không xác định. Đối với nhóm 3 người thì 2 người đang giận dữ và 1 người trung lập. Thí nghiệm nhằm chứng minh, việc tích hợp thông tin cảm xúc của người vào hệ thống điều hướng sẽ giúp robot đưa ra các phản ứng phù hợp hơn trong môi trường xã hội, nơi mà robot phải chia sẻ không gian hoạt động với con người.

4.2. Kết quả thí nghiệm

4.2.1. Tránh một người

Kết quả quỹ đạo của robot 1 tránh người có tính đến yếu tố cảm xúc thể hiện trong Hình 3. Trong Hình 3b là hình ảnh bản đồ chi phí và quỹ đạo của robot khi chưa có thông tin về cảm xúc. Trong Hình 3c là robot tránh người có tâm trạng vui vẻ thân thiện thì quỹ đạo có xu hướng thu hẹp khoảng cách với người hơn khi chưa có thông tin về cảm xúc. Trong Hình 3d là robot tránh người có tâm trạng không xác định thì quỹ đạo có xu hướng giữ khoảng cách như khi chưa có thông tin về cảm xúc. Trong Hình 3e là robot tránh người có tâm trạng giận dữ, không thân thiện thì quỹ đạo có xu hướng tăng khoảng cách với người hơn khi chưa có thông tin về cảm xúc.

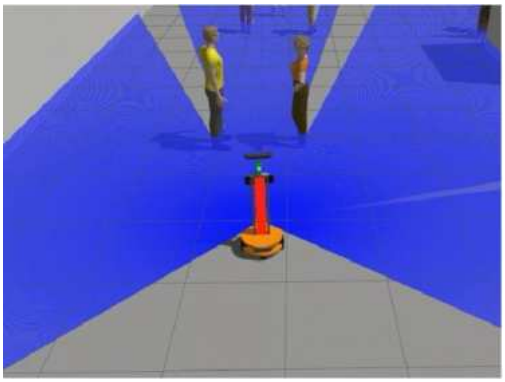
4.2.2. Tránh nhóm người

Khi tránh nhóm 2 người, robot có xu hướng tránh xa người đang có cảm xúc giận dữ không thân thiện như thể hiện trong Hình 4a,c,e. Điều này không chỉ đem lại cảm giác an toàn cho thoải mái cho người mà còn đảm bảo an toàn cho chính robot. Đối với nhóm 3 người, kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Hình 4b,d,f. Kết quả này đã đạt được mục tiêu của nhóm nghiên cứu đề ra đó là robot không xâm phạm vào không gian cá nhân, tạo cảm giác an toàn thỏai mái cho con người và tránh xa những tác nhân có thể gây hại cho chính robot. Trong nghiên cứu này tác nhân đó chính là con người với tâm trạng giận dữ không thân thiện.

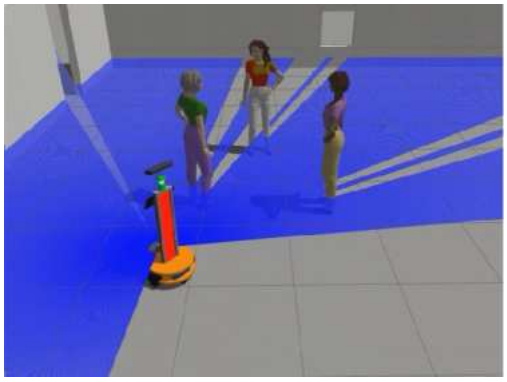
5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, trên cơ sở mô hình bản đồ chi phí phân lớp [12], nhóm nghiên cứu đã phát triển tích hợp thêm thông tin về cảm xúc của con người vào mô hình này. Kết quả là đã giải quyết được bài toán mô hình hóa thông tin về cảm xúc của con người vào điều hướng robot có nhận thức xã hội.

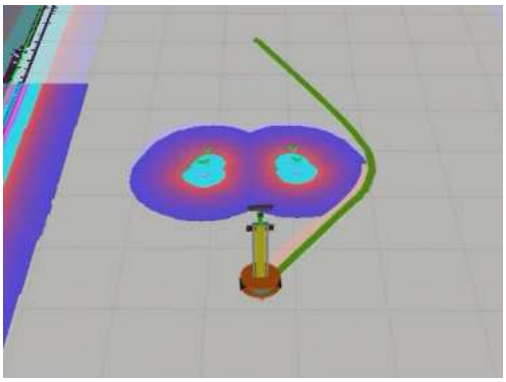
Hạn chế của nghiên cứu này là việc phát hiện, theo dõi và xác định thông tin về cảm xúc của con người vẫn dựa trên nguồn mô phỏng. Hướng nghiên cứu tiếp theo là hiện thực hóa nghiên cứu này trên thiết bị thực.



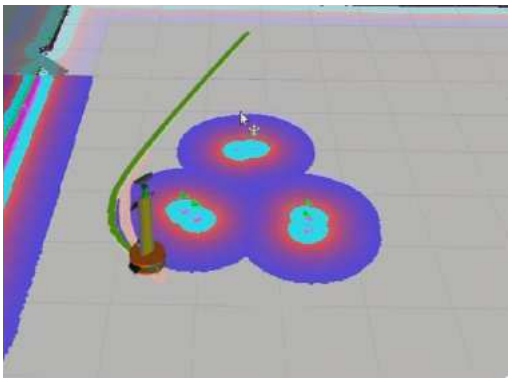
a) Kịch bản tránh nhóm 2 người trong Gazebo



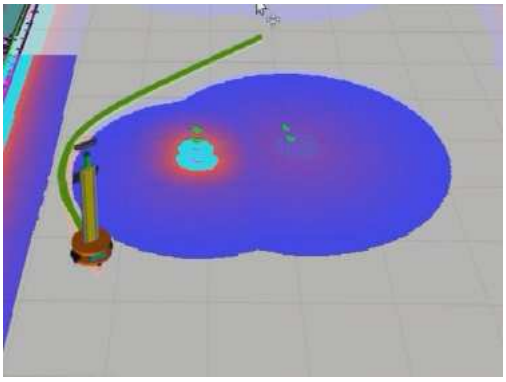
b) Kịch bản tránh nhóm 3 người trong Gazebo



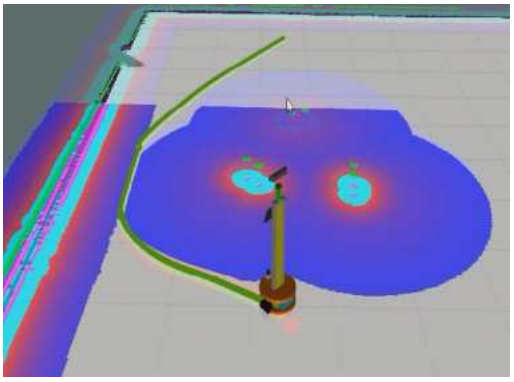
c) Nhóm 2 người khi chưa có thông tin cảm xúc



d) Nhóm 3 người khi chưa thêm thông tin về cảm xúc của người



e) Nhóm 2 người, một người giận dữ và một người cảm xúc không xác định



f) Nhóm 3 người, 2 người đang giận dữ và 1 người không xác định

Hình 4. Bản đồ chi phí và quỹ đạo của robot khi tránh nhóm 2 người và 3 người.

Tài liệu tham khảo

[1] Anthony Francis et al. Principles and Guidelines for Evaluating Social Robot Navigation Algorithms. en. arXiv:2306.16740 [cs]. Sept. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.16740. URL: http://arxiv.org/abs/2306.16740 (visited on 12/13/2024).

[2] Phani Teja Singamaneni et al. "A Survey on Socially Aware Robot Navigation: Taxonomy and Future Challenges". en. In: The International Journal of Robotics Research 43.10 (Sept. 2024). arXiv:2311.06922 [cs], pp. 1533–1572. ISSN: 0278-3649, 1741-3176. DOI: 10.1177/ 02783649241230562. URL: http://arxiv.org/abs/2311.06922 (visited on 12/13/2024).

[3] Yingliang Ma, Helena M. Paterson, and Frank E. Pollick. "A motion capture library for the study of identity, gender, and emotion perception from biological motion". en. In: Behavior Re search Methods 38.1 (Feb. 2006), pp. 134–141. ISSN: 1554-3528. DOI: 10.3758/BF03192758. URL: https://doi.org/10.3758/BF03192758 (visited on 12/19/2024).

[4] Edward Twitchell Hall. The hidden dimension. en. Repr. Anchor Books. New York: Double day, 1990. ISBN: 978-0-385-08476-5.

[5] Anthony Stentz. "The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning". In: IJCAI. Vol. 95. 1995, pp. 1652–1659.

[6] Sven Koenig and Maxim Likhachev. "D* Lite". In: AAAI/IAAI. Vol. 15. 2002, pp. 476–483.

[7] Michael Otte and Emilio Frazzoli. "RRT*: Real-Time Motion Planning/Replanning for Envi ronments with Unpredictable Obstacles". In: Algorithmic Foundations of Robotics XI. Springer, Cham, 2015, pp. 461–478.

[8] Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Sebastian Thrun. "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance". In: IEEE Robotics and Automation Magazine 4.1 (1997), pp. 23–33.

[9] Kerstin Dautenhahn et al. "How May I Serve You? A Robot Companion Approaching a Seated Person in a Helping Context". In: Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction. 2006, pp. 172–179.

[10] Chao Shi et al. "Spatial Formation Model for Initiating Conversation". In: Proceedings of Robotics: Science and Systems VII. 2011, pp. 305–313.

[11] Robot Operating System. Accessed: 2022-08-02. URL: https://www.ros.org.

[12] David V. Lu, Dave Hershberger, and William D. Smart. "Layered Costmaps for Context Sensitive Navigation". In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Sys tems. 2014, pp. 709–715.

[13] Dirk Helbing and Peter Molnar. "Social Force Model for Pedestrian Dynamics". In: Physical Review E 51.5 (1995), p. 4282.

[14] Masahiro Shiomi et al. "Towards a Socially Acceptable Collision Avoidance for a Mobile Robot Navigating Among Pedestrians Using a Pedestrian Model". In: International Journal of Social Robotics 6.3 (2014), pp. 443–455.

[15] Nam Thang Do et al. "Deep Reinforcement Learning Based Socially Aware Mobile Robot Navigation Framework". In: NAFOSTED Conference on Information and Computer Science. 2020, pp. 226–231.

[16] Truong Xuan Tung and Trung Dung Ngo. "Socially Aware Robot Navigation Using Deep Reinforcement Learning". In: IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engi neering. 2018, pp. 1–5.

[17] Harmish Khambhaita and Rachid Alami. “A Human-Robot Cooperative Navigation Planner”. In: Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. 2017, pp. 161–162.

[18] Glenn V. Ostir et al. “Emotional Well-Being Predicts Subsequent Functional Independence and Survival”. In: Journal of the American Geriatrics Society 48.5 (2000), pp. 473–478. 10

[19] Yingliang Ma, Helena M. Paterson, and Frank E. Pollick. “A motion capture library for the study of identity, gender, and emotion perception from biological motion”. In: Behavior Research Methods 38.1 (2006), pp. 134–141.

[20] Aniket Bera et al. “The Emotionally Intelligent Robot: Improving Social Navigation in Crowded Environments”. In: arXiv preprint arXiv:1903.03217 (2019).

[21] Jonatan Ginés et al. “Social Navigation in a Cognitive Architecture Using Dynamic Proxemic Zones”. In: Sensors 19.23 (2019), p. 5189.

[22] Gazebo. URL: https://gazebosim.org/home (visited on 12/25/2024).

[23] Xuan-Tung Truong and Trung Dung Ngo. “Dynamic Social Zone based Mobile Robot Nav igation for Human Comfortable Safety in Social Environments”. In: International Journal of Social Robotics 8 (2016), pp. 663–684. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 29539138.

Socially Aware Robot Navigation: Autonomous Navigation Considering Human Emotions

Abstract: *The primary objective of this study is to integrate human emotional attributes into the navigation system of a socially aware differential-drive robot to ensure both psychological comfort and physical safety for humans and the robot. The research utilizes human information from the Gazebo simulation environment to determine personal space based on emotional states. The authors designed several simulation scenarios and examined three emotional states: positive (happiness), neutral, and negative (anger). Simulation results indicate that incorporating emotions into personal space significantly impacts robot navigation, human psychological comfort, and overall safety. Specifically, when a person is angry, the robot should navigate at a greater distance than the standard to enhance the perception of safety and comfort. Conversely, reducing the navigation distance is not recommended, even when the person is happy, to avoid unintended violations of personal space. To evaluate these effects, the study employs the Social Interaction Index (SII) to measure safety and comfort levels in simulated experiments. This index provides a quantitative basis for analyzing the impact of different emotional states on robot navigation behavior, ensuring objective and reliable research outcomes.*

Keywords: Differential-Drive Autonomous Robot; Layered Costmap; Socially Aware Robot; Robot Navigation; Personal Space Model.

Phân tích ảnh hưởng dữ liệu đo đến độ chính xác ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số

Vũ Văn Chiến*, Nguyễn Ngọc Tuấn, Ngô Việt Cường

Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển

* *Email: vanchiennd@gmail.com,* Contact number: 0979936673

Tóm tắt: Ước lượng trạng thái ngày càng đóng vai trò quan trọng trong quản lý, vận hành hệ thống điện hiện đại. Thông tin chính xác về giá trị của các biến trạng thái là điều kiện làm việc tối ưu của nhiều ứng dụng quản lý năng lượng điện. Phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số (WLS) có độ chính xác cao, dễ hội tụ, mô hình đơn giản và phù hợp với nhiều loại phép đo. Do đó, WLS được sử dụng phổ biến trong các bộ ước lượng trạng thái cho cả hệ thống điện truyền tải và hệ thống điện phân tán. Tuy nhiên, WLS nhạy cảm với sai số đo lường, nếu dữ liệu đầu vào có độ chính xác thấp hoặc có dữ liệu xấu thì ảnh hưởng lớn đến chất lượng ước lượng trạng thái. Bài báo đi sâu phân tích ảnh hưởng của dữ liệu đo bao gồm: Số lượng, vị trí phép đo, tính chính xác của dữ liệu đo và trọng số của từng loại phép đo đến độ chính xác của WLS. Hai hệ thống điển hình của mạng lưới phân phối điện là hệ thống 30 bus và 69 bus được sử dụng để kiểm chứng phân tích, kết quả tính toán trên Matlab cho thấy độ chính xác của phương pháp WLS và các yếu tố này ảnh hưởng lớn đến độ chính xác ước lượng của thuật toán.

Từ khóa: Ước lượng trạng thái; bình phương cực tiểu có trọng số; Matpower.

1. Giới thiệu chung

Ước lượng trạng thái (SE) hệ thống điện được giới thiệu lần đầu tiên bởi Fred Schweppes vào năm 1970, ngày nay nó đã trở thành một chức năng quan trọng trong hệ thống quản lý năng lượng (EMS) của lưới điện truyền tải và hệ thống quản lý phân phối (DMS) của lưới điện phân tán. Kết quả tính toán thu được từ SE cung cấp cho các ứng dụng khác của EMS như: như tính toán dự phòng, phân tích an toàn, và tối ưu hóa công suất. Trong DMS, SE là nền tảng cho các ứng dụng như: Phân tích sự cố phân phối, tái cấu trúc mạng lưới tối ưu, xác định và khôi phục sự cố, điều khiển điện áp và công suất phản kháng [1]. Vị trí và vai trò của SE trong hệ thống EMS được thể hiện trong **Error! Reference source not found.**.

Phương pháp bình phương cực tiểu có trong số (WLS) có độ chính xác cao, mô hình đơn giản, dễ hội tụ và phù hợp với nhiều loại phép đo khác nhau, đặc biệt với dữ liệu có phân phối chuẩn [2] nên được áp dụng phổ biến trong các bộ ước lượng trạng thái. Sự khác nhau về việc sử dụng WLS trong lưới điện phân phối và lưới điện truyền tải được thể hiện trong [3]. Trong lưới điện truyền tải, biến trạng thái thường được sử dụng là biên độ và góc pha điện áp; trong khi đó ở lưới điện phân tán biến trạng thái có thể là biên độ và góc pha dòng điện hoặc biên độ và góc pha điện áp [2]. Tài liệu [4] đã phân tích và so sánh kết quả ước lượng trạng thái khi sử dụng các biến trạng thái khác nhau, các kết quả mô phỏng cho thấy rằng, với lưới điện phân tán sử dụng biến trạng thái là điện áp-góc pha có độ chính xác ước lượng cao hơn không quá nhiều so với sử dụng biến trạng thái là dòng điện nhánh-góc pha. Ngoài ra, WLS

còn cho kết quả ước lượng tốt khi thực hiện bài toán ước lượng lưới điện một pha hoặc lưới điện ba pha không cân bằng [5].

Bên cạnh việc sử dụng thuật toán ước lượng trạng thái, độ chính xác của quá trình ước lượng còn phụ thuộc vào bộ dữ liệu đo. Dữ liệu đo này được cung cấp bởi các thiết bị đo lường như SCADA, PMUs, AMI và dữ liệu tạo giả đo lường được xác định thông qua dữ liệu lịch sử và các thông tin sẵn có về cấu hình hệ thống. Các thiết bị đo này có sai số đo khác nhau theo từng loại phép đo. Hệ thống SCADA cung cấp các phép đo về công suất (công suất tác dụng và công suất phản kháng) tại các nút và trên các nhánh, biên độ điện áp tại các nút và biên độ dòng điện trên các nhánh. Sai số lớn nhất của phép đo biên độ điện áp là 2%, của phép đo công suất là 3%. Thiết bị PMUs cung cấp giá trị đo lường pha điện áp và pha dòng điện với sai số lớn nhất 0.5% về biên độ và 10^{-2} rad đối với góc pha. Hệ thống đo lường AMI cung cấp các phép đo về công suất, biên độ điện áp với sai số lớn nhất là 10%. Dữ liệu tạo giả đo lường với sai số trong khoảng 20% đến 50%, phụ thuộc quá trình dự báo tải dựa trên dữ liệu lịch sử [1]. Giả định rằng sai số của các phép đo được phân phối theo tiêu chuẩn Gauss với độ lệch chuẩn được tính bằng một phần ba giá trị sai số lớn nhất. Những giá trị sai số này sẽ làm cơ sở để tính trọng số cho các phép đo ở phần sau.

Tính chính xác của ước lượng trạng thái bằng phương pháp WLS phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đo lường bao gồm: Số lượng, vị trí phép đo, loại phép đo và giá trị trọng số của phép đo tương ứng. Tài liệu [6] cũng đã phân tích ảnh hưởng của những yếu tố này đến kết quả ước lượng các biến trạng thái. Tuy nhiên, những phân tích này chưa cụ thể, rõ ràng; trọng số được chọn lựa không mang tính thực tế, chưa phản ảnh được nguồn gốc dữ liệu đo. Cho đến thời điểm hiện tại, chưa có một nghiên cứu nào mô tả toàn vẹn ảnh hưởng của dữ liệu đo đến độ chính xác của phương pháp WLS. Nhằm bù đắp khoảng trống này, tác giả đã sử dụng WLS để phân tích ảnh hưởng của các yếu tố trên đến kết quả ước lượng trạng thái trên cả hai loại hệ thống điện (hệ thống truyền tải và hệ thống phân tán), do đó những đóng góp chính của bài báo như sau:

1. Kiểm chứng tính chuẩn xác của phương pháp WLS khi ước lượng trạng thái trên hai loại lưới điện, sử dụng véc tơ trạng thái là biên độ và góc pha điện áp.

2. Phân tích ảnh hưởng của số lượng phép đo, vị trí phép đo và trọng số của từng loại phép đo đến kết quả của thuật toán ước lượng.

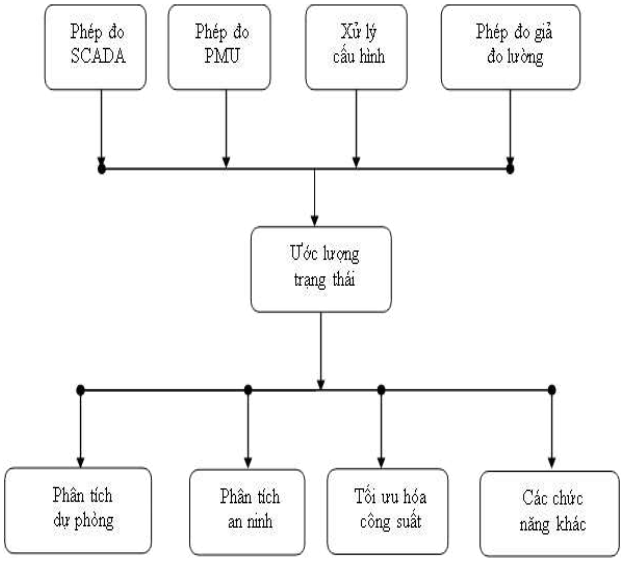
3. Về mặt tổng thể, nhiều dữ liệu hơn thường dẫn đến kết quả ước lượng trạng thái chính xác hơn trong WLS. Nhưng khi số lượng phép đo vượt quá mức cần thiết, phương pháp WLS sử dụng các trọng số để ưu tiên các phép đo có độ tin cậy cao hơn (như phép đo bằng PMUs) và giảm tác động của dữ liệu có độ chính xác thấp hơn (như các phép đo dùng hệ SCADA), từ đó nâng cao độ chính xác tổng thể ước lượng trạng thái. PMUs thường có độ chính xác cao hơn nên trọng số của các phép đo PMUs sẽ lớn hơn. Điều này giúp các phép đo PMUs ảnh hưởng nhiều hơn đến kết quả cuối cùng so với kết quả từ các phép đo khác.

Hai hệ thống điện điển hình của hai loại lưới điện là hệ truyền tải 30 bus và hệ phân tán 69 bus được sử dụng để tiến hành mô tả, tính toán, phân tích cụ thể cách thức mà dữ liệu ảnh hưởng đến độ chính xác của phương pháp WLS. Những nội dung còn lại của bài báo được tổ chức như sau:

Phần 2: Ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp WLS

Phần 3: Mô phỏng và phân tích

Phần 4: Một số kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.



Hình 1. Vai trò của SE trong hệ thống EMS

2. Ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp WLS

Phương trình ước lượng trạng thái điện được thể hiện như sau [7] :

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}.\cos\theta_{ij} + B_{ij}.\sin\theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}.\sin\theta_{ij} - B_{ij}.\cos\theta_{ij}) \quad (2)$$

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\sin\theta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{si} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij}\sin\theta_{ij} - b_{ij}\cos\theta_{ij}) \quad (4)$$

Trong đó: Phương trình (1), (2) tính công suất tại nút i. Phương trình (3), (4) tính công suất tác dụng nhánh và phản kháng nhánh từ nút i tới nút j.

V_i, θ_i là biên độ và góc pha điện áp tại nút *i.*

V_j, θ_j là biên độ và góc pha điện áp tại nút *j.*

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ là góc lệch giữa góc pha điện áp nút *i* và nút *j.*

$G_{ij} + jB_{ij}$ là dạng phức của phân tử thứ *ij* trong ma trận tổng dẫn.

$g_{ij} + jb_{ij}$ là tổng dẫn nhánh *ij*, kết nối nút *i* và nút *j*;

$g_{si} + jb_{si}$ là tổng dẫn nhánh shunt nối với nút *i*.

Phương trình tổng quát của ước lượng trạng thái hệ thống điện được trình bày như sau:

$$z = h(x) + e \tag{5}$$

Trong đó : $z^T = [z_1, z_2, ..., z_m]$ là vector đo lường của hệ thống

$x^T = [x_1, x_2, ...x_n]$ là vector trạng thái hệ thống

$h^T(x) = [h_1(x), h_2(x), ..., h_m(x)]$ là tập hợp các hàm phi tuyến theo biến trạng thái x.

$e^T = [e_1, e_2, ..., e_m]$ là vector sai số đo lường.

Trạng thái hệ thống thu được bằng cách giải bài toán tối ưu sau:

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^{m} \frac{[(z_i - h_i(x)]^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T.W.[z - h(x)] \tag{6}$$

Ở đây $W = R^{-1}$ gọi là ma trận trọng số, có các thành phần đường chéo: $w_{ii} = \frac{1}{R_{ii}} = \frac{1}{\sigma_i^2}$.

Với σ_i là độ lệch chuẩn của phép đo thứ i, được tính theo độ chính xác của thiết bị đo.

Phương trình (6) được giải bằng phương pháp WLS, do giới hạn của bản thảo nên chúng tôi sẽ không trình bày chi tiết tại đây, phương pháp WLS có thể được tham khảo tại [7].

3. Mô phỏng và phân tích kết quả

Dữ liệu đầu vào của các trường hợp khảo sát là các giá trị đo lường truyền thống, được lấy từ kết quả tính toán dòng công suất bằng phương pháp Newton Raphson trong module Matpower của Matlab, được thêm vào một lượng sai số ứng với sai số lớn nhất của từng loại thiết bị đo, trong mỗi trường hợp dữ liệu bao gồm: Phép đo biên độ điện áp nút thứ i (V_i), cặp phép đo công suất tác dụng và công suất phản kháng nút thứ i (PQ_i), cặp phép đo công suất tác dụng và công suất phản kháng nhánh từ nút i đến nút j (PQ_{ij}), với các trọng số tương ứng được tính theo sai số lớn nhất của phép đo (Phần 1).

Hai hệ thống điển hình được khảo sát trong bài báo này là hệ thống điện truyền tải 30 bus và hệ thống điện phân phối 69 bus. Để so sánh độ chính xác ước lượng trạng thái của các trường hợp khảo sát ta sử dụng giá trị sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE), được mô tả bởi công thức sau:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \times 100\% \tag{7}$$

Trong đó: A_t là giá trị đúng hay giá trị được tính toán theo phương pháp Newton Raphson trong module Matpower của phần mềm Matlab.

F_t là giá trị ước lượng bằng phương pháp WLS. Khi giá trị MAPE càng nhỏ thì quá trình ước lượng có độ chính xác càng cao.

Tính chắc chắn của ước lượng trạng thái chỉ có thể được đảm bảo nếu số lượng các phép đo đủ lớn và phân phối một cách hợp lý trong hệ thống. Một thước đo của số lượng phép đo có thể được ký hiệu bằng hệ số thặng dư η được định nghĩa là:

$$\eta = \frac{\text{Dimensionof}(z)}{\text{Dimensionof}(x)} = \frac{m}{2N-1} \quad (8)$$

Trong đó: m là số lượng các phép đo; N là số bus của hệ thống.

3.1. Hệ thống 30 bus

Đây là hệ thống truyền tải điện gồm có 30 nút, 41 nhánh, 6 máy phát, 24 phụ tải, 4 máy biến áp và 2 nhánh shunt. Sơ đồ lưới điện một sợi và thông tin chi tiết về hệ thống này tham khảo tài liệu [8].

a) Ảnh hưởng của số lượng và vị trí phép đo

Giả sử dữ liệu đo dùng để ước lượng trạng thái được thu thập từ hệ thống SCADA, với sai số là: 2% đối với phép đo V_i , 3% với phép đo PQ_i và PQ_{ij} ; khi đó trọng số tương ứng lần lượt là: 4e-5;1e-4 và 1e-4. Vị trí đo cụ thể được trình bày trong tài liệu [10]. Kết quả các trường hợp khảo sát được trình bày trong

Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả ước lượng trạng thái hệ thống 30 bus với nguồn dữ liệu từ hệ thống SCADA

TT	Số lượng phép đo	Hệ số η	MAPE Vi (%)	MAPE angle (%)	Số lần lặp
Case1	49	0.83	*Không hội tụ*		
Case2	59	1.0	2.1885	1.0804	5
Case3	83	1.4	1.956	0.8801	6
Case4	83	1.4	*Không hội tụ*		
Case5	95	1.61	1.982	0.92	6
Case6	110	1.86	*Không hội tụ*		
Case 7	110	1.86	2.011	0.933	8

Từ kết quả ước lượng trạng thái trên Bảng 1ta có nhận xét sau:

- Trong tất cả các trường hợp, khi số lượng phép đo nhỏ hơn 59, ứng với giá trị η<1 thì thuật toán không hội tụ (ví dụ trường hợp Case1). Hệ thống không đảm bảo điều kiện quan sát nên bài toán ước lượng không thực hiện được.

- Số lượng phép đo nhỏ nhất thỏa mãn điều kiện hội tụ của thuật toán là: 59, ứng với η=1, cấu hình dữ liệu đo cụ thể là: 1 phép đo biên độ điện áp, 29 phép đo công suất tác dụng và phản kháng nút (Case2).

- Khi số lượng phép đo càng lớn (η>1) thì khả năng quan sát hệ thống càng được đảm bảo, thuật toán càng đảm bảo độ hội tụ và kết quả ước lượng trạng thái có độ chính xác càng cao. Nhưng điều này không phải lúc nào cũng đúng, cụ thể trong các trường hợp sau:

+ Trong Case3 và Case4 với cùng số lượng phép đo là 83, nhưng số lượng các phép đo trong mỗi loại là khác nhau, Case3 cho kết quả ước lượng tốt nhưng Case4 không đảm bảo hội tụ. Điều này chứng tỏ, kết quả ước lượng trạng thái phụ thuộc vào loại phép đo, việc tăng số lượng phép đo công suất tại các nút có ý nghĩa quan trọng hơn so với số lượng phép đo công suất trên các nhánh.

+ Trong Case6 và Case7 với cùng số lượng phép đo là 110, số lượng các phép đo của mỗi loại là như nhau, nhưng vị trí đặt điểm đo là khác nhau. Kết quả là Case7 đảm bảo khả năng hội tụ, Case6 thì không. Điều này chứng minh rằng, kết quả ước lượng trạng thái còn phụ thuộc vào vị trí đặt phép đo của từng loại.

- Khi tăng số lượng phép đo thì mức độ phức tạp trong tính toán tăng lên, số lần lặp và thời gian tính toán tăng.

b) Ảnh hưởng của trọng số phép đo

Như đã trình bày ở trên, trọng số của mỗi phép đo phụ thuộc vào độ chính xác của thiết bị đo tương ứng. Trong phần này, ta khảo sát sự thay đổi kết quả ước lượng trạng thái trên một cấu hình dữ liệu đo nhưng được lấy từ các thiết bị đo khác nhau. Dữ liệu đo và kết quả ước lượng trạng thái với sự khác nhau của thiết bị đo được thể hiện trên **Error! Reference source not found.** .

Bảng 2. Kết quả ước lượng trạng thái với trọng số khác nhau của hệ thống 30bus

Case	Phép đo biên độ điện áp tại các nút:1,5,10,25 Phép đo công suất nút tại: 1,2,….,30 Phép đo công suất nhánh trên: 1-3; 2-6; 12-14; 23-15					
	Sai số [V_i,PQ_i, PQ_{ij}]	**Phương sai sai số** [V_i,PQ_i, PQ_{ij}]	**MAPE V_i (%)**	**MAPE Angle (%)**	**Số lần lặp**	**Thời gian (ms)**
Case2 A (AMI)	10% 10% 10%	1.1e-3 1.1e-3 1.1e-3	9.703	8.2604	6	10.343
Case2 B (SCADA)	2% 3% 3%	4e-5 1e-4 1e-4	1.9851	0.9342	6	71.041
Case2 C (PMU + SCADA)	0.5% 3% 3%	3e-6 1e-4 1e-4	0.5065	1.887	7	12.91
Case2	0.5%	3e-6	0.4853	0.451	6	19.163

D (PMUs)	0.5% 0.5%	3e-6 3e-6				

Quan sát bảng kết quả trên, ta có những nhận xét như sau:

- Trường hợp Case2A sử dụng thiết bị đo lường AMI với sai số lớn (10% cho cả phép đo biên độ điện áp và các phép đo công suất), chất lượng dữ liệu đầu vào có độ chính xác thấp, nên kết quả ước lượng trạng thái có sai lệch lớn: 9.7% với biên độ điện áp và 8.26% với góc pha.

- Khi sử dụng thiết bị SCADA để thu thập dữ liệu (Case2B), sai số đo giảm xuống (2% với phép đo biên độ điện áp, 3% với phép đo công suất), tương ứng với đó là trọng số tăng so với trường hợp sử dụng dữ liệu từ AMI, khi đó kết quả ước lượng trạng thái tốt hơn, sai lệch ước lượng của biên độ điện áp giảm chỉ còn 1.985%, góc lệch pha giảm còn 0.934%.

- Khi sử dụng kết hợp hai loại thiết bị đo (PMUs đo điện áp, SCADA đo công suất), kết quả ước lượng biên độ điện áp của trường hợp này (Case2C) được cải thiện rõ rệt; nhưng sai số vê góc pha tăng lên so với trường hợp Case2B. Trong trường hợp Case2D, dữ liệu đo lường được lấy hoàn toàn từ PMUs, kết quả ước lượng trong trường hợp này có độ chính xác cao nhất, điện áp tại các bus có sai lệch 0.485% về biên độ và 0.4502% về góc pha.

Như vậy, trọng số của phép đo có ảnh hưởng lớn đến kết quả ước lượng trạng thái. Thiết bị đo có độ chính xác càng cao, trọng số của phép đo càng lớn thì sai số ước lượng càng nhỏ.

3.2. Hệ thống 69 bus

Đây là hệ thống điện phân tán hình tia, có 69 bus và 68 nhánh, không có máy biến áp và nhánh shunt. Sơ đồ sợi một đường dây và các thông số hệ thống tham khảo tài liệu [9] và module Matpower. Tổng số phép đo theo phép đo truyền thống là 479 phép đo, gồm: 69 phép đo V_i, 69 phép đo P_i, 69 phép đo Q_i, 136 phép đo P_{ij} và 136 phép đo Q_{ij}. Hệ số thặng dư lớn nhất là: $\eta_{max} = 3.49$.

a) Ảnh hưởng của số lượng và vị trí phép đo

Cấu hình bộ dữ liệu đo lường được mô tả trong [10], và kết quả ước lượng trạng thái được thể hiện trong *Bảng 3*.

Bảng 3. Kết quả ước lượng trạng thái các trường hợp khảo sát hệ thống 69bus

TT	Số lượng phép đo	Hệ số η	MAPE Vi (%)	MAPE angle (%)	Số lần lặp
Case1	137	1.0	2.031	1.015	4
Case2	150	1.095	*Không hội tụ*		
Case3	150	1.095	2.0097	0.9738	4
Case4	185	1.350	1.9989	1.0532	5

Case 231A	231	1.686	1.9978	0.9630	7
Case 231B	231	1.686	*Không hội tụ*		

Trên cơ sở kết quả của Bảng 3 ta có nhận xét như sau:

- Cũng giống ở lưới điện truyền tải 30 bus, phương pháp WLS cho hệ thống phân tán 69 bus chỉ có thể hội tụ khi $\eta \geq 1$. Khi $\eta = 1$, thuật toán ước lượng chỉ có thể đạt được với kiểu cấu hình dữ liệu đo gồm: 01 phép đo biên độ điện áp và 68 cặp phép đo công suất tại các nút, như kết quả ở Case1.

- Khi tăng số lượng phép đo, điều kiện hội tụ của thuật toán WLS sẽ được đảm bảo, nhưng điều này không hoàn toàn đúng trong tất cả các trường hợp. Cụ thể, trường hợp với bộ dữ liệu ở Case2 và Case3, với số lượng phép đo đều bằng 150 phép đo, nhưng số lượng P_i,Q_i và P_{ij} , Q_{ij} là khác nhau, dẫn đến kết quả ước lượng khác nhau (Case2 không hội tụ). Điều này cho thấy, kết quả ước lượng trạng thái phụ thuộc vào số lượng phép đo của mỗi loại phép đo.

- Trong trường hợp Case231B: Khi số lượng phép đo tăng lên 231, thuật toán không hội tụ, nhưng khi ta thay đổi vị trí đo của mỗi loại, vẫn giữ nguyên số lượng phép đo như trong trường hợp Case231A thì hệ thống lại trở nên quan sát được và thuật toán WLS cho kết quả tốt hơn so với các trường hợp có số lượng phép đo ít hơn.

b) Ảnh hưởng của trọng số phép đo

Tương tự như hệ thống 30 bus, bộ dữ liệu khảo sát và trọng số của các phép đo được thể hiện trên

Bảng *4*.

Bảng 4. Kết quả ước lượng với trọng số khác nhau của hệ thống 69bus

Case	Đo biên độ điện áp tại các nút:1; 3; 8; 11; 12; 20; 60 Đo công suất nút tại: 1, 2,…., 69 Đo công suất nhánh trên: 1-2; 3-36; 12-13; 53-54; 23-24; 61-62; 32-33; 44-45					
	Sai số [V_i, PQ_i, PQ_{ij}]	**Phương sai sai số** [V_i, PQ_i, PQ_{ij}]	**MAPE V_i (%)**	**MAPE Angle (%)**	**Số lần lặp**	**Thời gian (ms)**
Case1 (AMI)	10% 10% 10%	1.1e-3 1.1e-3 1.1e-3	9.982	8.92	6	22
Case1A	**nt**	**1e-2/1e-5/1e-5**	**9.905**	**8.499**	**5**	**23**
Case2 (SCADA)	2% 3%	4e-5 1e-4	1.9989	1.0532	5	149

	3%	1e-4				
Case2A	**nt**	**2e-6/1e-4/1e-4**	**2.0066**	**2.55**	**8**	**30**
Case3 (PMU+ SCADA)	0.5% 3% 3%	3e-6 1e-4 1e-4	0.4923	4.064	7	25
Case4 (PMUs)	0.5% 0.5% 0.5%	3e-6 3e-6 3e-6	0.499	0.503	5	48
Case4A	**nt**	**1e-4/1e-4/1e-4**	**0.4853**	**0.451**	**6**	**19.163**

Tương tự như với trường hợp lưới điện 30 bus, duqaj vào kết quả Bảng 4 ta có những nhận xét sau:

- Với thiết bị đo lường AMI: Bộ dữ liệu được tạo ra với sai số lớn (10%) cho cả phép đo biên độ điện áp và các phép đo công suất, nên chất lượng dữ liệu đầu vào có độ chính xác không cao, nên kết quả ước lượng có sai lệch lớn: 9.9% với biên độ điện áp và 8.9% với góc pha.

- Khi sử dụng thiết bị SCADA để thu thập dữ liệu trong trường hợp Case2, sai số đo lường giảm xuống (2% với phép đo biên độ điện áp, 3% với phép đo công suất), tương ứng với đó là trọng số tăng so với trường hợp sử dụng dữ liệu từ AMI, kết quả ước lượng trạng thái tốt hơn, sai lệch ước lượng của biên độ điện áp giảm còn 1.99%, góc pha giảm còn 1.5%.

- Khi sử dụng thiết bị PMUs để thực hiện các phép đo, với sai số nhỏ 0.5% (Case4), dữ liệu thu được có độ chính xác rất cao, các trọng số của từng phép đo có giá trị lớn, kết quả ước lượng trong trường hợp này có độ chính xác cao nhất, sai lệch 0.498% về biên độ và 0.502% về góc pha điện áp.

- Trong các trường hợp Case1A, Case2A, Case4A: Tác giả đã sử dụng bộ giá trị với phương sai khác với cách tính toán trọng số theo lý thuyết. Kết quả cho thấy rằng, vẫn có bộ trọng số cho kết quả ước lượng trạng thái tốt hơn. Điều này đòi hỏi cần phải có một phương pháp để xác định chính xác giá trị trọng số tương ứng với từng bộ dữ liệu đầu vào để đạt được kết quả ước lượng tốt nhất.

4. Kết luận

Sự chính xác của phương pháp WLS và ảnh hưởng của dữ liệu đo đến bài toán ước lượng trạng thái đã được kiểm chứng trên hai hệ thống 30bus và 69bus. Tính chính xác của ước lượng trạng thái chỉ còn phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đầu vào và việc lựa chọn trọng số cho từng phép đo. Một cách tổng thể, khi số lượng phép đo tăng lên, khả năng quan sát và tính hội tụ của thuật toán càng được đảm bảo, nhưng điều này không hoàn toàn chính xác bởi vị trí của các phép đo sẽ ảnh hưởng đến kết quả WLS. Các phép đo có độ chính xác cao, cần được gán trọng số lớn theo biểu thức mối liên hệ với độ chính xác của thiết bị đo, tuy nhiên vẫn có những giá trị khác cho kết quả ước lượng tốt hơn. Do đó, hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo là xây dựng thuật toán để xác định được những vị trí đo lường tối ưu, đề xuất

những giải pháp để xác định giá trị trọng số trong một bộ dữ liệu cụ thể để kết quả ước lượng trạng thái đạt độ chính xác cao nhất.

Tài liệu tham khảo

1. M. Liu. (Jan 2017), *State estimation in a smart distribution system*, HKIE Transactions, vol. 24, no. 1, pp. 1–8.
2. Zhu, J.W. and Ramachandran.(2020), *Review of Trends in State Estimation of Power Distribution Networks*, Journal of Power and Energy Engineering, vol 8, p.85-99.
3. M. S. N. G. Sarada Devi and G. Yesuratnam.(2020), *Comparison of State Estimation Process on Transmission and Distribution System*, in Advances in Decision Sciences, Image Processing, Security and Computer Vision, vol. 4, Cham: Springer International Publishing, pp. 414–423.
4. M. Pau, P. A. Pegoraro, and S. Sulis.(2013), *WLS distribution system state estimator based on voltages or branch-currents: Accuracy and performance comparison*, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Minneapolis, USA.
5. M.E. Baran and A.W. Kelley. (Feb. 1995), *A branch-current-based state estimation method for distribution systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 10, no. 1, pp. 483–491.
6. M. Meriem, S. Omar, C. Bouchra, B. Abdelaziz, E. M. Faissal, and C. Nazha. (Aug.2016), *Study of State Estimation Using Weighted Least Squares Method*, International Journal of Advanced Engineering Research and Science, vol. 3, no. 8.
7. Ali Abur, Antonio Gosmez Expósito. (2004), *Power system state estimation: theory and implementation*, Marcel Dekker.
8. Online: http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm
9. O. Montoya Giraldo, C. Ramos-Paja, and L. Grisales-Norena. (Jul. 2022.), *An Efficient Methodology for Locating and Sizing PV Generators in Radial Distribution Networks Using a Mixed-Integer Conic Relaxation*, Mathematics, vol. 10, p. 2626,
10. Vị trí đo lường của hệ thống 30 bus và 60 bus. Link: *https://tinyurl.com/mrx4tu9s.*

Abstract:

State estimation plays an increasingly important role in management and operation of modern power systems. Accurate information about values of state variables is the optimal working condition of many electrical energy management applications. The weighted least squares (WLS) method has high accuracy, easy convergence, simple model, and suitable for many types of measurements. Therefore, WLS is commonly used in state estimators for both transmission and distributed power systems. However, WLS is sensitive to measurement errors. If the input data has low accuracy or bad data, it will greatly affect the quality of state estimation. The article deeply analyzes influences of measurement data including: Number of measurements, measurement locations, accuracy of measurement data and the weight of each type of measurement on the accuracy of WLS. The 30 bus network and the 69 bus network are used to verify the analysis. Calculation results on Matlab software showed the accuracy of the WLS method and these factors significantly affected on the state esstimation quality of the algorithm.

Keywords: *State estimation; power system analysis; Weighted Least Square; Matpower*.

Nghiên cứu phương pháp đồng bộ tốc độ sản xuất trong dây chuyền bọc cáp điện nhà máy z143

Nguyễn Danh Điệp[1], Phạm Tuấn Thành[2]

[1] Lớp cao học Tự động khóa K35, Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Viện Tên lửa & Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự

[*]Email: ***diepnd1991 @gmail.com***

Tóm tắt

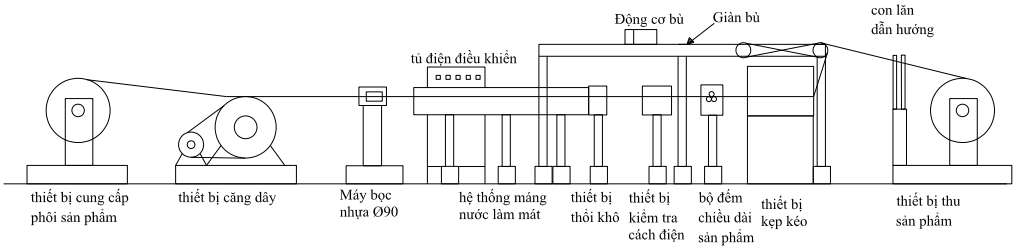
Trình bày phương pháp đồng bộ và ổn định tốc độ trong quá trình bọc dây cáp điện trên cơ sở ứng dụng, sử dụng hệ truyền động điều khiển véc tơ sử dụng biến tần cho các cơ cấu chấp hành có mô men và tải trọng thay đổi. Xây dựng các bộ điều chỉnh theo các phương pháp tối ưu mô đun và tối ưu đối xứng trông hệ truyền động với các vòng điều chỉnh lệ thuộc và mô hình mô phỏng trên Matlab simulink để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Từ khóa: : *Điều khiển véctơ, đồng bộ tốc độ, tối ưu mô đun, tối ưu đối xứng*

1. Giới thiệu

Trong các ngành sản xuất công nghiệp cũng như trong sản xuất dây dây và cáp điện. Bài toán đồng bộ tốc độ và ổn định lực căng trong quá trình sản xuất là một yêu cầu cần thiết để nâng cao chất lượng và sản lượng sản phẩm. Như sản phẩm dây và cáp điện, sản phẩm yêu cầu đảm bảo ổn định về đường kính và chiều dày vỏ bọc dây và cáp điện. Để đáp ứng được yêu cầu sản phẩm trong quá trình bọc tốc độ dây chuyền cần ổn định và căng đều ở suốt dây chuyền từ đầu ra dây đến đầu thu dây sản phẩm.

Dây chuyền được trang bị thiết bị ra dây và sơ đồ điều khiển điện cơ thiết bị ra dây của dây chuyền như Hình 1, có qui trình công nghệ như sau:



Hình 1 Sơ đồ hệ thống dây chuyền bọc vỏ dây cáp điện

Dây lõi cáp điện được ra tự do với phanh cơ từ thiết bị cung cấp phôi sản phẩm đến thiết bị căng dây. Thiết bị căng dây có 2 puly, trong đó 1 puly được gắn cố định (puly có đường kính lớn) và 1 puly quay có phanh từ để điều chỉnh lực ma sát khi dây trượt trên pyly từ đó điều chỉnh độ căng của dây. Dây lõi được cuốn 2-3 vòng qua 2 puly sau đó đi qua đầu bọc của máy bọc nhựa Φ90 để bọc một lớp nhựa vỏ bảo vệ (vỏ bảo vệ bằng PVC hoặc PE…). Dây lõi sau bọc vỏ được đi qua hệ thống nước làm mát, hệ thống thổi khô, thiết bị kiểm tra cách điện, bộ đếm mét, thiết bị kẹp kéo, giàn bù dây và cuối cùng được thu vào lô sản phẩm hoặc lô bán thành phẩm trên thiết bị thu.

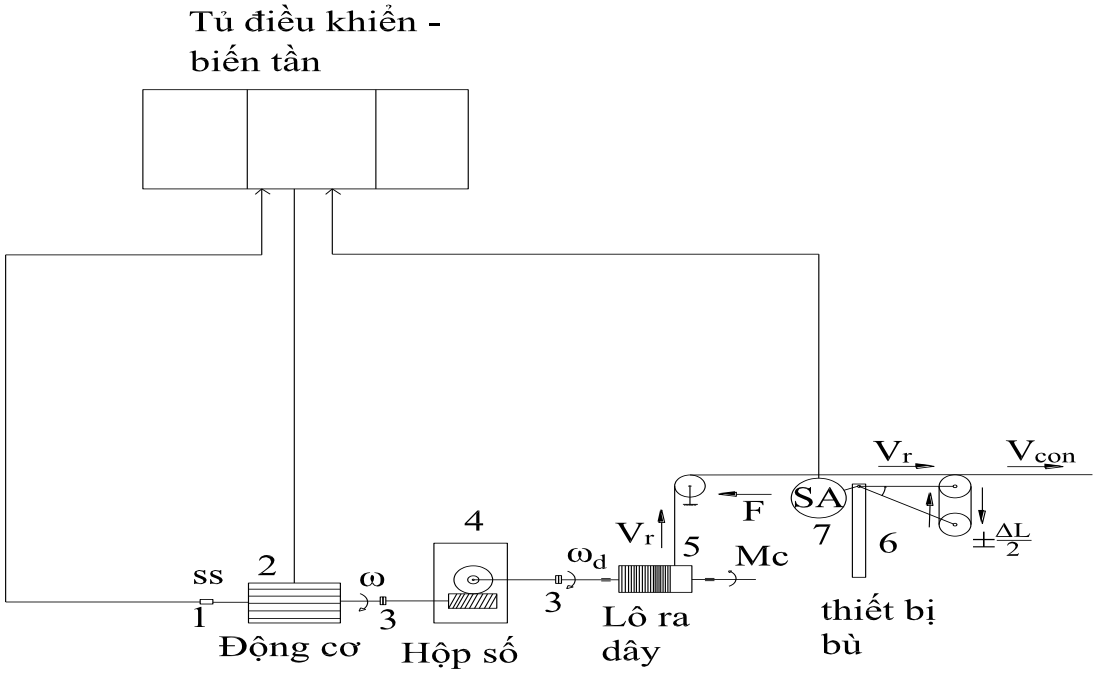
Quy trình kỹ thuật của dây chuyền làm việc với một tốc độ dài không đổi cho trước. Trong quá trình sản xuất lô ra dây cung cấp phôi sản phẩm trên thiết bị cung cấp phôi liên tục thay đổi về đường kính và tải trọng. Do đó tốc độ góc quay của lô cung cấp phôi thay đổi liên

tục. Từ đó dẫn đến lực căng dây lõi từ thiết bị cung cấp phôi đến thiết bị căng dây liên tục thay đổi dẫn đến hiện tượng dây lõi qua thiết bị bọc không căng đều. Nhất là tại những điểm dây bị mắc kẹt ở trên rãnh lô dây sẽ có hiện tượng ra dây bị giật cục, ở những vị trí này thay đổi chiều dài ra dây lớn dẫn đến hiện tượng trùng dây lõi khi đi qua đầu bọc vỏ cáp, từ đó sinh ra hiện tượng có điểm bị nổi cục và không đạt kích thước đường kính theo yêu cầu. Điều này có thể đạt được bằng cách ứng dụng hệ truyền động điện mô men hoặc truyền động điện bám. Trường hợp ứng dụng hệ truyền động điện mô men thì khi mô men trên trục động cơ điện không đổi với đường kính cuộn dây thay đổi sẽ thực sự làm thay đổi lực không như mong muốn. Trường hợp ứng dụng hệ truyền động điện bám đảm bảo được sức căng liên tục nhưng cần thiết bị chuyên dụng để đo lực trực tiếp hay gián tiếp đặt sau thiết bị ra dây.

2. Phương pháp

2.1 Mô hình hệ thống

Sơ đồ hệ thống điều khiển đồng bộ tốc độ của dây chuyền với bộ bù (khâu bù) có thiết bị đo lực căng đặt phía sau tang quay của thiết bị ra dây như Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển điện cơ thiết bị ra dây của dây chuyền: 1-Cảm biến tốc độ (SS); 2-Động cơ xoay chiều 3 pha (thuộc thiết bị ra dây); 3- Khớp nối; 4- Hộp số giảm tốc truyền động dạng bánh răng trục vít; 5-Lô ra dây; 6- Bộ bù; 7-Cảm biến góc quay.

Nguyên lý khâu bù: Con lăn phía dưới di chuyển lên xuống tự do cùng với đòn bẩy so với đòn bầy con lăn cố định bên trên, trên đó đặt cảm biến góc quay SA. Góc quay của cảm biến được xác định bởi vị trí con lăn phía dưới. Tại đó xác định hiệu các vận tốc tỉ lệ của dây chuyền và lô quay ra dây. Con lăn phía dưới sẽ xác định vị trí thiết lập trung bình khi tốc độ của chúng cân bằng nhau và lực kéo bằng với giá trị cho trước. Lực kéo của thiết bị ra dây (con lăn trên) trong thiết bị này được xác định tương đương với trọng lực của đòn bẩy và con lăn phía dưới.

Hệ truyền động điện bám của thiết bị ra dây được thực hiện trên cơ sở truyền động điện điều chỉnh tần số động cơ theo phương pháp điều khiển vector tựa từ thông rotor đảm bảo điều chỉnh trơn và phạm vi điều chỉnh tốc độ quay của động cơ truyền động đủ lớn với khi đó mô hình toán của động cơ xoay chiều không đồng bộ 3 pha được mô tả trong hệ tọa độ quay

dq theo hệ phương trình dưới dạng toán tử laplat *p* như sau: [3], [6], [7], [8]

$$\begin{cases} U_{1d} = R_3.(T_3.p+1).I_{1d} - \dfrac{R_2^{'}.L_m}{L_2^2}.\psi_{2d} - \omega_{KC}.\sigma.L_1.I_{1q}; \\ U_{1q} = R_3.(T_3.p+1).I_{1q} + \omega_{KC}.\sigma.L_1.I_{1d} + \dfrac{L_m}{L_2}.z_p.\omega.\psi_{2d}; \\ 0 = (T_2.p+1).\psi_{2d} - L_m.I_{1d}; \\ \omega_{KC} = z_p.\omega + \dfrac{L_m.R_2^{'}}{L_2}.\dfrac{I_{1q}}{\psi_{2d}}; \\ M_e = \dfrac{3}{2}.\dfrac{L_m}{L_2}.z_p.\psi_{2d}.I_{1q}; \\ \omega = \dfrac{1}{J.p}.(M_e - M_c) \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: U_{1d}, U_{1q}, I_{1d}, I_{1q} - là điện áp và dòng điện stator trên các trục *d* và *q*;

Ψ_{2d} - từ thông rotor theo trục *d*;

R_1 - điện trở mạch stator; $R_2^{'}$ - điện trở quy đổi của mạch rotor về stator;

$R_3 = R_1 + R_2^{'} \cdot \dfrac{L_m^2}{L_2^2}; T_3 = \dfrac{\sigma \cdot L_1}{R_3}; T_2 = \dfrac{L_2}{R_2^{'}}$; với $\sigma = 1 - \dfrac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ - Hệ số tản toàn phần;

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ - là điện cảm tương đương của cuộn dây stator; $L_{1\sigma}$ - là điện cảm tản của cuộn dây stator; L_m- là điện cảm tổng được tạo nên bởi từ thông trong khe hở không khí.

$L_2 = L_{2\sigma}^{'} + L_m$- là điện cảm tương đương của cuộn dây rotor; $L_{2\sigma}^{'}$ - là điện cảm tản quy đổi của cuộn dây rotor về stator;

z_p - là số đôi cực; ω, ω_{KC} - tốc độ động cơ và góc bất kỳ của hệ tọa độ quay;

J, M_e, M_c - tương ứng là mô men quán tính, mô men điện từ của động cơ và mô men cản;

Khi đó sơ đồ cấu trúc của hệ thống đồng bộ và ổn định tốc độ dây chuyền sản xuất bọc cáp điện trên cơ sở hệ bám xoay chiều điều khiển véctơ như Hình 3.

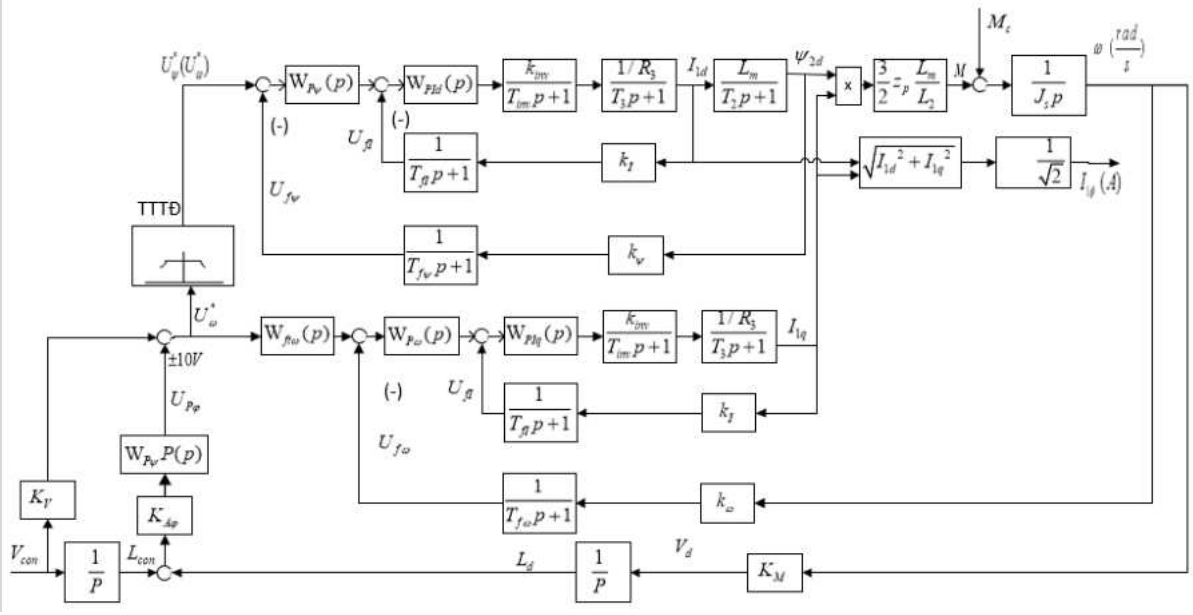
Trong đó $W_{PI}(p); W_{P\Psi}(p); W_{P\omega}(p)$- Các hàm truyền của các bộ điều chỉnh dòng điện, từ thông và tốc độ; k_I - hệ số phản hồi theo dòng điện; k_Ψ - hệ số phản hồi theo từ thông rotor; k_ω - hệ số phản hồi theo tốc độ; T_{fI} - Hằng số thời gian của mạch hồi tiếp theo dòng điện; $T_{f\Psi}$ - Hằng số thời gian của mạch hồi tiếp theo từ thông; $T_{f\omega}$ - Hằng số thời gian của mạch phản hồi theo tốc độ. k_{inv} và T_{inv} là các hệ số khuếch đại và hằng số thời gian của bộ biến đổi.

- Tốc độ tỉ lệ của băng chuyền V_{con}; Tốc độ góc lô ra dây ω_d; Vận tốc dài trên lô ra dây L_d tương ứng với vận tốc V_d của lô ra dây; Độ dài *L* tương ứng với tốc độ tỉ lệ của băng chuyền V_{con}; Tín hiệu điện áp phản hồi âm tốc độ $U_{f\omega}$; Tín hiệu điện áp phản hồi từ thông $U_{f\psi}$; Điện áp đặt từ thông U_ψ^*; Điện áp đặt tốc độ U_ω^*; Điện áp đặt vị trí $U_\varphi^* = K_{A\varphi}.\Delta L$ với $K_{A\varphi}$ là hệ số truyền cảm biến vị trí của bộ bù; Đường kính vị trí khâu bù ΔL;

Mô men quán tính truyền động điện tương ứng với các trạng thái của lô ra dây rỗng, đầy J_S.

- Bộ điều chỉnh vị trí: P; PI với hệ số khuếch đại $K_{P\varphi}$; Bộ điều chỉnh tốc độ PI với hệ số

khuếch đại $K_{P\omega}$ tương ứng với các trạng thái của lô ra dây rỗng, đầy; Khâu tạo từ thông đặt (TTTĐ) tạo điện áp U_{ψ}^{*}



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc của hệ điều khiển tự động tuyến tính liên tục bộ truyền động điện bám trên cơ sở động cơ không đồng bộ điều chỉnh tần số sử dụng điều khiển véc tơ.

- Khâu bù xác định hiệu các vận tốc tỉ lệ của băng chuyền và lô ra dây. Đường kính vị trí bù $\Delta L = f(V_{con}, V_d)$; Momen ma sát trên trục động cơ và Momen ma sát của cơ cấu máy đến trục động cơ là: $\Delta M_{cmo} + \Delta M_{cme}$

- Tín hiệu bù theo tốc độ băng chuyền trên đầu vào vòng điều chỉnh tốc độ với hệ số truyền K_V để loại bỏ khả năng dẫn tới sự bão hòa của các bộ điều chỉnh trong các chế độ động học khi tốc độ băng chuyền đạt cực đại, đồng thời nó làm trị điện áp đầu ra bộ điều chỉnh vị trí giảm.

- Xung động điều hòa tức thời của băng chuyền do tác động của nhiễu ngoài đến băng chuyền: $\Delta V_{con}(t) = \Delta_V . V_{con} . \sin(f_B . t)$. Trong đó Δ_V - là giá trị thay đổi tương đối của tốc độ tỉ lệ băng chuyền, f_B - tần số tác động nhiễu Hz.

- Hệ quả của sự sắp xếp không đều đặn trên lô ra day với bán kính là $R_d(t) = R_{do} . (1 - \Delta_d . \sin(\omega_d . t))$. Trong đó Δ_d - là giá trị thay đổi tương đối của bán kính lô ra dây và dẫn tới sự thay đổi tuần hoàn tốc độ tỉ lệ tức thời của lô ra dây cũng như làm thay đổi tuần hoàn giá trị mô men tải truyền động tức thời:

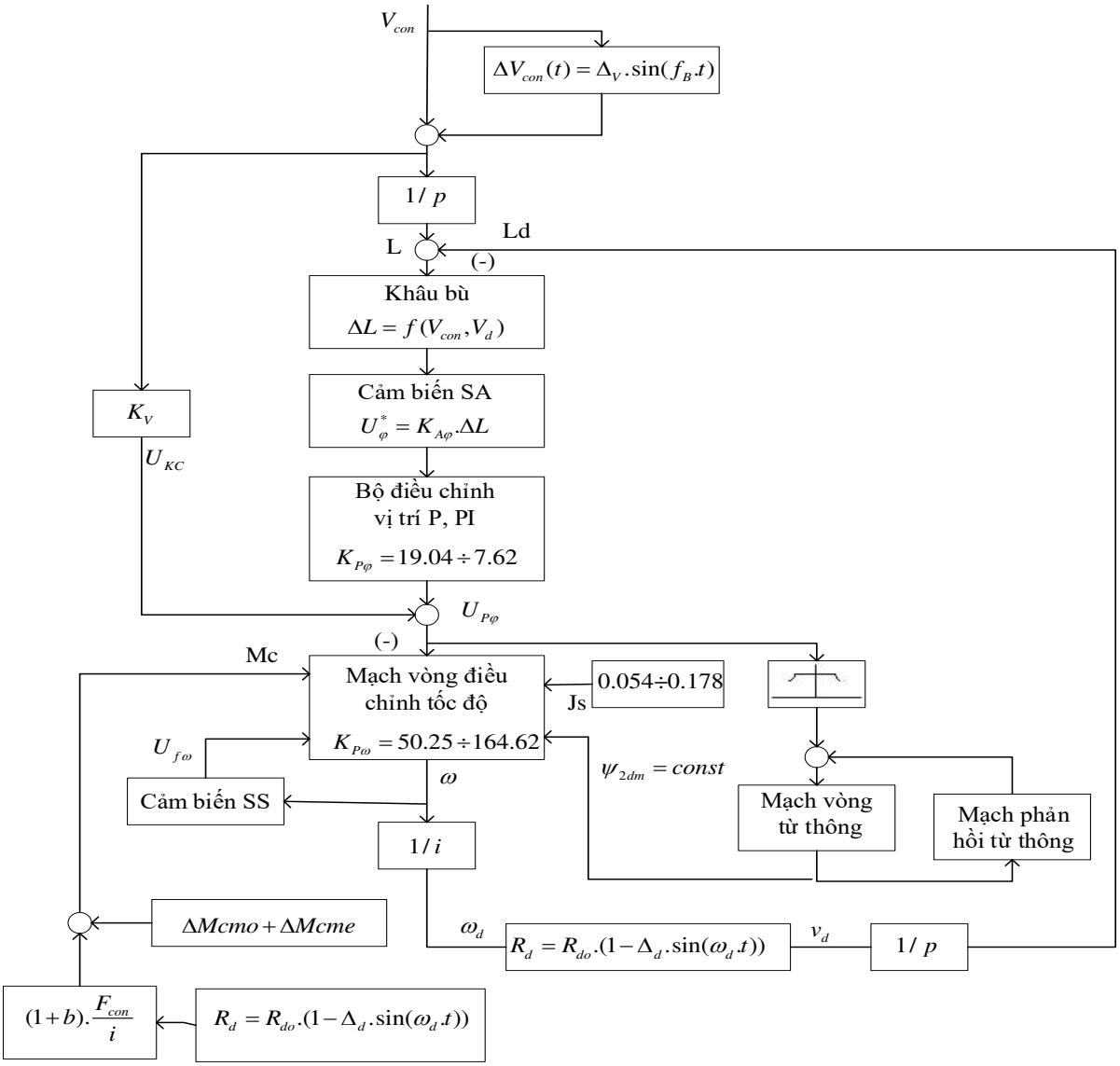
$$V_d = \omega . \frac{1}{i} . R_{do} . (1 - \Delta_d . \sin(\omega_d . t)) \tag{2}$$

$$M_{c\,pre}(t) = (1 + b) . \frac{F_{con} . R_{do} . (1 - \Delta_d . \sin(\omega_d . t))}{i} \tag{3}$$

$$M_c = M_{c\,pre} + M_{cmo} + M_{cme} \tag{4}$$

2.2. Thuật toán điều khiển hệ thống

Trên cơ sở đó ta xây dựng sơ đồ thuật toán điều khiển như sau:



Hình 4. Sơ đồ thuật toán điều khiển

Nguyên lý làm việc: Hệ thống đảm bảo đồng bộ tốc độ, vị trí lô quay ra dây V_d và tốc độ V_{con} của dây chuyền với lực căng dây chuyền đặt trước. Tốc độ động cơ (Master) thiết bị kéo sản phẩm có thể thay đổi hoặc không đổi. Tốc độ lô ra dây cung cấp phôi sản phẩm liên tục thay đổi do bán kính cuộn cung cấp phôi sản phẩm liên tục thay đổi trong quá trình làm việc, vì vậy mà tốc độ góc quay truyền động điện của thiết bị ra dây cần phải điều chỉnh liên tục. Nguyên lý làm việc của hệ bám có thể được mô tả như sau:

- Khi tốc lô quay ra dây nhỏ hơn tốc độ cần đồng bộ tương ứng với tốc độ Vcon, lực căng F đặt trước dẫn đến vị trí bù sẽ là $-\frac{\Delta L}{2}$ và cảm biến góc quay lệch theo một góc $-\frac{\Delta\varphi}{2}$. Cảm biến góc quay (SA) đưa tín hiệu giá trị điện áp tăng lên tương ứng góc lệch với hệ số truyền cảm biến vị trí tương tự $K_{A\varphi}$ vào đầu vào bộ điều chỉnh vị trí của bộ điều khiển-Biến tần. Điện áp đầu ra bộ điều chỉnh vị trí là giá trị đặt cho vòng điều chỉnh tốc độ kín với bộ điều chỉnh tốc độ được tổng hợp theo tiêu chuẩn tối ưu môdun, có tín hiệu phản hồi âm tốc độ từ cảm biến phát tốc (SS) đưa về. Do đó biến tần sẽ điều khiển tốc độ động cơ xoay chiều ba

pha thiết bị ra dây nhanh chóng tăng lên, qua bộ giảm tốc trục vit bánh răng truyền động cho lô quay tiếp nhận bám theo tốc độ cần đồng bộ và lực căng được ổn định và quá trình hoạt động được thực hiện tương tự theo chiều tăng của các đại lượng.

Hệ truyền động này bám tốc độ, bám vị trí theo mét dài. Quá trình điều khiển khởi động, hãm dừng và làm việc đều liên quan đến hai trường hợp như trên.

2.3. Tổng hợp các vòng điều chỉnh

Các bộ điều chỉnh dòng điện, từ thông, tốc độ và vị trí theo sơ đồ cấu trúc điều chỉnh lệ thuộc trên hình 3 được thực hiện trên cơ sở tối ưu mô đun và tối ưu đối xứng với phản hồi là khâu quán tính. [1], [2], [6], [7]

Trường hợp chung khi tối ưu vòng điều chỉnh theo tối ưu mô đun, khi đó hàm truyền đạt hệ hở mong muốn có dạng:

$$W_{ho.mm}(p) = \frac{1}{a_к \cdot T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)} \tag{5}$$

Khi tối ưu vòng điều chỉnh theo tối ưu đối xứng, khi đó hàm truyền đạt hệ hở mong muốn có dạng:

$$W_{ho.mm}(p) = \frac{a_к \cdot b_к \cdot T_\mu p + 1}{a_к^2 \cdot b_к \cdot T_\mu^2 p^2 \cdot (T_\mu p + 1)} \tag{6}$$

Tối ưu đối xứng đáp ứng đầu ra có độ quá chỉnh lớn, để giảm độ quá chỉnh thường đặt bộ lọc đầu vào có dạng:

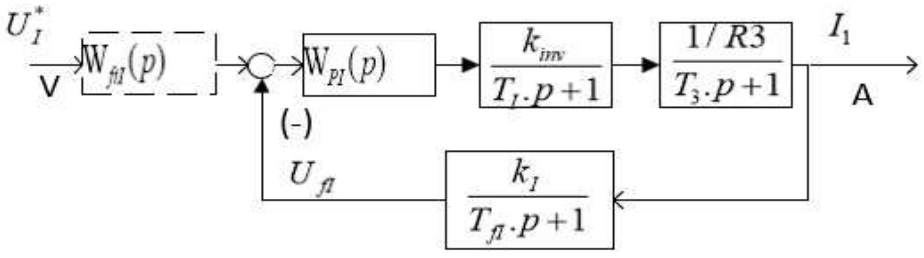
$$W_{loc}(p) = \frac{1}{a_к \cdot b_к \cdot T_\mu p + 1} \tag{7}$$

Trong đó: $a_К, b_К$ - hệ số tối ưu của vòng thứ k;

$T_\mu = \sum t_{\mu i}$ - hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng;

2.3.1 Tổng hợp vòng dòng điện

Sơ đồ cấu trúc vòng dòng điện với phản hồi quán tính của động cơ được thể hiện như trên hình 5.



Hình 5. Sơ đồ cấu trúc vòng dòng điện

Các vòng dòng điện I_{1d} và I_{1q} tương đương như nhau. Vòng dòng điện được đặc trưng bởi một hằng số thời gian lớn ở kênh trực tiếp T_{3s} và hai hằng số thời gian nhỏ ở kênh trực tiếp $T_I = T_{inv}$ và trong mạch phản hồi T_{fI}.

Bộ điều chỉnh dòng trên cơ sở tối ưu mô đun là bộ điều chỉnh PI với hàm truyền:

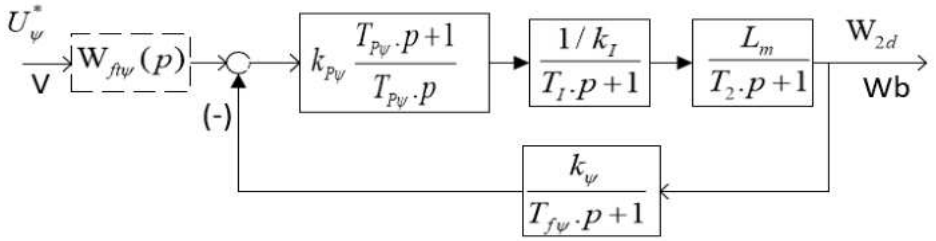
$$W_{PI}(p) = k_{PI}.\frac{T_{PI}.p+1}{T_{PI}.p} \quad (8)$$

Trong đó: $k_{Pi} = \frac{T_3.R_3}{k_{inv}.k_I.a_I.(T_I+T_{fI})}$ là hệ số khuếch đại của bộ điều chỉnh dòng; $T_{\mu I} = T_I + T_{fI}$ là hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng dòng điện; $k_I = \frac{U_I^*}{I_{1q\max}}$ là hệ số phản hồi theo dòng điện; U_I^* - là giá trị cực đại của điện áp đầu vào vòng dòng điện; a_I=2 - hệ số tối ưu của vòng dòng điện; $T_{PI} = T_3$ - là hằng số thời gian của bộ điều chỉnh dòng.

2.3.2 Tổng hợp vòng từ thông

Khi tối ưu hóa vòng từ thông thì vòng dòng điện kín tối ưu bên trong được cho dạng hàm truyền rút gọn bậc một như sau: $W_{fKI}(P) \approx \frac{1/k_I}{T_{TI}.P+1}$. Trong đó $T_{TI} = a_I.T_{\mu I}$ - là hằng số thời gian tương đương của vòng dòng điện.

Vòng từ thông được đặc trưng bởi một hằng số thời gian lớn T_2 và một hằng số thời gian nhỏ T_{TI} ở kênh trực tiếp, còn ở kênh hồi tiếp là $T_{f\Psi}$ như hình 6.



Hình 6. Sơ đồ cấu trúc vòng từ thông

Vòng từ thông được đặc trưng bởi một hằng số thời gian lớn T_2 = 0.0929(s) và một hằng số thời gian nhỏ T_{TI} = 0.000792(s) ở kênh trực tiếp, còn ở kênh hồi tiếp là $T_{f\psi}$ =0.00267(s).

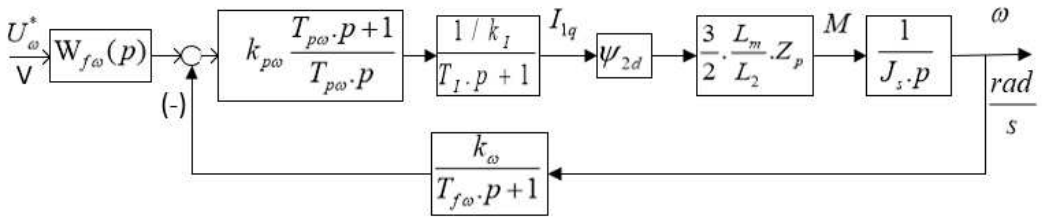
Bộ điều chỉnh từ thông theo tối ưu mô đun là bộ điều chỉnh PI với hàm truyền:

$$W_{P\Psi}(p) = k_{P\Psi}.\frac{T_{P\Psi}.p+1}{T_{P\Psi}.p} \quad (9)$$

Với $T_{P\psi} = T_2$ - hằng số thời gian của bộ điều chỉnh từ thông. $k_{P\psi} = \frac{T_2.k_I}{L_m.k_\psi}.\frac{1}{a_\psi.T_{\mu\psi}}$ -là hằng số khuếch đại của bộ điều chỉnh từ thông. Trong đó: $T_{\mu\psi} = T_{TI} + T_{f\psi}$ - là hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng được tối ưu; $k_\psi = \frac{U_{\psi\max}^*}{\psi_{2dm}}$ - hệ số kênh hồi tiếp theo từ thông; $U_{\psi\max}^*$ - giá trị điện áp cực đại đầu vào vòng từ thông; $a_\psi = 2$ - hệ số tối tưu vòng từ thông; $T_{P\psi} = T_2$ – hằng số thời gian của bộ điều chỉnh từ thông.

2.3.3 Tổng hợp vòng tốc độ

Khi tối ưu hóa vòng điều chỉnh tốc độ thì vòng điều chỉnh dòng điện kín bên trong được tối ưu và rút gọn thành hàm truyền bậc nhất: $W_{fKI}(P) \approx \frac{1/k_1}{T_{TI}.P+1}$, trong đó $T_{TI} = a_I.T_{\mu I}$ - hằng số thời gian tương đương của vòng điều chỉnh dòng điện được tối ưu. Khi đó sơ đồ cấu trúc vòng điều chỉnh tốc độ như hình 7.



Hình 7. Sơ đồ cấu trúc của vòng điều chỉnh tốc độ

Hàm truyền bộ điều chỉnh theo tối ưu đối xứng là bộ PI có dạng:

$$W_{P\omega}(P) = k_{P\omega}.\frac{T_{P\omega}.P+1}{T_{P\omega}.P} \tag{10}$$

Trong đó $k_{P\omega} = \frac{(J_{s\min} \div J_{s\max}).k_I}{\psi_{2dm}.\frac{3}{2}.\frac{L_m}{L_2}.z_p.k_\omega}.\frac{1}{a_\omega.T_{\mu\omega}}$, $T_{P\omega} = b_\omega.a_\omega.T_{\mu\omega}$

Với $T_{\mu\omega} = T_\omega + T_{f\omega} = T_{TI} + T_{f\omega}$ - hằng số thời gian nhỏ tương đương; $k_\omega = \frac{U^*_{\omega\max}}{\omega_{\max}}$ - hệ số kênh phản hồi theo tốc độ; $\omega_{\max}$ - giá trị tốc độ cực đại; $U^*_{\omega\max}$ - giá trị điện áp cực đại vòng điều chỉnh tốc độ. $b_\omega = a_\omega = 2$ - các hệ số tối ưu của vòng điều chỉnh tốc độ.

Vì vòng điều chỉnh tốc độ là vòng bên trong vòng điều chỉnh vị trí, khi thực hiện theo tối ưu đối xứng đặc trưng bằng độ quá chỉnh lớn, cho nên đầu vào vòng điều chỉnh tốc độ đặt hai bộ lọc để giảm độ quá chỉnh với các hàm truyền có dạng như sau:

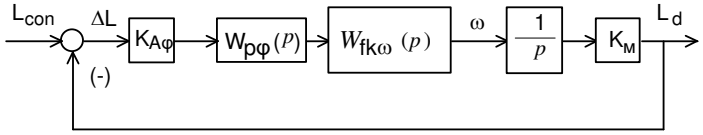
$$W_{ft\omega}(p) = \frac{1}{T_{ft\omega}.p+1} \tag{11}$$

Với: $T_{ft\omega} = T_{ft\omega 2} = T_{f\omega}$; $T_{ft\omega} = T_{ft\omega 1} = b_\omega.a_\omega.T_{\mu\omega}$.

2.3.4 Tổng hợp vòng vị trí

a. Tối ưu hóa vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh P

Vòng điều chỉnh vị trí được đặc trưng bởi một kênh phản hồi không quán tính có sở đồ cấu trúc như Hình 8.



Hình 8. Sơ đồ cấu trúc của vòng điều chỉnh vị trí

Khi tối ưu hóa vòng điều chỉnh vị trí thì vòng điều chỉnh tốc độ kín với bộ điều chỉnh PI được tối ưu bên trong với hai bộ lọc đầu vào có dạng hàm truyền rút gọn bậc 3:

$$W_{fK\omega}(p)=\frac{1}{k_\omega}\cdot\frac{1}{b_\omega.a_\omega^2.T_{\mu\omega}^3.p^3+b_\omega.a_\omega^2.T_{\mu\omega}^2.p^2+b_\omega.a_\omega.T_{\mu\omega}.p+1} \quad (12)$$

Vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh theo tối ưu mô đun

Khi đó hàm truyền của bộ điều chỉnh điều chỉnh vị trí có dạng khâu tỷ lệ P: $W_{P\varphi}=k_{P\varphi}$

$$k_{P\varphi}=\frac{k_\omega}{k_M.k_{A\varphi}.a_\varphi.T_{\mu\varphi}} \quad (13)$$

Trong đó: $T_{\mu\varphi}=b_\omega.a_\omega.T_{\mu\omega}$- hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng điều chỉnh vị trí; $a_\varphi=2$- hệ số tối ưu vòng điều chỉnh vị trí;

Vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh theo tối ưu đối xứng

Khi đó hàm truyền của bộ điều chỉnh vị trí có dạng khâu PI

$$W_{P\varphi}(p)=k_{P\varphi}.\frac{T_{P\varphi}.p+1}{T_{P\varphi}.p} \quad (14)$$

Trong đó $k_{P\varphi}=\frac{k_\omega}{k_M.k_{A\varphi}.a_\varphi.T_{\mu\varphi}}$; $T_{P\varphi}=b_\varphi.a_\varphi.T_{\mu\varphi}$; $T_{\mu\varphi}=b_\omega.a_\omega.T_{\mu\omega}$- hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng điều chỉnh vị trí; $b_\varphi=a_\varphi=2$- các hệ số tối ưu của vòng vị trí.

3. Mô phỏng và đánh giá kết quả

Thông số động cơ xoay chiều không đồng bộ 3 pha của lô ra dây như Bảng 1.

Bảng 1. *Thông số động cơ xoay chiều không đồng bộ 3 pha của tang quay tiếp nhận*

P (Kw)	R_1 (Om)	R_2' (Om)	R_3 (Om)	L_1 (H)	L_2 (H)	L_m (H)	T_2 (s)	T_3 (s)	σ	Ψ_{2ddm} (Wb)
2,2	3,53	3,42	6,602	0,3135	0,3178	0,301	0,0929	0,00429	0,0903	0,95

Thông số bộ biến đổi (biến tần) như bảng 2.

Bảng 2. *Thông số bộ biến đổi (biến tần)*

K_{inv}	T_{inv} (s)	f_{pwm} (KHz)	$U_{đk\ max}$ (V)	$U_{inv\ max}$ (V)
31,1	$0{,}625.10^{-4}$	8	±10	± 311,17

Thông số vòng dòng điện và từ thông như bảng 3.

Bảng 3. *Thông số vòng dòng điện và từ thông*

$U_{SI\ max}$ (V)	$U_{S\Psi\ max}$ (V)	k_Ψ $(\frac{V}{Wb})$	$T_{f\Psi}$ (s)	T_{ftI} (s)	k_I $(\frac{V}{A})$	T_{fI} (s)
± 10	±10	10,53	0,00267	0,000333	1,14	0,000333

Thông số vòng tốc độ và vị trí như bảng 4.

Bảng 4. *Thông số vòng tốc độ và vị trí*

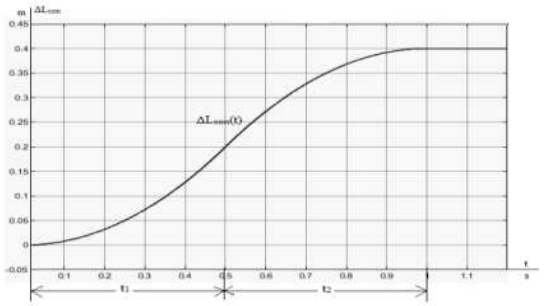
$T_{ft\omega 1}$ (s)	$T_{ft\omega 2}$ (s)	k_{ω} $(\frac{V.s}{rad})$	$T_{f\omega}$ (s)	$U_{S\omega\ max}$ (V)	$U_{S\varphi\ max}$ (V)	$J_S(D_d)$ (Kg.m^2)	K_M (m/rad)	K_V (v.s/rad)	$K_{A\varphi}$
0,01385	0,00267	0,0659	0,00267	±10	±10	0,054÷ 0,178	0,0125 ÷ 0,03125	3,69	10

Những thay đổi tuần hoàn tốc độ tỉ lệ băng chuyền và tốc độ tuyến tính của lô ra dây về nguyên tắc đều gây ảnh hưởng giống nhau lên sự làm việc truyền động của thiết bị ra dây.Vì vậy chỉ cần đưa ra những kết quả đánh giá ảnh hưởng lên sự làm việc truyền động của các tác động nhiễu cơ cấu bên trong thiết bị tiếp nhận.

*** Kết quả mô phỏng:**

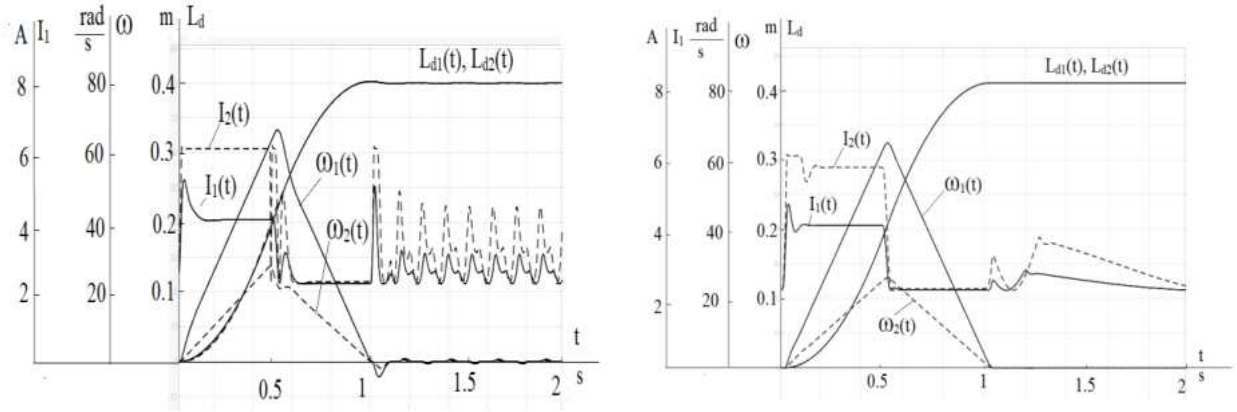
-Xét quá trình giữ bộ bù ở vị trí trung gain (Vcon=0):

Thiết lập tác động nhiễu nhờ bộ đặt tốc độ có giới hạn S của tác động nhiễu $\Delta L_{con}(t)$ được thể hiện như Hình 9.



Hình 9. Đặc tính tác động nhiễu $\Delta L_{con}(t)$

Các kết quả mô phỏng quá trình làm trơn tác động nhiều $\Delta L_{con}(t)$ bởi hệ truyền động điện bám của thiết bị ra dây như Hình 10.



a, Vòng điều khiển vị trí với bộ điều chỉnh PI *b,Vòng điều khiển vị trí với bộ điều khiển P*

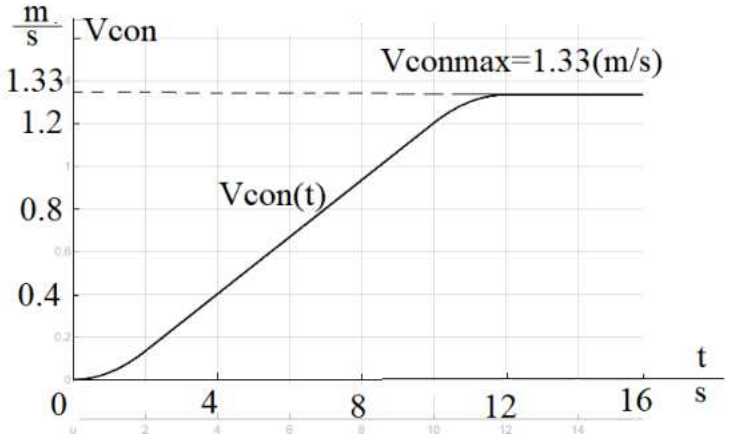
Hình 10. Các quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí khi làm trơn tác động nhiễu $\Delta L_{con}(t)$ với 2 trường hợp lô ra dây rỗng(1) và lô ra dây đầy(2)

Quá trình giữ bộ bù ở vị trí trung gian ở chế độ (*Vcon=0)* với bộ điều chỉnh PI điều chỉnh vị trí có sự tự dao động tốc độ và dòng điện, sự dao động này không dẫn tới sự bão hòa của bộ điều chỉnh vòng tốc độ, dòng điện động cơ, không đạt tới giá trị cực đại cho phép, sự làm việc lâu dài của hệ thống có thể dẫn tới sự quá nhiệt động cơ (dòng điện dao động dẫn

đến xuất hiện nhiễu sóng hài bậc cao) hoặc bộ biến đổi và kết quả là dẫn tới sự sai lệch truyền động. Với bộ điều chỉnh P không có hiện tượng tự dao động và khi có tác động nhiễu bên ngoài thì dòng điện động cơ sẽ không vượt quá giá trị dòng điện tải tĩnh.

- Xét chế độ khởi động, làm việc của băng chuyền:

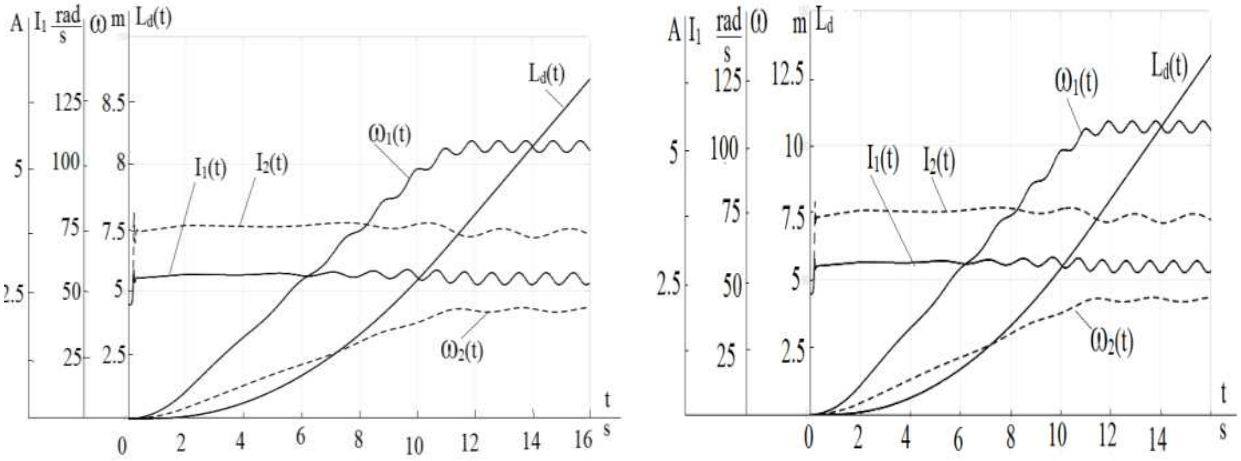
Thực hiện thiết lập việc khởi động băng chuyền từ bộ đặt tốc độ có giới hạn S và thời gian khởi động băng chuyền như trên Hình 11.



Hình 11. Đặc tính tốc độ của bộ đặt tốc độ có giới hạn S

Sự thay đổi tuần hoàn tốc độ tỷ lệ băng chuyền và tốc độ tuyến tính của lô ra dây về nguyên tắc đều gây ảnh hưởng giống nhau lên sự làm việc truyền động của thiết bị tiếp nhận. Vì vậy bài toán đưa ra những kết quả đánh giá ảnh hưởng lên sự làm việc truyền động của các tác động nhiễu cơ cấu bên trong thiết bị ra dây. Sự thay đổi tuần hoàn đường kính lô ra dây trên thiết bị cung cấp phôi đồng thời dẫn tới các dao động tuần hoàn như sự dao động tốc độ tuyến tính tức thời lô ra dây $\Delta V_d(t)$ cũng như mô men tải $\Delta M_c(t)$, mô men quán tính $\Delta J(t)$. Để đánh giá mức độ ảnh hưởng ta tiến hành mô phỏng các quá trình truyền động điện với từng phần riêng và kết hợp.

Các quá trình quá độ của dòng điện, tốc độ và chiều dài sản phẩm trong vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng truyền khi tính tới tác động nhiễu $\Delta V_d(t)$ như Hình 12.



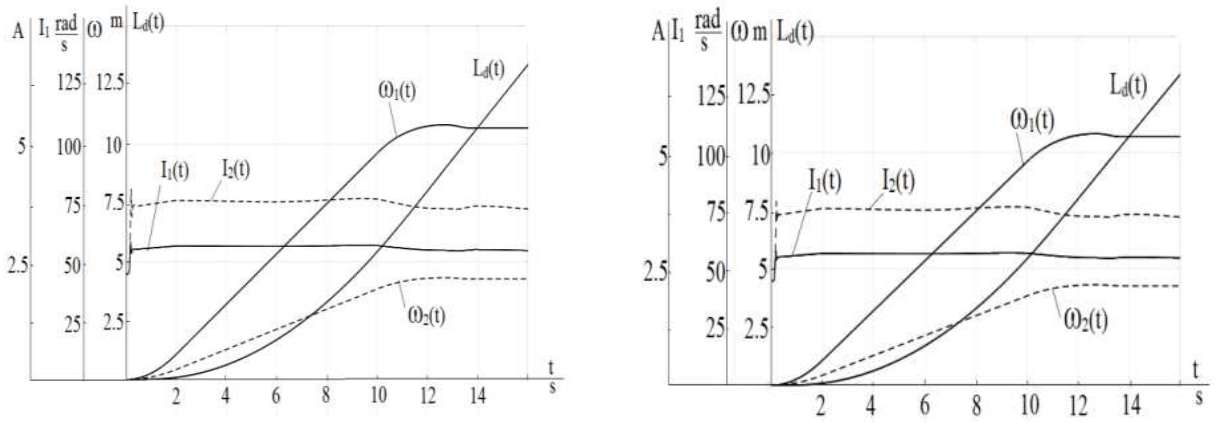
a, *vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh PI* b, *vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh P*

Hình 12. Quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyền khi tính tới các tác động nhiễu bên trong $\Delta V_d(t)$ khi lô ra rỗng(1) và khi lô ra đầy(2)

Tốc độ động cơ và dòng điện động cơ ra dây sẽ dao động để bù lại sự thay đổi của tốc độ dài lô ra dây. Các quá trình quá độ đảm bảo theo bộ đặt tốc độ giới hạn S.

Các quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyền khi tính tới tác động nhiễu $\Delta M_c(t)$ như Hình 13.

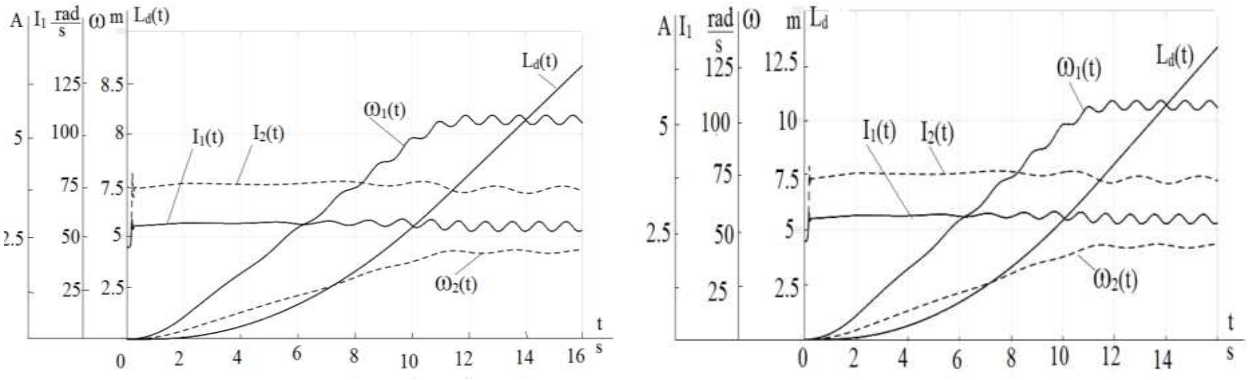
Kết quả cho thấy đáp ứng tốc độ dài khi lô ra dây rỗng và đầy bám sát nhau; đường tốc độ động cơ và dòng điện động cơ không trơn không có hiện tượng tự dao động. Như vậy dao động mô men tải gây nên có thể được giảm rất tốt nhờ vòng điều chỉnh tốc độ với bộ điều chỉnh PI. Hệ truyền động điện của thiết bị ra dây sẽ giữ chính xác tốc độ dài đặt của lô ra dây.



a, *vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh PI* b, *vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh P*

Hình 13. Quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyền khi tính tới các tác động nhiễu bên trong $\Delta M_c(t)$ khi lô ra rỗng(1) và khi lô ra đầy(2)

Các quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyền khi tính tới tác động nhiễu $\Delta V_d(t)$ và $\Delta M_c(t)$ như Hình 14.



a, *vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh PI* b, *vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh P*

Hình 14. Quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyền khi tính tới các tác động nhiễu bên trong $\Delta V_d(t)$, $\Delta M_c(t)$ khi lô ra rỗng(1) và khi lô ra đầy(2)

Từ 2 đồ thị ta thấy tốc độ dài khi lô ra dây đầy và lô ra dây rỗng bám sát, vận tốc và dòng điện có dao động khi lô ra dây rỗng. Khi tác động phối hợp các dao động tuần hoàn pha hình sin của tốc độ và momen tải có thể bù từng phần các ảnh hưởng của chúng tới sự làm việc của truyền động thiết bị cung cấp phôi.

Từ các kết quả mô phỏng nhận thấy cả hai phương án lựa chọn bộ điều chỉnh vị trí P hoặc PI có thể đảm bảo giữ vững sức căng và tốc độ dài không đổi của hệ thống ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyền.

4. Kết luận

Kết quả tính toán và mô phỏng đáp ứng được các yêu cầu về bám tốc độ dài và ổn định trong quá trình sản xuất. Các kết quả tính toán phân tích và mô hình mô phỏng đảm bảo tính chính xác khi lựa chọn động cơ điện, bộ biến tần và thực tế hóa hệ thống tự động điều chỉnh truyền động điện thiết bị cung cấp phôi trên cơ sở điều chỉnh tần số động cơ không đồng bộ. Còn hệ thống tự động điều chỉnh với điều khiển véc tơ đảm bảo ổn định các thông số kỹ thuật của dây chuyền ở các chế độ làm việc và khi có tác động nhiễu.

Tài liệu tham khảo

Tiếng Việt:

[1]. Bùi Quốc Khánh , *Điều chỉnh truyền động điện tự động*, Nhà xuất bản KHKT, 2001

[2]. Nguyễn Thương Ngô, *Lý thuyết điều khiển tự động thông thường và hiện đại*, Nhà xuất bản KHKT, 2007

[3]. Nguyễn Phùng Quang - Andreas Dittrich, *Truyền động điện thông minh*, Nhà xuất bản KHKT, 2008

[4]. Nguyễn Phùng Quang, *Matlab và Simulink dành cho kĩ sư điều khiển tự động*, Nhà xuất bản KHKT, 2004

[5]. Phạm Tuấn Thành, *Mô phỏng các hệ điện cơ*, Nhà xuất bản Quân Đội Nhân Dân, 2011

[6]. Phạm Tuấn Thành, *Phân tích và mô phỏng các hệ truyền động điện tự động*, Nhà xuất bản Quân Đội Nhân Dân, 2019

[7]. Đào Hoa Việt (2010), *Phân tích và tổng hợp hệ thống truyền động tự động*, Nhà xuất bản Quân Đội Nhân Dân, 2010

[8]. Rik De Doncker, Duco W. J, André Veltman, *Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control*, Springer Press, 2010

[9]. Fouad Giri, *AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications*, John Wiley & Sons Press, 2010

Abstract: *Present the method of synchronization and speed stabilization in the process of electrical cable coating based on the application of a vector control drive system using inverters for actuators with varying torque and load. Develop controllers using optimal module and optimal symmetry methods in the drive system with dependent control loops and a simulation model on Matlab Simulink to evaluate the effectiveness of the proposed method.*

***Keywords*:** Vector control, speed synchronization, module optimization, symmetry optimization.

Tổng hợp bộ điều khiển hợp thể thích nghi cho hệ 2-DOF Helicopter dựa trên mạng nơron RBF

Bùi Xuân Hải[1], Nguyễn Văn Xuân[1], Phan Nguyên Hải[1], Nguyễn Xuân Chiêm[1]

[1]*Học viện Kỹ thuật quân sự*

[*]Email: buixuanhai.mta@gmail.com, Contact number: 0977586327

Tóm tắt

Bài báo giới thiệu về bài toán tổng hợp luật điều khiển hợp thể thích nghi cho hệ thống trực thăng hai bậc tự do (2-DOF Helicopter) dựa trên mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF neural network) khi hệ thống có thành phần không chắc chắn. Đầu tiên, luật điều khiển hợp thể cho hệ thống 2-DOF Helicopter dựa trên mô hình động lực học với thành phần không chắc chắn. Tiếp theo, mạng nơ-ron RBF được sử dụng để ước tính các thành phần không chắc chắn có trong hệ thống. Kết quả luật điều khiển được mô phỏng trên phần mềm MATLAB chứng minh hiệu quả của luật điều khiển đề xuất.

Từ khóa: *Điều khiển hợp thể thích nghi; Mạng nơ-ron RBF; Hệ thống trực thăng hai bậc tự do.*

1. Mở đầu

Hệ thống 2-DOF Helicopter là mô hình nguyên mẫu của trực thăng có hai bậc tự do trong phòng thí nghiệm. Sơ đồ 2-DOF Helicopter được mô tả trong Hình 1, bao gồm một thanh ngang quay quanh một khoảng cách cố định. Hệ thống được điều khiển bởi hai cánh quạt vuông góc nằm ở hai đầu thông qua động cơ. Góc nghiêng của cánh quạt là cố định, do đó lực đẩy được điều khiển bởi tốc độ quay của cánh quạt. Hệ thống 2-DOF Helicopter được đặc trưng bởi động lực học liên kết chéo phi tuyến tính cao và nhiễu loạn do chuyển động của luồng không khí, dẫn đến sự phức tạp của các vấn đề điều khiển.

Điều khiển hệ thống trực thăng đã được nghiên cứu rộng rãi bằng nhiều kỹ thuật điều khiển khác nhau. Trong nghiên cứu [1,2] sử dụng bộ điều khiển PID thông thường và bộ điều khiển PD kết hợp với thuật toán tối ưu hóa di truyền. Trong nghiên cứu [3,4], bộ điều chỉnh tuyến tính bậc hai (LQR) được sử dụng cho hệ thống này và nghiên cứu [5] trình bày bộ điều khiển dự đoán mô hình (MPC). Các luật điều khiển này được thiết kế dựa trên các mô hình tuyến tính hoặc mô hình gần điểm làm việc, do đó chất lượng điều khiển vẫn còn một số hạn chế nhất định. Trong các nghiên cứu [6-9], các luật điều khiển dựa trên các phương pháp điều khiển phi tuyến tính đã được trình bày, mang lại kết quả khá ấn tượng. Bộ điều khiển chế độ trượt dựa trên phương pháp ADAR được trình bày trong nghiên cứu [6], kết quả cho thấy tính ổn định cao của luật điều khiển, thời gian đáp ứng của hệ thống nhỏ. Luật điều khiển backstepping được trình bày trong các nghiên cứu [8,9] đảm bảo hệ thống ổn định với tính bền vững cao. Nhưng luật điều khiển này có thời gian đáp ứng lớn. Bộ điều khiển dựa trên lý thuyết mờ và mạng nơ-ron được trình bày trong các công trình [10,11], kết quả cho thấy hiệu quả của các bộ điều khiển này khi hệ thống có mô hình và nhiễu tác động của mô hình. Trong thực tế, người ta thường phải xem xét các trường hợp hệ thống trực thăng với mô hình toán học không đầy đủ như thành ma sát giữa các khâu, ma sát với môi trường... Như đã biết, điều khiển thích nghi là một cách tiếp cận hữu ích và quan trọng để giải quyết các bất định của hệ thống do khả năng cung cấp ước tính trực tuyến các tham số hệ thống chưa biết bằng cách sử dụng phép đo. Điều khiển thích nghi của hệ thống trực thăng đã được nghiên cứu trong

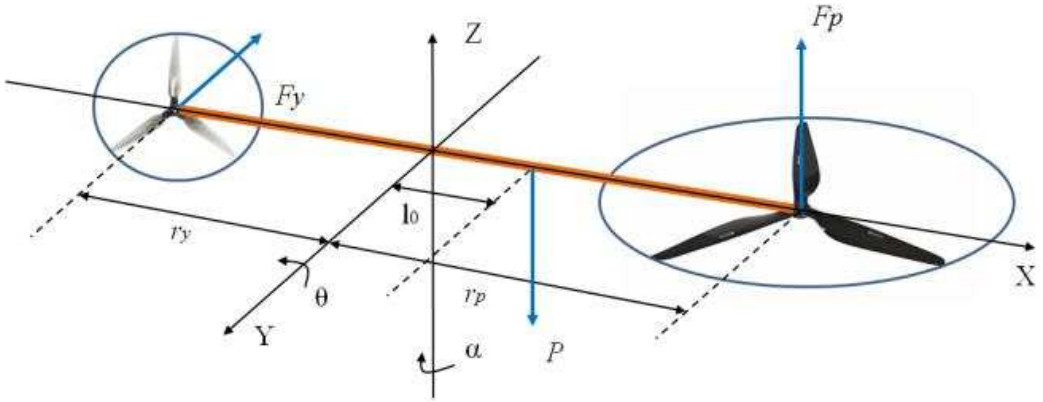
[12,16]. Trong nghiên cứu [12,13], phương pháp điều khiển Backsteping thích nghi tổng thể cho kết quả khá tốt, nhưng thời gian phản hồi vẫn khá lớn. Điều khiển chế độ trượt thích nghi được trình bày trong các nghiên cứu [14] cho thấy kết quả ấn tượng.Trong nghiên cứu [15] trình bày luật điều khiển thích nghi dựa trên hàm Lyapunov và mạng RBF khi có thành phần không chắc chắn và đầu vào bị chặn, cho kết quả khá tốt. Trong nghiên cứu [16] luật điều khiển thích nghi hợp thể khi khối lượng hệ thống thay đổi được trình bày và cho kết quả khá ấn tượng.

Lý thuyết điều khiển hợp thể được Giáo sư A.A. Kolecnikov đề xuất, nó đã được sử dụng rộng rãi để thiết kế bộ điều khiển cho nhiều đối tượng khác nhau [17–22]. Lý thuyết này có một số ưu điểm so với các phương pháp thông thường, chẳng hạn như các bước tổng hợp dựa trên một quá trình gần tự nhiên, với mỗi tín hiệu đầu vào điều khiển hệ thống đến một đa tạp được chỉ định. Trong lý thuyết này, các giá trị mong muốn được coi là bất biến. Phương pháp chính để thiết kế hệ thống điều khiển SCT là phương pháp ADAR. Khi sử dụng phương pháp này, thiết kế luật điều khiển đảm bảo chuyển động của đa tạp bất biến của hệ thống vòng kín từ trạng thái ban đầu tùy ý đến vùng lân cận của đa tạp bất biến mong muốn. Do đó, luật điều khiển không chỉ thực hiện bất biến cần thiết mà còn đảm bảo tính ổn định tiệm cận toàn cục. Điều này cho thấy luật điều khiển có hiệu quả ngay cả khi mô hình có thành phần bất định, nhưng không loại bỏ hoàn toàn hiệu ứng này.

Từ các cơ sở nêu trên, nghiên cứu này đề xuất tiếp cận điều khiển hợp thể dựa trên mạng nơ-ron RBF cho hệ 2-DOF Helicopter, được phát triển thông qua mô hình toán mô tả đối tượng. Để giải quyết vấn đề liên quan đến việc xác định mô hình toán của đối tượng khi xây dựng luật điều khiển trượt, nghiên cứu phát triển các mạng nơ-ron RBF với thuật toán huấn luyện trực tuyến để xấp xỉ các hàm phi tuyến trong luật điều khiển hợp thể. Cấu trúc bài báo gồm các phần như sau: Phần 2 là mô hình toán của hệ thống; Lý thuyết điều khiển hợp thể, mạng RBF và tổng hợp luật điều khiển được trình bày trong phần 3; Mô phỏng và thảo luận được trình bày trong phần 4 và cuối cùng là kết luận.

2. Mô hình hóa toán học hệ 2-DOF Helicopter

2-DOF Helicopter này bao gồm một thanh được xoay trên đế của nó sao cho nó có thể xoay tự do theo cả mặt phẳng ngang và dọc. Có hai rôto (rôto chính và rôto đuôi), được điều khiển bởi động cơ DC ở mỗi đầu của thanh. Hai cánh quạt được điều khiển bằng động cơ điện có tốc độ thay đổi cho phép máy bay trực thăng quay trong mặt phẳng thẳng đứng và nằm ngang (độ cao và độ lệch). Mô hình toán học của 2-DOF Helicopter được phát triển theo các giả định sau [1-3]: Động lực học động cơ không đáng kể so với động lực học của hệ; Ma sát trong hệ thuộc loại ma sát nhớt; Hệ thống cánh quạt - không khí có thể được mô tả phù hợp với các tiên đề của lý thuyết dòng chảy.



Hình 1. Mô hình trực thăng 2-DOF Helicopter

Xây dựng mô hình động học của hệ được phát triển bằng phương trình Euler-Lagrange. Dựa trên [2], chúng ta biết các phương trình sau đây về động lực học của 2-DOF Helicopter:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \dfrac{-M_{heli}\, g\, l_0 \cos(\theta) - B_p \dot{\theta} - M_{heli}\, g\, l_0^2 \dot{\alpha}^2 \sin(\theta)\cos(\theta)}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2} + \dfrac{r_p K_{pp} V_p + K_{py} V_y}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2} \\ \ddot{\alpha} = \dfrac{-B_y \dot{\alpha} + 2 M_{heli}\, l_0^2 \dot{\alpha}\dot{\theta} \sin(\theta)\cos(\theta)}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(\theta)^2} + \dfrac{K_{yp} V_p + r_y K_{yy} V_y}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(\theta)^2} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: θ, α là góc pitch và góc yaw (rad.); V_p, V_y là điện áp của động cơ trước và sau (V); M_{heli} là tổng khối lượng chuyển động của 2-DOF Helicopter (kg), g là gia tốc trọng trường (m/s^2); l_0 là khoảng cách từ trọng tâm 2-DOF Helicopter tới trục quay (m); B_p, B_y là hệ số lực cản chuyển động tác dụng lên trục pitch và trục yaw, J_{eq_p},J_{eq_y} là mômen quán tính tương ứng theo trục nâng và trục xoay, K_{pp}, K_{yy}, K_{py}, K_{yp} là hằng số lực đẩy động cơ trước, sau theo trục nâng và quay, r_p, r_y là khoảng cách từ mỗi động cơ đến tâm quay của trực thăng.

Viết lại dưới dạng phương trình trạng thái với $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$, $x_3 = \alpha$, $x_4 = \dot{\alpha}$ khi có thêm các thành phần không chắc chắn như ma sát giữ các khâu, ta có dạng phương trình tổng quát như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 = \dfrac{-M_{heli}\, g\, l_0 \cos(x_1) - B_p x_2 - M_{heli}\, g\, l_0^2 x_4{}^2 \sin(x_1)\cos(x_1)}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2} + f_\theta(\boldsymbol{x}) + V_\theta \\ \dot{x}_3 = \dot{x}_4 \\ \dot{x}_4 = \dfrac{-B_y x_4 + 2 M_{heli}\, l_0^2 x_4 x_2 \sin(x_1)\cos(x_1)}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(x_1)^2} + f_\alpha(\boldsymbol{x}) + V_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

trong đó $V_\theta = \dfrac{r_p K_{pp} V_p + K_{py} V_y}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2}$; $V_\alpha = \dfrac{K_{yp} V_p + r_y K_{yy} V_y}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(\theta)^2}$; $f_\theta(\boldsymbol{x}), f_\alpha(\boldsymbol{x})$ - là các hàm trơn chưa biết. Các giá trị V_p, V_y được tính từ V_θ, V_α theo công thức sau:

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{r_p K_{pp}}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2} & \dfrac{K_{py}}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2} \\ \dfrac{K_{yp}}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(\theta)^2} & \dfrac{r_y K_{yy}}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(\theta)^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_\theta \\ V_\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. Tổng hợp luật điều khiển hợp thể thích nghi dựa trên mạng RBF

3.1 Nền tảng lý thuyết điều khiển hợp thể

Tổng hợp bộ điều khiển hợp thể bắt đầu bằng cách xác định một biến vĩ mô. Biến này là một hàm của các biến trạng thái hệ thống [17,18]:

$$\psi(t) = \psi(x,t) \tag{4}$$

Mục tiêu điều khiển là buộc hệ thống hoạt động trên đa tạp $\psi = 0$. Người thiết kế có thể chọn các đặc điểm của biến vĩ mô này theo các thông số kỹ thuật điều khiển (ví dụ: giới hạn trong đầu ra điều khiển, v.v.). Trong trường hợp đơn giản nhất, ψ là tổ hợp tuyến tính đơn giản của các biến trạng thái. Sau đó, quá trình này được lặp lại, xác định nhiều biến vĩ mô như các kênh điều khiển vòng trong. Tiếp theo, sự tiến hóa động của các biến vĩ mô thoả mãn cố định theo phương trình:

$$T\dot{\psi}(t) + \psi(t) = 0; \quad T > 0 \tag{5}$$

Trong đó T là tham số thiết kế mô tả tốc độ hội tụ đến đa tạp do biến vĩ mô chỉ định. Cuối cùng, luật điều khiển (sự tiến hóa theo thời gian của đầu ra điều khiển) được tổng hợp theo phương trình (5) và mô hình động của hệ thống.

Tóm lại, các đa tạp đưa ra một ràng buộc mới trên miền của không gian trạng thái, và do đó làm giảm bậc của hệ thống và buộc nó theo hướng ổn định toàn cục. Quy trình tóm tắt ở trên có thể dễ dàng được triển khai như một chương trình máy tính để tổng hợp tự động luật điều khiển hoặc có thể được thực hiện thủ công đối với các hệ thống đơn giản, chẳng hạn như đối với hệ thống 2-DOF Helicopter với số lượng nhỏ các biến trạng thái. Bằng cách lựa chọn các biến vĩ mô phù hợp, nhà thiết kế có thể thu được các đặc điểm thú vị cho hệ thống cuối cùng như: Độ ổn định toàn cục; Bền vững với sự không chắc chắn tham số mô hình; Giảm ảnh hưởng của nhiễu.

Những kết quả này thu được trong khi làm việc trên toàn bộ hệ thống phi tuyến tính và nhà thiết kế không cần phải đưa ra các đơn giản hóa trong quá trình lập mô hình để có được mô tả tuyến tính như yêu cầu đối với lý thuyết điều khiển cổ điển.

3.2 Tổng hợp luật điều khiển hợp thể cho 2-DOF Helicopter

Mục đích của bài toán điều khiển 2-DOF Helicopter là đảm bảo các kênh góc pitch và góc yaw của trực thăng bám theo các giá trị mong muốn θ_{sp} , α_{sp} bằng cách thay đổi điện áp V_p, V_y cấp cho động cơ nhằm tạo ra moment tác động lên các kênh của 2-DOF Helicopter.

Từ quy trình tổng hợp đã trình bày phần trên, các tín hiệu điều khiển V_p, V_y là các hàm phụ thộc vào các tọa độ pha. Các tín hiệu điều khiển sẽ tác động đến các trạng thái 2-DOF Helicopter bám theo tín hiệu đặt cho trước hoặc ổn định tại vị trí mong muốn khi có tác động nhiễu nhằm đảm bảo chất lượng yêu cầu của hệ thống.

Từ mục đích bài toán điều khiển 2-DOF Helicopter bám theo tín hiệu đặt cho trước, dựa trên lý thuyết điều khiển hợp thể, chúng tôi đưa ra bất biến công nghệ đầu tiên tương ứng với mục tiêu điều khiển:

$$x_1 = \theta_{sp} \tag{6}$$

$$x_3 = \alpha_{sp} \tag{7}$$

Trong bước đầu tiên, dựa trên mô hình toán học ta tổng hợp tín hiệu điều khiển cho từng kênh pitch và yaw của hệ thống theo các tín hiệu điều khiển V_θ, V_α , nên các đa tạp đầu tiên được lựa chọn có dạng:

$$\psi_\theta = x_2 - \varphi_{\theta 1}(x_1, \theta_{sp}) \tag{8}$$

$$\psi_\alpha = x_4 - \varphi_{\alpha 1}(x_3, \alpha_{sp}) \tag{9}$$

Trong đó, vector hàm số $\varphi_{\theta 1}$, $\varphi_{\alpha 1}$ xác định các đặc tính mong muốn của sự thay đổi vận tốc góc của các kênh pitch và yaw tại giao điểm với đa tạp bất biến $\psi_\theta=0$ và $\psi_\alpha=0$. Hàm số $\varphi_{\theta 1}$, $\varphi_{\alpha 1}$ được xác định trong quá trình tổng hợp luật điều khiển, tiến hành từ điều kiện bất biến công nghệ mong muốn (6) và (7). Để đảm bảo cho các đa tạp (8), (9) ổn định toàn cục, theo phương pháp thiết kế của lý thuyết điều khiển hợp thể đã nêu trên, biến macro $\psi_\theta=0$ và $\psi_\alpha=0$ là nghiệm của các phương trình hàm cơ bản sau:

$$T_\theta \dot{\psi}_\theta + \psi_\theta = 0 \tag{10}$$

$$T_\alpha \dot{\psi}_\alpha + \psi_\alpha = 0 \tag{11}$$

Trong đó T_θ, T_α là các hằng số xác định dương để đảm bảo điều kiện cho sự ổn định tiệm cận của chuyển động hệ thống. Thế phương trình (8) vào (10), (9) vào (11) kết hợp với hệ phương trình (2) ta có:

$$\begin{cases} V_\theta = \dfrac{M_{heli}\, g\, l_0 \cos(x_1) + B_p x_2 + M_{heli}\, g\, l_0^2 x_4{}^2 \sin(x_1)\cos(x_1)}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2} - f_\theta(\boldsymbol{x}) - \dfrac{1}{T_\theta}\left(x_2 - \varphi_{\theta 1}(x_1, \theta_{sp})\right) + \dfrac{\partial \varphi_{\theta 1}}{\partial x_1} x_2 + \dfrac{\partial \varphi_{\theta 1}}{\partial \theta_{sp}} \dot{\theta}_{sp} \\ V_\alpha = \dfrac{B_y x_4 - 2M_{heli} l_0^2 x_4 x_2 \sin(x_1)\cos(x_1)}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(x_1)^2} - f_\alpha(\boldsymbol{x}) - \dfrac{1}{T_\alpha}\left(x_4 - \varphi_{\alpha 1}(x_3, \alpha_{sp})\right) + \dfrac{\partial \varphi_{\alpha 1}}{\partial x_3} x_4 + \dfrac{\partial \varphi_{\alpha 1}}{\partial \alpha_{sp}} \dot{\alpha}_{sp} \end{cases} \tag{12}$$

Khi hệ thống đi vào đa tạp điểm biểu diễn của hệ chạm vào giao điểm của đa tạp $\psi_1=0$ và $\psi_2=0$ thì hệ thống sẽ xảy ra phân tách động lực học các hệ thống con trong (2) và động lực học các hệ thống con theo các kênh được mô bằng phương trình trên kênh Pitch (13) và phương trình trên kênh Yaw (14).

$$\dot{x}_1 = \varphi_{\theta 1}(x_1, \theta_{sp}) \tag{13}$$

$$\dot{x}_3 = \varphi_{\alpha 1}(x_3, \alpha_{sp}) \tag{14}$$

Trong đó các hàm $\varphi_{\theta 1}(x_1, \theta_{sp})$ $\varphi_{\alpha 1}(x_3, \alpha_{sp})$ trong hệ phân tách (13), (14) có thể được coi là tín hiệu điều khiển nội.

Ở bước thứ 2 của quá trình tổng hợp, để tìm kiếm điều khiển và để xác định hàm $\varphi_{\theta 1}(x_1, \theta_{sp})$, $\varphi_{\alpha 1}(x_3, \alpha_{sp})$ một đa tạp được đưa vào, đa tạp này cần đảm bảo tính ổn định của hệ thống vòng kín và sự đáp ứng của bất biến công nghệ (6) và (7). Để các phương trình (13), (14) đảm bảo ổn định toàn cục và thỏa mãn bất biến công nghệ sẽ lựa chọn tín hiệu điều khiển nội $\varphi_{\theta 1}(x_1) = -(x_1 - \theta_{sp})/T_{\theta 1}$, $\varphi_{\alpha 1}(x_3) = -(x_3 - \alpha_{sp})/T_{\alpha 1}$ để hệ phương trình phân tách có dạng sau:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_{\theta 1}}\left(x_1 - \theta_{sp}\right) \tag{15}$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{T_{\alpha 1}}\left(x_3 - \alpha_{sp}\right) \tag{16}$$

Để các phương trình (15), (16) điều kiện ổn định tiệm cận tại $x_1 = \theta_{sp}$, $x_3 = \alpha_{sp}$ là $T_{\theta 1}$, $T_{\alpha 1}$ là các hằng số dương.

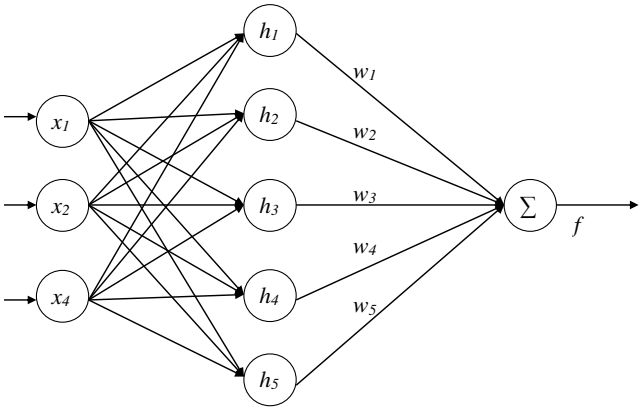
Từ các công thức (12) và đa tạp $\varphi_{11}(x_{11}, \theta_{sp})$ $\varphi_2(x_{12}, \alpha_{sp})$ đã lựa chọn ở trên tìm được luật điều khiển cho 2-DOF Helicopter có dạng sau:

$$\begin{cases} V_\theta = \dfrac{M_{heli}\, g\, l_0 \cos(x_1) + B_p x_2 + M_{heli}\, g\, l_0^2 x_4{}^2 \sin(x_1)\cos(x_1)}{J_{eq_p} + M_{heli} l_0^2} - f_\theta(\boldsymbol{x}) - \dfrac{1}{T_\theta}\left(x_2 + \dfrac{1}{T_{\theta 1}}\left(x_1 - \theta_{sp}\right)\right) + \dfrac{1}{T_{\theta 1}} x_2 - \dfrac{1}{T_{\theta 1}}\dot{\theta}_{sp} \\ V_\alpha = \dfrac{B_y x_4 - 2M_{heli}\, l_0^2 x_4 x_2 \sin(x_1)\cos(x_1)}{J_{eq_y} + M_{heli} l_0^2 \cos(x_1)^2} - f_\alpha(\boldsymbol{x}) - \dfrac{1}{T_\alpha}\left(x_4 + \dfrac{1}{T_{\alpha 1}}\left(x_3 - \alpha_{sp}\right)\right) + \dfrac{1}{T_{\alpha 1}} x_4 - \dfrac{1}{T_{\alpha 1}}\dot{\alpha}_{sp} \end{cases} \quad (17)$$

Từ công thức (3) ta tìm được luật điều khiển V_p và V_y.

3.3 Nhận dạng đối tượng dùng mạng nơ-ron

Để thiết kế bộ điều khiển hợp thể dùng mạng nơn-ron RBF cho hệ 2-DOF Helicopter, ta tiến hành nhận dạng các hàm $f_\theta(x), f_\alpha(x)$ của luật điều khiển (17) bằng các mạng nơ-ron RBF. Các mạng nơ-ron này gồm 2 lớp: một lớp ẩn phi tuyến với 5 nơ-ron và lớp ra tuyến tính với 1 nơ-ron, cấu trúc truyền thẳng được mô tả ở Hình 2 [23].



Hình 2. Cấu trúc mạng nơ-ron nhận dạng đối tượng

Gọi $\hat{f}_\theta(x)$ và $\hat{f}_\alpha(x)$ là kết quả nhận dạng được thì:

$$\begin{aligned} \hat{f}_\theta(x) &= \hat{\boldsymbol{w}}_{f_\theta} \boldsymbol{h}_{f_\theta}(\boldsymbol{x}) = \hat{\boldsymbol{w}}_{f_\theta} \exp\left(\frac{\left\|x - c_j\right\|^2}{2b_j^2}\right), \\ \hat{f}_\alpha(x) &= \hat{\boldsymbol{w}}_{f_\alpha} \boldsymbol{h}_{f_\alpha}(\boldsymbol{x}) = \hat{\boldsymbol{w}}_{f_\alpha} \exp\left(\frac{\left\|x - c_j\right\|^2}{2b_j^2}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

Với $\left(\hat{\boldsymbol{w}}_{f_\theta}, \boldsymbol{b}_j, \boldsymbol{c}_j\right)$ và $\left(\hat{\boldsymbol{w}}_{f_\alpha}, \boldsymbol{b}_j, \boldsymbol{c}_j\right)$ lần lượt là ma trận trọng số kết nối, vec-tơ độ lệch chuẩn và ma trận tâm của hàm Gauss của hai mạng nơ-ron nhận dạng, giải thuật điều khiển thích nghi được sử dụng để cập nhật ma trận trọng số, theo công thức (19):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\boldsymbol{w}}}_{f_\theta} &= \gamma_\theta \psi_\theta \boldsymbol{h}_{f_\theta}(\boldsymbol{x}), \\ \dot{\hat{\boldsymbol{w}}}_{f_\alpha} &= \gamma_\alpha \psi_\alpha \boldsymbol{h}_{f_\alpha}(\boldsymbol{x}) \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó : $\gamma_\theta, \gamma_\alpha$ là các hằng số dương.

4. Kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink và thảo luận

Các kết quả mô phỏng dựa trên phần mềm MATLAB đã được thực hiện để chứng minh hiệu quả của luật điều khiển đề xuất cho hệ 2-DOF Helicopter. Các tham số mô hình hệ thống sử dụng trong luật điều khiển được thể hiện trên Bảng 1. Các tham số luật điều khiển đề xuất T_θ, $T_{\theta 1}$, T_α và $T_{\alpha 1}$ được lựa chọn sao cho hệ thống ổn định tiệm cận. Trong nghiên cứu này sẽ lựa chọn một bộ tham số được lựa chọn như sau: $T_\theta = 0.01$; $T_{\theta 1} = 0.25$; $T_\alpha = 0.01$; $T_{\alpha 1} = 0.25$. Tham số của luật điều khiển thích nghi lần lượt là: $\gamma_\theta = 100$; $\gamma_\alpha = 100$. Mạng nơ-ron RBF gồm 5 nơ-ron các ma trận vec tơ độ lệch chuẩn và ma trận tâm được lựa chọn như sau:

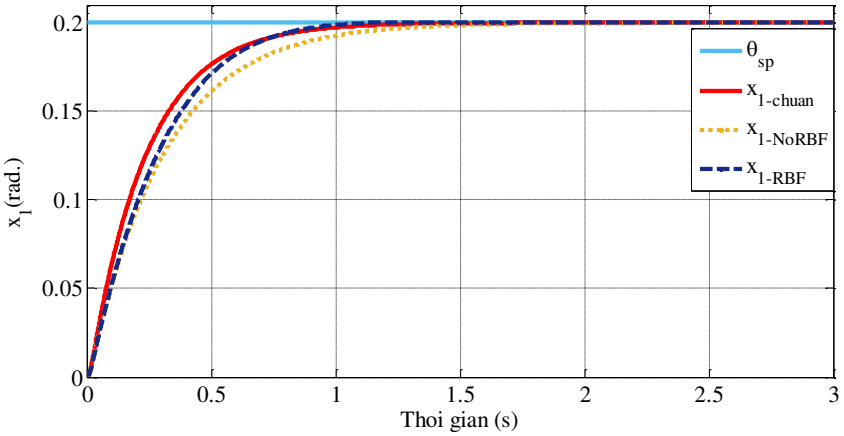
$$\boldsymbol{b} = [5 \quad 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5]^T; \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.25 & 0 & 0.25 & 0.5 \\ -0.5 & -0.25 & 0 & 0.25 & 0.5 \\ -0.5 & -0.25 & 0 & 0.25 & 0.5 \end{bmatrix}$$

Cách thức tiến hành mô phỏng thực hiện luật điều khiển đề xuất được tiến hành với kịch bản sau. Khi trạng thái ban đầu hệ thống ở gốc tọa độ $\boldsymbol{x}(0)=[0; 0; 0; 0]^T$ sẽ ổn định về các giá trị mong muốn $\boldsymbol{x_{sp}}(t)=[0.2; 0; 0.3; 0]^T$ với các tham số hệ số lực cản chuyển động tác dụng lên trục pitch và trục yaw thực tế $B_p = 0.6$ (N/V); $B_y = 0.8$ (N/V).

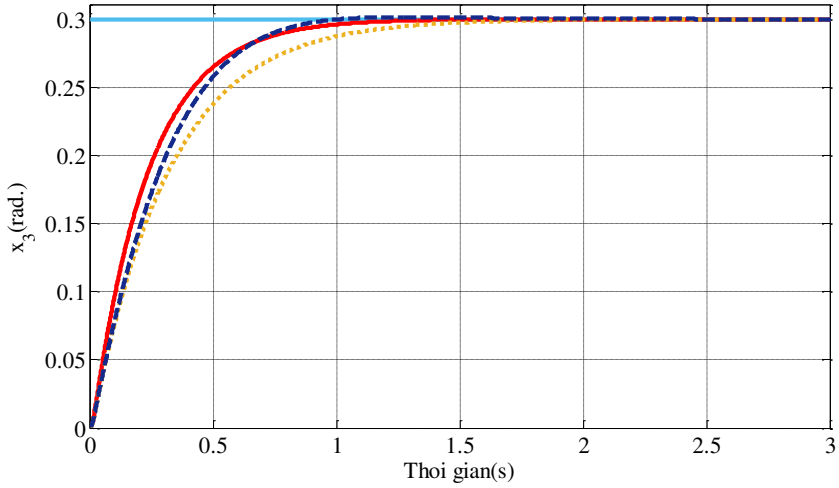
Bảng 1. Tham số hệ thống

Ký hiệu	Tham số	Giá trị	Đơn vị
J_{eq_p}	Mômen quán tính quanh trục pitch	0.0215	kg·m^2
J_{eq_y}	Mômen quán tính quanh trục yaw	0.0237	kg·m^2
M_{heli}	Trọng lượng của thân máy bay	1.0750	kg
B_p	Hệ số ma sát nhớt quanh trục pitch	0.0071	N/V
B_y	Hệ số ma sát nhớt quanh trục yaw	0.0220	N/V
l_0	Khoảng cách từ tâm khối lượng đến điểm cố định của khung thân	0.002	m
K_{pp}	Hệ số mômen lực đẩy động cơ trục pitch	0.022	N·m/V
K_{py}	Hệ số mômen lực đẩy chéo (pitch-yaw)	0.0221	N·m/V
K_{yp}	Hệ số mômen lực đẩy chéo (yaw-pitch)	-0.0227	N·m/V
K_{yy}	Hệ số mômen lực đẩy động cơ trục yaw	0.0022	N·m/V
g	Gia tốc trọng trường	9.8	m/s^2

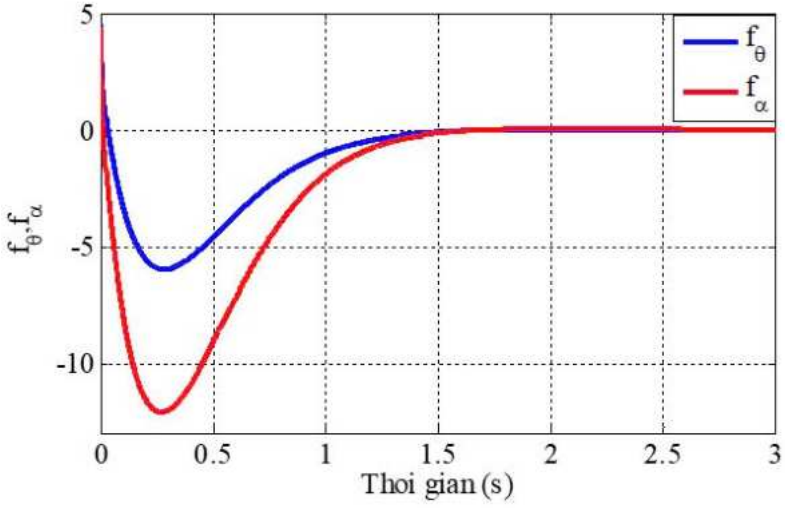
Các kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3, Hình 4 và Hình 5. Từ kết quả trên Hình 3 ta thấy rằng đáp ứng góc Pitch của hệ thống khi luật khi mô hình toán học chính xác ($x_{1\text{-}chuan}$) có đáp ứng với thời gian đạt là 0.7 (s), khi mô hình có tham số B_p , B_y khác với tham số của luật điều khiển thì thời gian đạt lần lượt là 0.92 (s) đối luật điều khiển không có thích nghi ($x_{1\text{-}NoRBF}$) và 0.71 (s) đối luật điều khiển sử dụng luật thích nghi ($x_{1\text{-}RBF}$). Kết quả đáp ứng của luật điều khiển thích nghi tuy có vọt lố nhưng đáp ứng tốt chất lượng điều khiển hệ thống. Trong kết quả đáp ứng trên kênh Yaw (Hình 5) thời gian đạt của luật điều khiển thích nghi là 0.69 (s) tốt hơn so với đáp ứng còn lại lần lượt là 0.7 (s) và 0.95 (s). Tuy nhiên độ vọt lố trong trường hợp này của luật điều khiển thích nghi cũng lớn hơn nhưng vẫn nằm trong giới hạn tiêu chuẩn đánh giá. Đáp ứng của mạng nơ-ron thích nghi cho 2 hàm $f_\theta(x), f_\alpha(x)$ được thể hiện trên Hình 5, cho thấy mạng RBF với tham số lựa chọn cho kết quả nhận dạng khá phù hợp với lực cản của môi trường với hệ thống này.



Hình 3. Đáp ứng góc pitch của hệ thống 2-DOF Helicopter



Hình 4. Đáp ứng góc yaw của hệ thống 2-DOF Helicopter



Hình 5. Hàm f_θ, f_α và giá trị ước lượng của chúng

5. Kết luận

Bài báo trình bày được phương pháp thiết kế luật điều khiển hợp thể thích nghi sử dụng mạng Nơ-ron cho hệ 2-DOF Helicopter khi hệ thống có thành phần không chắc chắn. Luật điều khiển thích nghi sử dụng mạng RBF đảm bảo cho hệ thống ước lượng được giá trị thành phần không chắc chắn của mô hình. Các kết quả mô phỏng chứng minh hiệu quả của luật điều

khiển đề xuất. Trong các nghiên cứu tiếp theo sẽ sử dụng mạng RBF để nghiên cứu sự không chắc chắn của tham số mô hình, tác động của nhiễu ngoại và chứng minh tính ổn định toàn cục của hệ thống khi sử dụng luật điều khiển thích nghi.

Tài liệu tham khảo

[1] Boubakir, A., Labiod, S., Boudjema, F., & Plestan, F. (2013). Design and experimentation of a self-tuning PID control applied to the 3DOF helicopter. *Archives of Control Sciences, 23*(3), 311–331. https://doi.org/10.2478/acsc-2013-0019

[2] Juang, J.-G., Huang, M.-T., & Liu, W.-K. (2008). PID control using presearched genetic algorithms for a MIMO system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, 38*(5), 716–727. https://doi.org/10.1109/TSMCC.2008.923890

[3] Pandey, S. K., & Laxmi, V. (2014). Optimal control of twin rotor MIMO system using LQR technique. In *International Conference on Computational Intelligence in Data Mining* (pp. 11–21). https://doi.org/10.1007/978-81-322-2205-7_2

[4] Kumar, E. V., Raaja, G. S., & Jerome, J. (2016). Adaptive PSO for optimal LQR tracking control of 2DOF laboratory helicopter. *Applied Soft Computing, 41,* 77–90. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.12.023

[5] Ramalakshmi, A. P. S., Manoharan, P. S., Harshath, K., & Varatharajan, M. (2016). Model predictive control of 2DOF helicopter. *International Journal of Innovation and Scientific Research, 24*(2), 337–346. https://doi.org/10.1109/ICEEE2019.2019.00068

[6] Nguyễn, X. C., Bùi, X. H., & Nguyễn, C. Đ. (2024). Tổng hợp bộ điều khiển trượt cho hệ thống trực thăng 2-DOF dựa trên phương pháp ADAR và đa tạp tuần tự. *Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 7 về Điều khiển và Tự động hoá*.

[7] Ilyas, M., Abbas, N., UbaidUllah, M., Imtiaz, W. A., Shah, M. A. Q., & Mahmood, K. (2016). Control law design for twin rotor MIMO system with nonlinear control strategy. *Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016,* Article ID 2952738, 10 pages. https://doi.org/10.1155/2016/2952738

[8] Derakhshannia, M., Fazeli Asl, S. B., & Moosapour, S. S. (2021). Backstepping terminal sliding mode control design for a TRMS. In *2021 7th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA).* https://doi.org/10.1109/ICCIA52082.2021.9403545

[9] Nguyễn, X. C., & Lê, T. T. (2024). Synthesis of an orbit tracking controller for a 2DOF helicopter based on sequential manifolds with stabilization time in the presence of disturbances. *Engineering, Technology & Applied Science Research, 14*(4), 15083–15089.

[10] Wu, B., Wu, J., Zhang, J., Tang, G., & Zhao, Z. (2022). Adaptive neural control of a 2DOF helicopter with input saturation and time-varying output constraint. *Actuators, 11,* 336. https://doi.org/10.3390/act11110336

[11] Frasik, S. I. L., & Gabrielsen, L. (2018). Practical application of advanced control: An evaluation of control methods on a Quanser Aero (Master's thesis). *University of Agder.* https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/handle/11250/2563895

[12] Patel, R., Deb, D., Modi, H., & Shah, S. (2017). Adaptive backstepping control scheme with integral action for Quanser 2-DOF helicopter. In *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI).* https://doi.org/10.1109/ICACCI.2017.8125901

[13] Schlanbusch, S. M., & Zhou, J. (2020). Adaptive backstepping control of a 2-DOF helicopter system with uniform quantized inputs. In *IECON 2020 - The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254497

[14] Mondal, S., & Mahanta, C. (2012). Adaptive second-order sliding mode controller for a twin rotor multi-input–multi-output system. *IET Control Theory & Applications, 6*(14), 2157–2167. https://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0478

[15] Wu, B., Wu, J., Zhang, J., Tang, G., & Zhao, Z. (2022). Adaptive neural control of a 2DOF helicopter with input saturation and time-varying output constraint. *Actuators, 11,* 336. https://doi.org/10.3390/act11110336

[16] Nguyễn, X. C., Bùi, X. H., & Trần, C. P. (2024). Synthesis of adaptive sliding mode control for twin rotor MIMO system with mass uncertainty based on synergetic control theory. *International Journal of Robotics and Control Systems, 4*(1), 174–187.

[17] Kolesnikov, A. A., & Kuz'menko, A. A. (2019). Sliding mode control laws design by the ADAR method with subsequent invariant manifolds aggregation. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 20*(8), 451–460. https://doi.org/10.17587/mau.20.451-460

[18] Kolesnikov, A. A. (1994). *Synergetics control theory*. Moscow: Energoatomizdat.

[19] Nguyễn, C. X., Lukianov, A. D., Phạm, T. D., & Nguyễn, A. D. (2020). Synthesis of a nonlinear control law with efficiency energy for the self-balancing two-wheeled vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 900,* 012002. https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012002

[20] Nguyễn, C. X., Trần, S. V., & Phan, H. N. (2023). Control law synthesis for flexible joint manipulator based on synergetic control theory. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 24*(8), 395–402. https://doi.org/10.17587/mau.24.395-402

[21] Nguyễn, X. C., & Lê, T. T. (2022). Design of nonlinear controller based on ADAR method for wedge balancing. In *The 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2022), BEXCO, Busan, Korea, Nov. 27~Dec. 01, 2022*. https://doi.org/10.23919/ICCAS55662.2022.10003732

[22] Lê, T. T., Trần, V. S., Trương, Đ. K., & Nguyễn, X. C. (2023). Synthesis of sliding mode control for flexible-joint manipulators based on serial invariant manifolds. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 12*(1), 98–108. https://doi.org/10.11591/eei.v12i1.4363

[23] Liu, J. (2013). *Radial basis function (RBF) neural network control for mechanical systems*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Synthesis of adaptive synergetic controller for 2-DOF Helicopter system based on RBF neural network

Abstract: *This paper introduces the problem of synthesizing adaptive synergetic control law for two degree of freedom (2-DOF) Helicopter system based on the radial basis function (RBF) neural network when the system has uncertain components. First, the synergetic control law for a 2-DOF Helicopter system are based on a dynamic model with uncertain components. Next, the RBF neural network is used to estimate the uncertain components in the system. The control law results are simulated on the MATLAB software to demonstrate the effectiveness of the proposed control law.*

Keywords: Adaptive synergetic control law; RBF neural network; 2-DOF Helicopter system.

Nghiên cứu thuật toán phát hiện Phân biệt hệ số không đổi (Constant Fraction Discrimination - CFD) trong xác định cự ly đối tượng sử dụng kỹ thuật laser

Dương Văn Hiếu[1] , Trương Đăng Khoa[2], Bùi Quang Lý[3]

[1] *Lớp TĐHNC 35 - Hệ 2 - Học viện kỹ thuật Quân sự;*

[2] *Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện kỹ thuật Quân sự;*

[3] *Phòng Quân – Binh chủng, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng;*

Gmail: duonghieu.dvh@gmail.com; ĐT: 0337.866.266

Tóm tắt

Công nghệ laser đã có những tiến bộ vượt bậc trong những thập kỷ gần đây. Công nghệ này được sử dụng cho nhiều ứng dụng khác nhau bao gồm y tế, quân sự, công nghiệp, điện tử, kỹ thuật sản xuất bán dẫn…

Trong lĩnh vực quân sự, hiện nay việc trinh sát và bắt bám các đối tượng cần quan sát theo dõi đã chuyển sang tín hiệu có phổ nhìn thấy và hồng ngoại (IR) bằng công nghệ laser. Hiện nay, các cảm biến laser đã có những ứng dụng triển khai trên các thiết bị quân sự (tổ hợp trinh sát, máy bay không người lái (UAV), tên lử, máy bay chiến đấu…) để phát hiện, đo khoảng cách, nhận dạng và theo dõi nhiều loại mục tiêu khác nhau.

Bài báo này thực hiện nghiên cứu về thuật toán Phân biệt hệ số không đổi (Constant Fraction Discrimination - CFD) trong việc xác định chính xác thời điểm nhận được tín hiệu laser phản xạ tại thiết bị thu laser theo sườn trước của xung, quyết định đến độ chính xác xác định khoảng cách tên lửa – mục tiêu.

Từ khóa: *laser; CFD; xác định khoảng cách; sườn trước xung phản xạ.*

1. Giới thiệu về laser và đo khoảng cách dùng laser

1.1. Laser

Laser là viết tắt của *Light amplification by stimulating emission of radiation*. giải thích rằng khi sử dụng công nghệ này có thể tạo ra một chùm ánh sáng quang học có năng lượng và tính định hướng cao, có tính đồng nhất cao cả về không gian và thời gian. Mức độ đồng nhất phụ thuộc rất nhiều vào nguồn năng lượng phát tia laser. Tia laser thể khí và thể rắn cung cấp tính đồng nhất cao hơn tia laser bán dẫn. Tuy nhiên, trong quá trình quét laser hiện tại, hiệu ứng vật lý của tính đồng nhất quá quan trọng, quan trọng nhất là độ chuẩn trực cao và công suất quang học cao của tia laser. Một nguồn sáng hẹp tạo ra bằng đèn xenon hoặc đèn flash, vốn không phải là nguồn laser cũng có thể có một số tính chất như tia laser [1].

So với các kỹ thuật phát hiện và theo dõi theo nguyên lý radar sử dụng các bước sóng dải mm - dm, tín hiệu laser có ưu điểm hơn rất nhiều trong các phép đo khoảng cách trong giới hạn gần vì một mặt, các xung năng lượng cao có thể được thực hiện trong các khoảng thời gian ngắn, mặt khác, với bước sóng tương đối ngắn, tín hiệu laser có tính định hướng rất cao qua các khe hở có khẩu độ nhỏ.

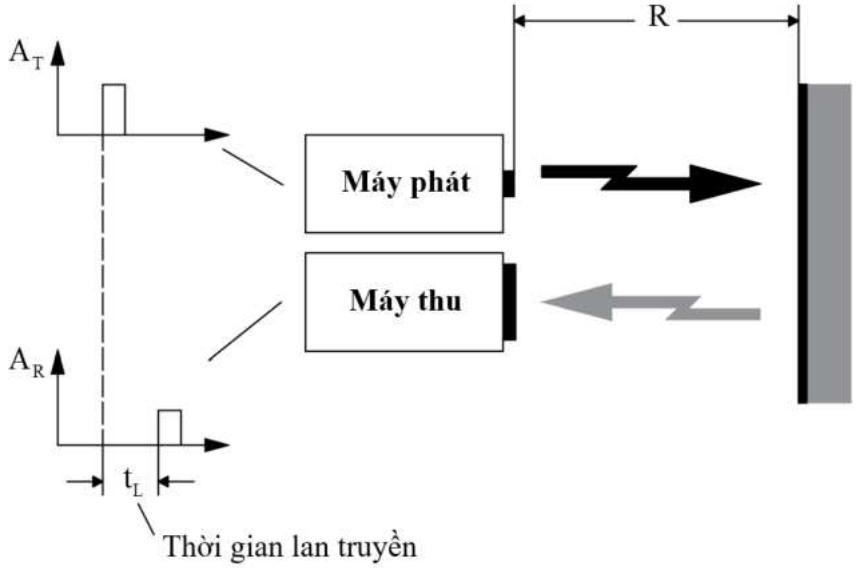
Ngay khi laser có tốc độ lặp lại xung cao được phát triển, các các hệ thống laser quét có thể được thực hiện với khả năng thu được hình ảnh đo xa; các hệ thống như vậy cũng được gọi là radar laser. Đối với radar laser, hai từ viết tắt thường được sử dụng là LADAR (*Laser Detection And Ranging*) và LIDAR (*Light Detection And Ranging*) và gần như không có sự phân biệt rõ ràng giữa hai thuật ngữ này.

Trong các phép đo khoảng cách bằng tia laser, hai nguyên tắc đo chính được áp dụng: nguyên tắc đo khoảng cách thông qua thời gian giữ chậm xung và và đo khoảng cách thông qua đo độ lệch pha giữa tín hiệu phát và tín hiệu thu phản xạ từ bề mặt vật thể cần xác định khoảng cách. Phương pháp đo khoảng cách thông qua độ lệch pha được áp dụng với tia laser được phát liên tục (laser sóng liên tục - CW).

Trong các hệ thống laser hiện tại, chủ yếu sử dụng laser xung. Laser xung thường là laser trạng thái rắn, tạo ra công suất đầu ra cao. Chúng có thể được đẩy ra bằng ánh sáng từ ống đèn flash, xenon, đèn hồ quang, đèn hơi kim loại và điốt laser được ứng dụng đặc biệt để tạo ra tia laser trên các phương tiện trên không. Phổ biến là laser Nd:YAG, với độ rộng xung 10–15 ns, bước sóng 1,06 μm và công suất xung cực đại lên đến vài MW.

1.2. Nguyên tắc đo khoảng cách dùng tia laser dạng xung

Trên Hình 1 thể hiện nguyên tắc đo khoảng cách sử dụng tia laser. Phép đo khoảng cách trực tiếp nhất là xác định thời gian truyền của tia laser dạng xung, tức là bằng cách đo thời gian truyền giữa xung phát ra và xung nhận được [5].



Hình 1. Nguyên tắc đo khoảng cách dùng tín hiệu laser

Theo Hình 1, thời gian lan truyền của một xung laser:

$$t_L = \frac{2R}{c} \qquad (1)$$

trong đó R là khoảng cách giữa vị trí đặt nguồn phát và bề mặt vật thể, c là tốc độ ánh sáng.

Từ công thức (1) có thể nhận được một số tham số đặc trưng của hệ thống đo khoảng cách sử dụng laser dạng xung [1]:

- Khoảng cách đo được:

$$R = \frac{c}{2} t_L \qquad (2)$$

- Độ phân giải khoảng cách:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \Delta t_L \qquad (3)$$

trong đó Δt_L là độ phân giải thời gian, giới hạn bởi độ chính xác của xung clock trong phần xử lý tín hiệu khoảng cách xung laser phát – xung laser phản xạ.

- Khoảng cách đo được lớn nhất:

$$R_{\max} = \frac{c}{2} t_{L\max} \qquad (4)$$

- Độ chính xác đo khoảng cách:

$$\sigma_R \sqsupset \frac{c}{2} t_{rise} \frac{1}{\sqrt{S/N}} \qquad (5)$$

trong đó S/N - tỷ số tín/tạp tín hiệu; t_{rise} - sườn lên của xung, là khoảng thời gian tín hiệu tăng từ 10% đến 90% giá trị đỉnh tín hiệu.

Tuy nhiên, độ chính xác của LADAR phụ thuộc lớn vào khả năng xử lý tín hiệu xung laser. Tín hiệu này có thể bị nhiễu hoặc biến dạng do các yếu tố ngoại cảnh, gây khó khăn trong việc xác định thời điểm đến chính xác. Thuật toán Phân biệt hệ số không đổi (CFD) đã được phát triển như một giải pháp hiệu quả để khắc phục những thách thức này.

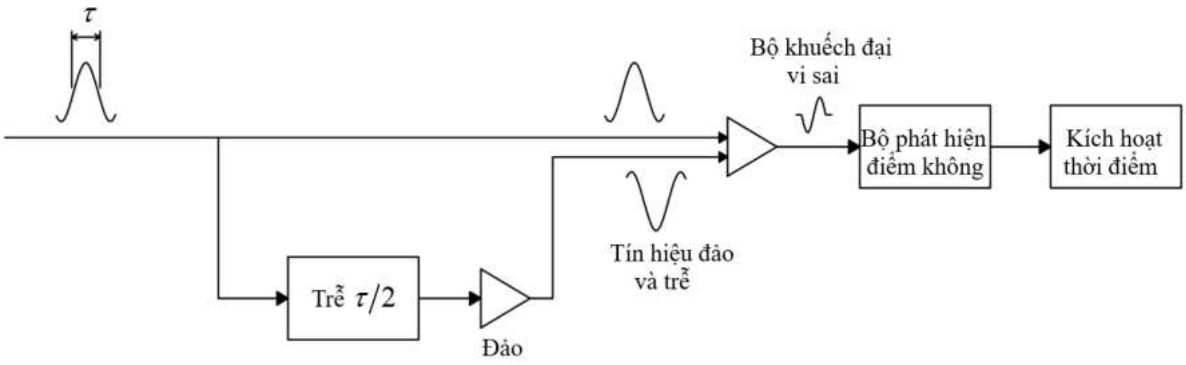
2. Thiết kế CFD xác định thời điểm xuất hiện xung theo sườn lên xung phản xạ

2.1. Nguyên lý hoạt động CFD

CFD (Constant Fraction Discrimination) là thuật toán đơn giản, hiệu quả cho phép phát hiện xung chịu tác động của nhiễu với độ chính xác cao. Định nghĩa CFD được hiểu như sau [1]:

"CFD được thực hiện bằng cách chia tín hiệu đến thành hai kênh, làm trễ một kênh một nửa độ rộng xung và trừ kênh bị trễ khỏi kênh gốc. Điều này tạo ra tín hiệu âm và sau đó là tín hiệu dương với đặc trưng phân biệt hình chữ S. Điểm giao nhau bằng không của hai tín hiệu này rất không nhạy cảm với các biến động biên độ; tuy nhiên, nhạy cảm với các biến động độ rộng sườn xung".

Mô tả nguyên lý hoạt động của CFD được thể hiện như trên Hình 2.



Hình 2. Nguyên lý hoạt động của CFD

Điểm cắt không của đặc trưng phân biệt có dạng hình chữ S trong Hình 2 được sử dụng để kích hoạt các bộ định thời, được sử dụng cho xung được gửi để bắt đầu tính thời gian và được áp dụng cho xung phản xạ nhận được để dừng bộ định thời. Khoảng thời gian được tính bởi bộ định thời được sử dụng trực tiếp trong tính toán khoảng cách theo nguyên lý truyền sóng radar.

Dựa trên Hình 2, thực hiện mô phỏng với dạng xung phản xạ cơ bản nhất đối với radar laser đo khoảng cách – xung có dạng phân bố Gauss [6,7] như sau:

$$V(t;a,b,c) = a * \exp\left\{-\left(\frac{t-b}{c}\right)^2\right\}$$

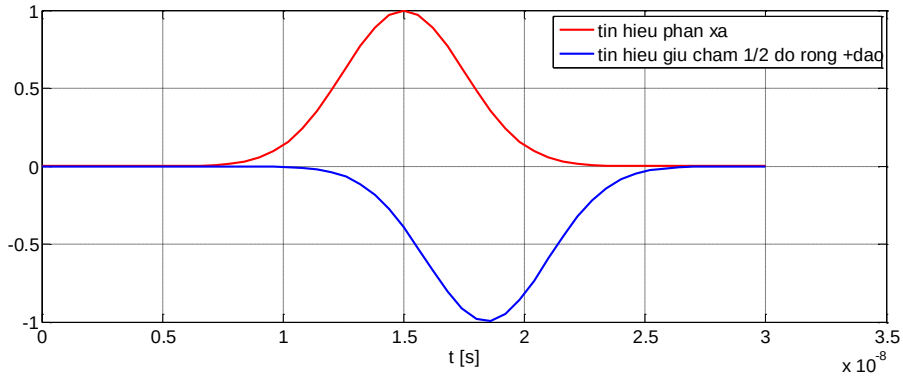
với biên độ chuẩn hoá bằng $a = 1$; $b = 15ns$ là thời điểm xuất hiện đỉnh xung tính từ gốc thời gian mô phỏng và $c = 8,2ns$ là độ rộng xung.

Trên Hình 3 biểu diễn kết quả mô phỏng hai đường tín hiệu:

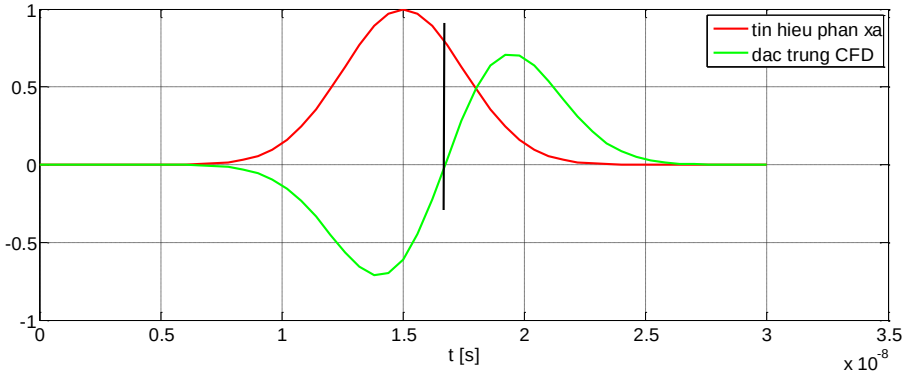
- Xung phản xạ không bị giữ chậm;
- Xung phản xạ bị giữ chậm 1/2 độ rộng và đảo.

Trên Hình 4 biểu diễn kết quả mô phỏng hai đường tín hiệu:

- Xung phản xạ không bị giữ chậm;
- Đặc trưng CFD xác định theo Hình 2.



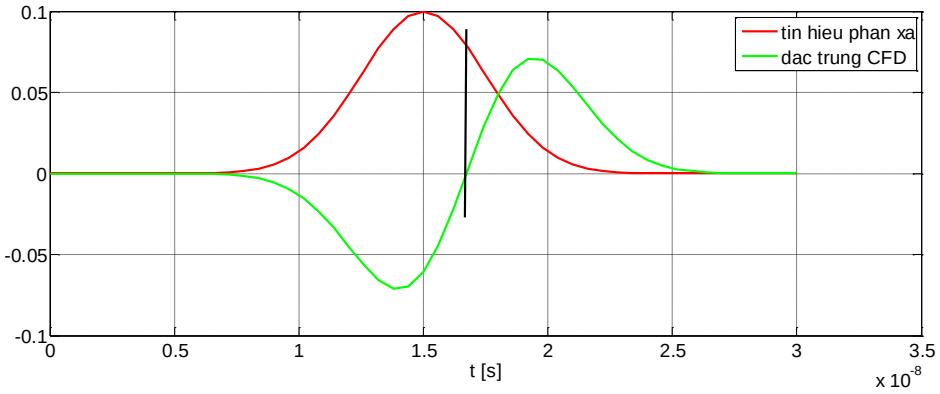
Hình 3. Xung phản xạ và xung giữ chậm 1/2 độ rộng xung + đảo



Hình 4. Xung phản xạ và đặc trưng phân biệt CFD

Từ Hình 4 thấy rằng, tại giá trị không của CFD, tương ứng thời gian $16,72ns$ tính từ tính từ gốc thời gian mô phỏng, giá trị biên độ xung bằng 78,3% giá trị đỉnh xung và xuất hiện tại sườn sau.

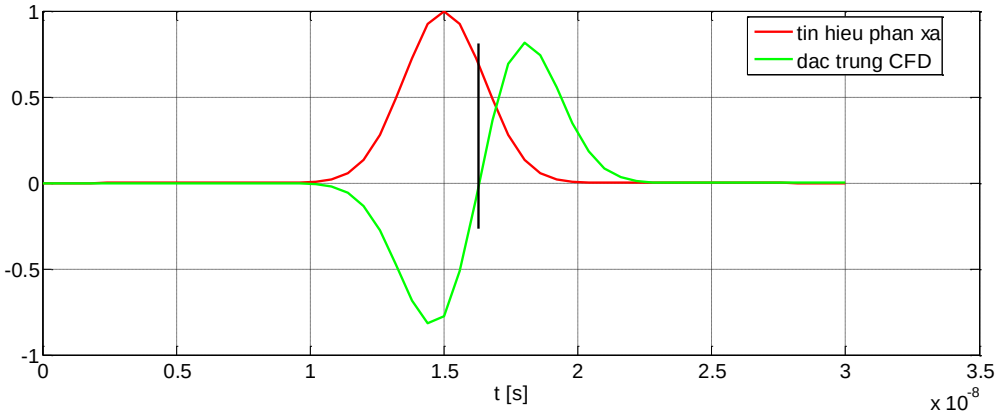
Thực hiện mô phỏng trong trường hợp biên độ xung phản xạ bị suy giảm đi 10 lần, độ rộng xung không thay đổi, kết quả thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Xung phản xạ và đặc trưng phân biệt CFD khi xung phản xạ suy giảm đi 10 lần

Theo Hình 5, tại giá trị không của CFD, tương ứng thời gian $16,72ns$ tính từ tính từ gốc thời gian mô phỏng, giá trị biên độ xung bằng 78,2% giá trị đỉnh xung và xuất hiện tại sườn sau.

Thực hiện mô phỏng trong trường hợp biên độ xung phản xạ không thay đổi, độ rộng xung giảm xuống $5,2ns$, kết quả thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Xung phản xạ và đặc trưng phân biệt CFD khi thay đổi độ rộng xung

Theo Hình 6, tại giá trị không của CFD, tương ứng thời gian $16,32ns$ tính từ gốc thời gian mô phỏng, giá trị biên độ xung bằng 68,1% giá trị đỉnh xung và xuất hiện tại sườn sau.

Từ kết quả mô phỏng như trên, có một số nhận xét như sau:

- Với dạng xung có dạng phân bố Gauss, đặc trưng CFD với độ giữ chậm 1/2 độ rộng xung luôn có dạng hình chữ S cân;

- Điểm không của CFD luôn luôn nằm ở phía sau (sườn sau) của tín hiệu;

- Điểm không của CFD không bị ảnh hưởng của biên độ tín hiệu, tuy nhiên chịu ảnh hưởng lớn của độ rộng tín hiệu.

2.2. CFD trong xác định thời điểm xuất hiện xung theo sườn lên xung phản xạ

Theo (5), độ chính xác xác định khảng cách phụ thuộc vào hai tham số chính:

- Độ rộng sườn lên của xung t_{rise} ;

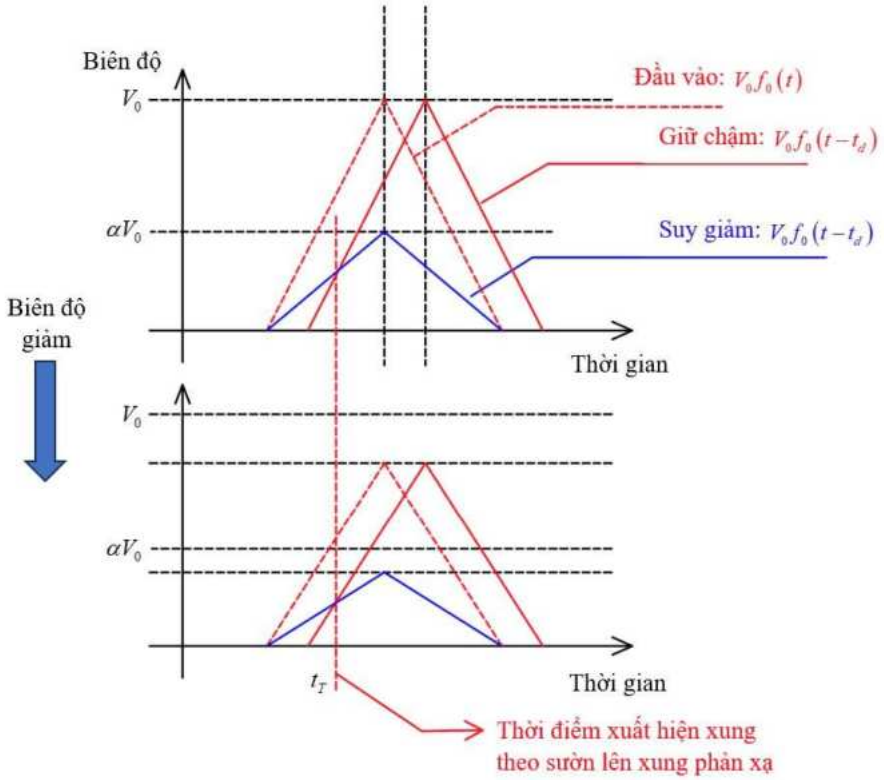
- Tỷ số tín/tạp S/N .

Độ rộng sườn trước của xung có thể bị thay đổi đối với xung phát đi và xung phản xạ, tuy nhiên, đối với xung phát, do được kiểm soát chặt chẽ trong quá trình hình thành xung và điều chế, sườn lên của xung rất ổn định; ngược lại, đối với xung phản xạ, sẽ chịu tác động rất

nhiều của các yếu tố (sự không đồng nhất môi trường truyền, không đồng nhất bề mặt phản xạ, sự tán xạ bề mặt và tại khe hở….) gây nên sự biến dạng dạng xung. Để khắc phục hạn chế này, trong kỹ thuật rada laser thường sử dụng thuật toán CFD phát hiện thời điểm xuất hiện xung theo sườn lên xung phản xạ. Ý tưởng chính của thuật toán CFD phát hiện thời điểm xuất hiện theo sườn lên là định vị thời điểm tại điểm giao nhau của 2 tín hiệu: tín hiệu đầu vào đã bị suy giảm và tín hiệu đầu vào bị giữ chậm.

Nguyên tắc xác định thời điểm trong CFD có thể được giải thích trên Hình 7 [2].

Trên Hình 7, $V(t)$ - tín hiệu vào; α - hệ số suy giảm; t_d - thời gian giữ chậm.



Hình 7. Giải thích thời điểm xuất hiện xung theo sườn lên xung phản xạ của CFD

Tín hiệu đầu vào CFD có thể được biểu diễn:

$$V(t) = V_0 f_0(t) \qquad (6)$$

trong đó V_0 - giá trị đỉnh tín hiệu đầu vào; $f_0(t)$ - hàm chuẩn hoá tín hiệu đầu vào theo thời gian.

Giá trị tín hiệu tại thời điểm định thời t_T theo sườn lên được xác định:

$$V(t_T) = \rho V_0 \qquad (7)$$

trong đó $0 < \rho < 1$ là hằng số, được gọi là tỷ số kích hoạt.

Từ (6) và (7), nhận được thời điểm t_T khi thoả mãn quan hệ:

$$V_0 f_0(t)(t = t_T) = \rho V_0 \qquad (8)$$

Từ (8) thấy rằng, khi dạng của tín hiệu đầu vào $f_0(t)$ là không đổi, thời điểm t_T sẽ không phụ thuộc vào giá trị đỉnh tín hiệu V_0 và có hệ số không đổi đối với tín hiệu đầu vào.

Nếu tín hiệu đầu vào là $V(t)$, tín hiệu giữ chậm là $V(t-t_d)$, tín hiệu bị suy giảm là $\alpha V(t)$ thì tại thời điểm t_T, hai tín hiệu này sẽ giao nhau:

$$V_0 f_0(t-t_d) = \alpha V_0 f_0(t_T) \qquad (9)$$

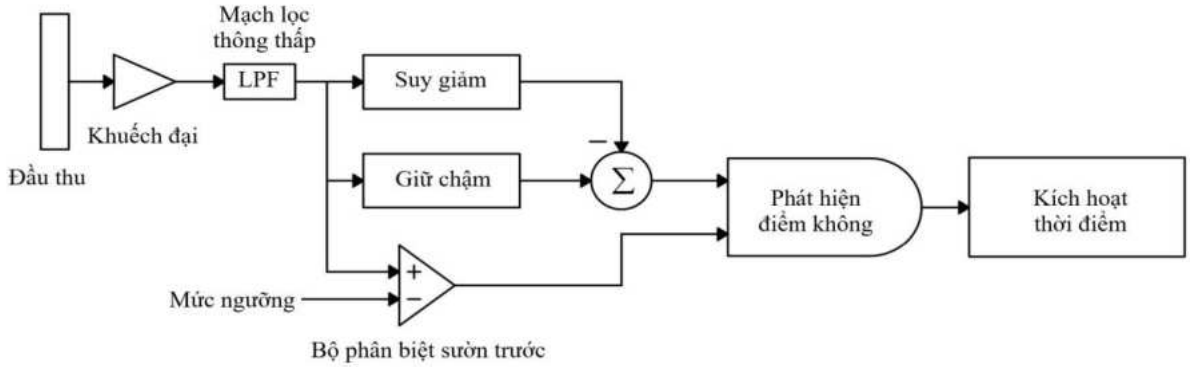
Từ (9) thấy rằng, thời điểm t_T được quyết định bởi hệ số suy giảm α, thời gian giữ chậm t_d và không phụ thuộc vào biên độ tín hiệu đầu vào.

Tỷ số kích hoạt được xác định:

$$\rho = \frac{V(t_T)}{V_0} = \frac{V_0 f_0(t_T)}{V_0} = \frac{f_0(t_T - t_d)}{\alpha} \qquad (10)$$

Như vậy, tỷ số kích hoạt chỉ phụ thuộc vào hệ số suy giảm α, thời gian giữ chậm t_d.

Để có thể xác định được thời điểm t_T xuất hiện tại sườn lên của xung, trong kỹ thuật phải tạo ra được đặc trưng phân biệt có dạng hình chữ S không cân và bộ phát hiện điểm không, tương ứng giá trị bằng nhau của tín hiệu giữ chậm và tín hiệu suy giảm – đảo. Sơ đồ CFD phát hiện thời điểm xuất hiện xung theo sườn lên xung phản xạ có dạng như Hình 8 [8].

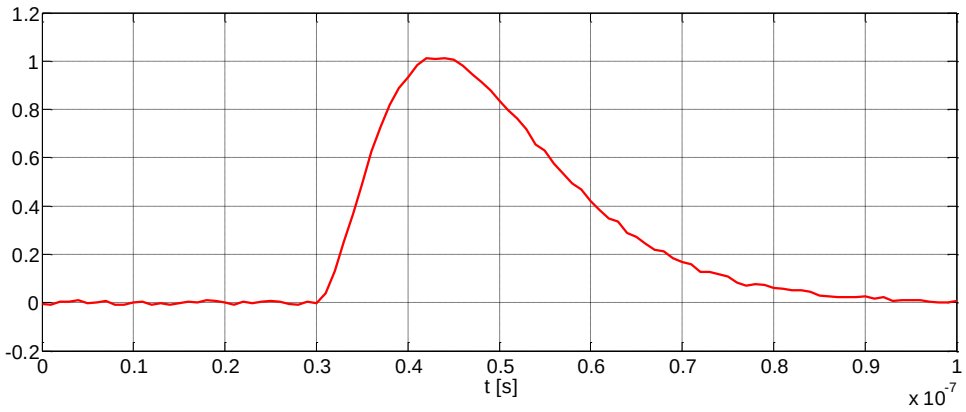


Hình 8. Sơ đồ CFD xác định thời điểm xuất hiện xung theo sườn lên xung phản xạ

Trong Hình 8, mức ngưỡng được đưa vào nhằm cung cấp khả năng cân bằng năng lượng và chống lại việc kích hoạt thời điểm xuất hiện mức logic do tác động của tạp âm của bộ phát hiện [10].

3. Mô phỏng CFD xác định thời điểm xuất hiện xung theo sườn lên xung phản xạ

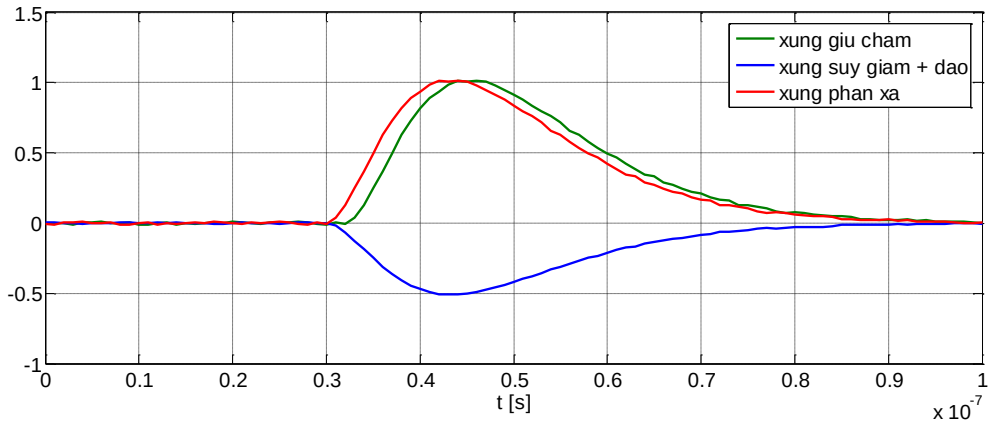
Tín hiệu phản xạ nhận được có dạng "đuôi kéo dài" và có biên độ được chuẩn hoá (Hình 9), độ rộng sườn trước $9{,}2ns$ [9], chịu tác động của nhiễu. Thời điểm xuất hiện xung được cho là $3ns$ tính từ gốc đồ thị để dễ quan sát.



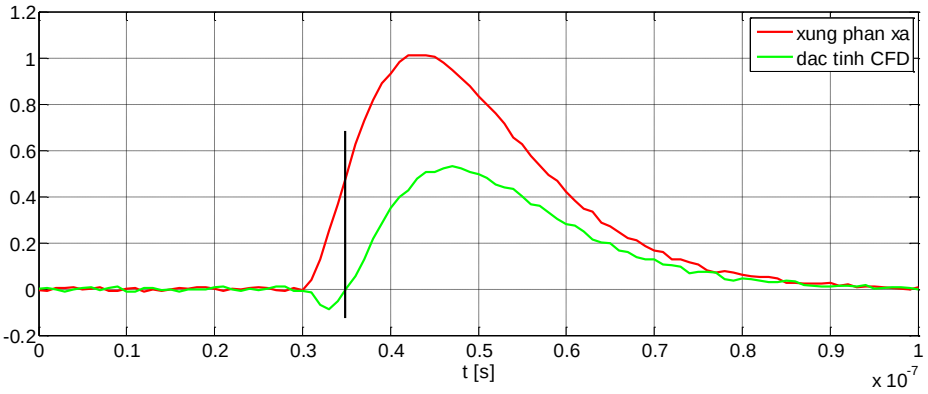
Hình 9. Xung laser phản xạ

Hệ số suy giảm được chọn $\alpha = 0,5$, thời gian giữ chậm $t_d = 2,0ns$. Hình dạng hai xung: xung giữ chậm, xung suy giảm + đảo và thời điểm cắt nhau thể hiện trên Hình 10.

Với các tham số như trên, thời điểm xuất hiện xung tại sườn lên xung phản xạ ở mức 50% biên độ tín hiệu phản xạ $t_F = 34,9ns$ (Hình 11).

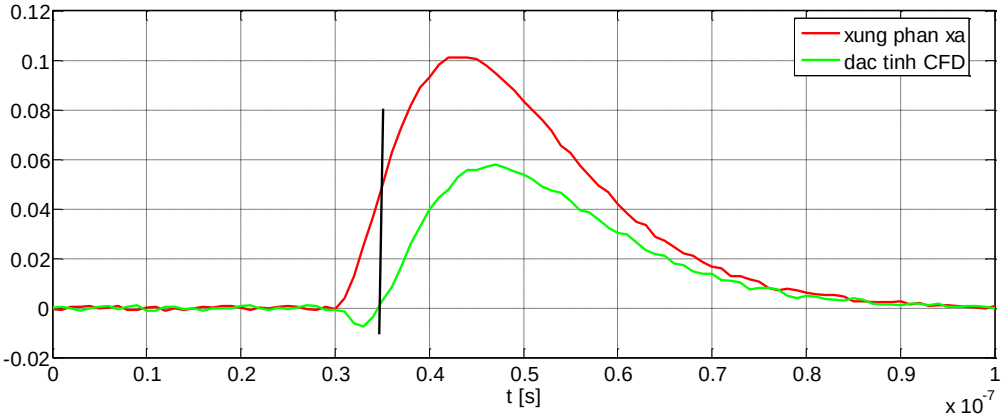


Hình 10. Xung phản xạ - giữ chậm và xung phản xạ - suy giảm



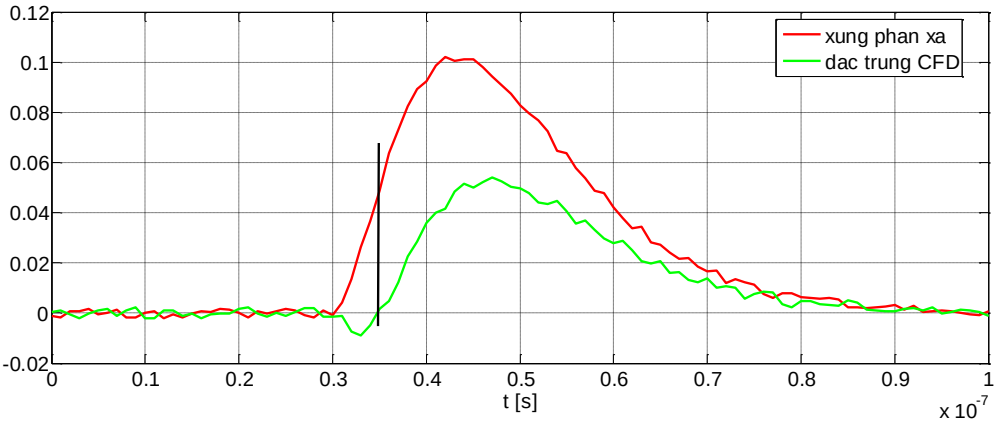
Hình 11. Xung phản xạ, đặc tính CFD và thời điểm phát hiện

Kết quả này cũng đạt được khi biên độ xung phản xạ bị suy giảm đi 10 lần (Hình 12).



Hình 12. Xung phản xạ, đặc tính CFD và thời điểm phát hiện khi xung phản xạ suy giảm 10 lần

Nếu thực hiện mô phỏng trong trường hợp biên độ của nhiễu tác động tăng gấp đôi, biên độ tín hiệu phản xạ suy giảm đi 10 lần thì kết quả nhận được như Hình 13.



Hình 13. Thời điểm phát hiện khi tăng biên độ tác động nhiễu và biên độ tín hiệu giảm đi 10 lần

Từ kết quả trên Hình 13 và số liệu mô phỏng có nhận xét sau:

- Tại giá trị 50% biên độ xung phản xạ thì tương ứng thời gian $t = 35,1ns$

- Tại giá trị không của đặc trưng CFD, tương ứng giá trị 48,6% biên độ xung phản xạ.

Như vậy, nếu giữ nguyên giá trị hệ số suy giảm $\alpha = 0,5$ và thời gian giữ chậm $t_d = 2ns$ thì sai lệch thời điểm phát hiện giá trị 50% biên độ xung phản xạ tại sườn lên của xung là $0,2ns$ tương ứng sai lệch đo khoảng cách đối tượng là $0,03m$. Kết quả này là có thể chấp nhận được trong các yêu cầu đo khoảng cách trong khoảng hàng chục mét.

4. Kết luận

Bài báo này đã thực hiện phân tích và mô phỏng việc thực hiện thuật toán CFD để xác định thời điểm xuất hiện mức logic tại sườn lên xung phản xạ ứng dụng trong các ứng dụng đo khoảng cách dùng sóng laser. Kết quả mô phỏng đã khẳng định được kết quả nghiên cứu lý thuyết, tuy nhiên, việc áp dụng thuật toán trên thực tế còn một số vấn đề phải quan tâm giải quyết:

- Thực hiện việc tăng tỷ số tín/tạp thông qua sử dụng các thuật toán lọc (lọc tương thích, lọc thích nghi…);

- Tìm hiểu thêm về các dạng sai lệch vị trí sườn trước xung phản xạ để hiệu chuẩn CFD cho phù hợp [9];

- Mô phỏng Monte-Carlo nhằm xác định phân bố thống kê của tín hiệu phản xạ trong điều kiện có nhiễu loạn để xác định độ trễ phù hợp [4].

Tài liệu tham khảo

[1]. Accetta and Shumaker (1993). *The infrared and electro-optical systems handbook*. Vol. 6 Active electro-optical systems, ISBN 0-8194-1072-1.

[2]. Arora VK (2010). *Proximity fuzes: Theory and Techniques*. Defence Research & Development Organisation, New Delhi.

[3]. Blanquer Eric (2007). *LADAR Proximity Fuze - System Study.* Master's Degree Project. Stockholm, Sweden.

[4]. Lai Jiancheng, Wang Chunyong1, Yan Wei1, Li Zhenhua (2017). *Research on the ranging statistical distribution of laser radar with a constant fraction discriminator*. IET Optoelectronics.

[5]. A. V. Jelalian (1992). *Laser Radar Systems*. Boston.

[6]. Ma Yue, Wang Mingwei, Li Guoyuan, Lu Xiushan and Yang Fanlin (2016). *Waveform model of a laser altimeter for an elliptical Gaussian beam*. Journal Optical Society of America.

[7]. Xiaolu Li, Bingwei Yang, Xinhao Xie, Duan Li and Lijun Xu (2018). *Influence of Waveform Characteristics on LiDAR Ranging Accuracy and Precision*. Sensors; doi:10.3390/s18041156.

[8]. Hui Zhou, Yuwei Chen, Juha Hyyppa, Song Li (2017). *An overview of the laser ranging method of space laser altimeter*. Infrared Physics & Technology. Elsevier.

[9]. Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Yan Wei, Wang Chunyong, Li Zhenhua (2013). *Theoretical distribution of range data obtained by laser radar and its applications*. Optics & Laser Technology. Elsevier.

[10]. T.J. Paulus (1985). *Timing electronics and fast timing methods with scintillation detectors*. IEEE Trans. Nucl. Sci. 32 (3) 1242–1249.

Research on the Constant Fraction Discrimination (CFD) detection algorithm in determining object distance using laser technique

Abstract:

Laser technology has made significant advancements in recent decades. This technology is used in various applications, including healthcare, military, industry, electronics, and semiconductor manufacturing engineering.

In the military field, reconnaissance and tracking of targets have now transitioned to visible and infrared (IR) spectrum signals using laser technology. Currently, laser sensors have been deployed in various military equipment (reconnaissance systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), missiles, fighter jets, etc.) for detecting, ranging, identifying, and tracking a wide range of targets.

This paper investigates the Constant Fraction Discrimination (CFD) algorithm for accurately determining the time of receiving the reflected laser signal at the laser receiver based on the leading edge of the pulse, which is crucial for the precise measurement of the missile-target distance.

Keywords: Laser; CFD; distance determination; the leading edge of reflected pulse.

Ứng dụng mô hình AlexNet-SVM trong phân loại tình trạng sức khỏe thai nhi từ dữ liệu cardiotocogram

Trần Thị Huế[1] *
[1]*Học viện Kỹ thuật quân sự*
Email: tranhuec3cx@gmail.com

Tóm tắt:

Bài báo đề xuất một phương pháp phân loại tình trạng sức khỏe thai nhi dựa trên dữ liệu cardiotocogram (CTG) bằng cách kết hợp mạng nơ-ron tích chập AlexNet và máy vector hỗ trợ SVM. Dữ liệu CTG bao gồm các thông số về nhịp tim thai nhi (FHR) và cơn co tử cung (UC), được phân thành ba nhóm: bình thường, nghi ngờ và bệnh lý. Mô hình đề xuất sử dụng AlexNet để trích xuất các đặc trưng, sau đó dùng SVM để phân loại tình trạng sức khỏe. Phương pháp này cũng áp dụng kỹ thuật học chuyển tiếp để tối ưu hóa thời gian huấn luyện, giúp tăng hiệu quả xử lý trong môi trường thực tế. Với cách tiếp cận này, mô hình AlexNet-SVM có tiềm năng ứng dụng trong y tế, hỗ trợ bác sĩ phát hiện sớm các vấn đề sức khỏe ở thai nhi, từ đó giảm thiểu rủi ro và bảo vệ sức khỏe cho cả mẹ và bé.

Từ khóa: *Cardiotocogram; AlexNet; SVM.*

1. Mở đầu

Thai kỳ là một giai đoạn quan trọng trong cuộc đời người phụ nữ, đòi hỏi sự theo dõi và chăm sóc đặc biệt để đảm bảo sức khỏe cho cả mẹ và thai nhi. Tuy nhiên, các biến chứng thai kỳ vẫn là một thách thức lớn đối với hệ thống y tế toàn cầu. Theo các nghiên cứu, mỗi năm trên thế giới có hàng triệu ca biến chứng liên quan đến thai kỳ, bao gồm tiền sản giật, tiểu đường thai kỳ, nhiễm trùng, sinh non, và suy thai. Những biến chứng này không chỉ đe dọa tính mạng mà còn để lại hậu quả lâu dài cho sức khỏe của mẹ và bé [1, 2]. Việc phát hiện và can thiệp sớm các nguy cơ này là yếu tố then chốt để giảm thiểu tỷ lệ tử vong và nâng cao chất lượng chăm sóc y tế.

Cardiotocography (CTG) là một công cụ không xâm lấn được sử dụng rộng rãi trong sản khoa nhằm ghi lại nhịp tim thai nhi (Fetal Heart Rate - FHR) và các cơn co thắt tử cung (Uterine Contractions - UC). CTG thường được thực hiện từ tuần thứ 32 của thai kỳ trở đi, đặc biệt trong tam cá nguyệt thứ ba, khi thai nhi đã phát triển đầy đủ các phản ứng sinh lý như thay đổi nhịp tim theo chuyển động và cơn co thắt tử cung. Mỗi lần ghi CTG thường kéo dài từ 20 đến 30 phút, nhưng có thể lên đến 60 phút trong các trường hợp cần theo dõi chi tiết hơn để đảm bảo đánh giá chính xác tình trạng sức khỏe của thai nhi. CTG cung cấp thông tin thời gian thực về tình trạng sức khỏe của thai nhi, hỗ trợ phát hiện sớm các nguy cơ như thiếu oxy hoặc suy thai. Đây là một phương pháp đơn giản, chi phí thấp và có độ chính xác cao, thường được các chuyên gia y tế lựa chọn để giám sát tình trạng thai kỳ [3]. Theo hướng dẫn của Liên đoàn Sản khoa và Phụ khoa Quốc tế (FIGO), kết quả kiểm tra CTG được phân loại thành ba nhóm chính: bình thường (Normal), nghi ngờ (Suspicious), và bệnh lý (Pathological). Điều này cung cấp cơ sở để bác sĩ đưa ra các quyết định lâm sàng phù hợp nhằm đảm bảo an toàn cho thai nhi và người mẹ [4].

Mặc dù vậy, việc giải thích dữ liệu CTG hiện nay chủ yếu được thực hiện thủ công, phụ thuộc vào kinh nghiệm của bác sĩ. Điều này không chỉ dẫn đến nguy cơ sai sót chủ quan mà còn làm tăng tỷ lệ dương tính giả, gây ra các can thiệp không cần thiết như mổ lấy thai. Để khắc phục những hạn chế này, các thuật toán học máy (Machine Learning) và học sâu (Deep Learning) đã được áp dụng để tự động hóa và nâng cao hiệu quả phân tích dữ liệu CTG. Các ứng dụng AI đã cho thấy tiềm năng đáng kể trong lĩnh vực y tế, từ nhận diện hình ảnh y khoa đến hỗ trợ ra quyết định lâm sàng. Ví dụ, AI đã được sử dụng trong phân tích hình ảnh X-quang để phát hiện ung thư phổi, với độ chính xác tương đương hoặc vượt qua các chuyên gia y tế trong một số trường hợp [5, 6]. Ngoài ra, các thuật toán học máy đã được triển khai để phân tích dữ liệu y tế phức tạp, hỗ trợ đánh giá tình trạng thai nhi một cách nhanh chóng và chính xác hơn.

Trong lĩnh vực Cardiotocography, nhiều nghiên cứu đã áp dụng thành công các thuật toán học máy để phân loại dữ liệu CTG. Các thuật toán cơ bản như Naïve Bayes và Logistic Regression đạt độ chính xác lần lượt 84.5% và 82.5%, cho thấy khả năng ứng dụng của các mô hình đơn giản trong việc xử lý dữ liệu y tế [7, 8]. K-Nearest Neighbors (k-NN), một thuật toán phổ biến với tính dễ hiểu và hiệu quả, đã đạt độ chính xác 85% trong phân loại các nhóm bình thường, nghi ngờ, và bệnh lý từ dữ liệu CTG [9]. Các phương pháp học sâu gần đây đã mang lại những kết quả tích cực hơn. Chẳng hạn, GoogLeNet, một mạng nơ-ron tích chập (CNN) được huấn luyện trước, đã được sử dụng để phân loại tín hiệu CTG dưới dạng ảnh scalogram, đạt độ chính xác 91% [10]. Ngoài ra, mạng nơ-ron tích chập một chiều (1D-CNN) cũng đã được triển khai để phân tích tín hiệu CTG dạng chuỗi thời gian, giúp phát hiện các kết quả bất thường với độ chính xác cao [11].

2. Phương pháp

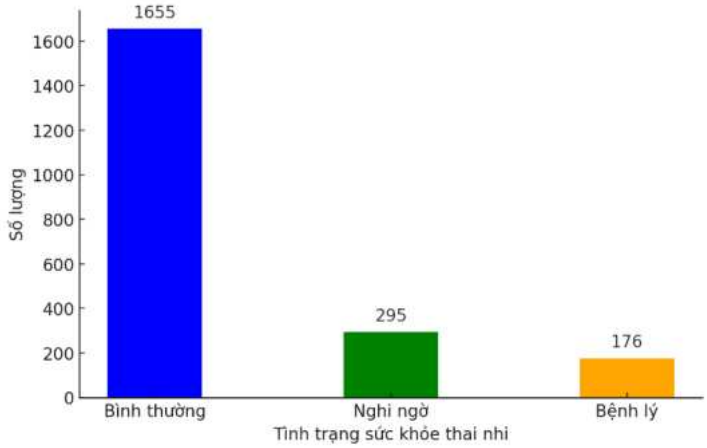
2.1. Dữ liệu và tiền xử lý

Nghiên cứu này sử dụng bộ dữ liệu Cardiotocography (CTG) từ *UCI Machine Learning Repository* [12], được cung cấp bởi Viện Kỹ thuật Y sinh Porto và Khoa Y học thuộc Đại học Porto, Bồ Đào Nha, vào tháng 9 năm 2010. Bộ dữ liệu bao gồm 2.126 bản ghi, chứa các thông số liên quan đến nhịp tim thai nhi (Fetal Heart Rate - FHR) và các cơn co thắt tử cung (Uterine Contractions - UC) trong thời gian mang thai. Các mẫu dữ liệu được phân loại thành ba nhóm dựa trên phân tích của các chuyên gia y tế, bao gồm: bình thường (Normal), nghi ngờ (Suspect), và bệnh lý (Pathological). Tổng quan về các đặc trưng trong bộ dữ liệu được trình bày chi tiết trong bảng 2.

Trong bộ dữ liệu này, nhóm bình thường chiếm đa số với 1.655 mẫu (77,8%), trong khi nhóm nghi ngờ và bệnh lý lần lượt có 295 mẫu (13,9%) và 176 mẫu (8,3%). Dữ liệu ban đầu được mô tả ở hình 1.

Sự phân bố không đồng đều giữa các nhóm dẫn đến hiện tượng mất cân bằng dữ liệu, điều này có thể ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu suất của các mô hình học máy. Để khắc phục vấn đề này, nghiên cứu đã áp dụng phương pháp Naive Random Oversampling nhằm tăng số lượng mẫu thuộc các nhóm thiểu số. Phương pháp này tạo ra các mẫu dữ liệu mới bằng cách nhân bản

hoặc biến đổi ngẫu nhiên các quan sát từ các nhóm có ít mẫu. Sau khi áp dụng kỹ thuật này, hiệu suất của các mô hình học máy khi huấn luyện trên tập dữ liệu cân bằng [13].



Hình 1. Biểu đồ phân bố dữ liệu ban đầu

Mô hình AlexNet-SVM sử dụng dữ liệu Cardiotocogram (CTG) để phân loại sức khỏe thai nhi thành 3 nhóm chính:

Bảng 1. Phân loại sức khỏe thai nhi

Nhóm	**Ý nghĩa**	**Nguy cơ bệnh lý**
1 - Normal (Bình thường)	Nhịp tim và cơn co tử cung ổn định	Không có nguy cơ bệnh lý
2 - Suspect (Nghi ngờ)	Nhịp tim có biến đổi nhẹ, cần theo dõi	Tiền sản giật, suy thai nhẹ
3 - Pathological (Bệnh lý)	Nhịp tim bất thường nghiêm trọng	Suy thai, thiếu oxy thai, thai lưu

Trước khi đưa vào mô hình, các đặc trưng được chuẩn hóa bằng phương pháp Z-score. Chuẩn hóa Z-score đảm bảo rằng tất cả các đặc trưng có trung bình bằng 0 và độ lệch chuẩn bằng 1, được tính toán theo công thức:

$$X_{std} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Trong đó:

- x : Giá trị của đặc trưng cần chuẩn hóa.
- μ : Giá trị trung bình của đặc trưng.
- σ : Độ lệch chuẩn của đặc trưng.

Việc chuẩn hóa giúp tăng tính đồng nhất của dữ liệu, giảm ảnh hưởng của các đặc trưng có phạm vi giá trị lớn, tăng độ chính xác của mô hình học máy trong quá trình huấn luyện [14].

Bảng 2. Mô tả các đặc trưng

Số thứ tự	**Đặc trưng**	**Mô tả**

1	Baseline Value (BV)	Giá trị nhịp tim cơ bản của thai nhi (Fetal Heart Rate - FHR)
2	Accelerations (AC)	Số lần tăng nhịp (tăng FHR trên 15 bpm kéo dài ≥15 giây)
3	Fetal Movement (FM)	Chuyển động của thai nhi
4	Uterine Contractions (UC)	Cơn co tử cung
5	Light Decelerations (LD)	Giảm nhịp nhẹ của thai nhi
6	Severe Decelerations (SD)	Giảm nhịp nghiêm trọng (giảm FHR kéo dài >2 phút)
7	Prolonged Decelerations (PD)	Giảm nhịp kéo dài (giảm FHR kéo dài ≥2 phút và <10 phút)
8	Abnormal Short-Term Variability (ASTV)	Biến thiên ngắn hạn bất thường của nhịp tim (dao động nhịp tim ≤5 bpm)
9	Mean Value of Short-Term Variability (MSTV)	Giá trị trung bình của độ biến thiên ngắn hạn của FHR (dao động tức thời giữa các nhịp tim kế tiếp)
10	Percentage of Time with Abnormal Long-Term Variability (ALTV)	Tỷ lệ thời gian với biến thiên dài hạn bất thường của FHR
11	Mean Value of Long-Term Variability (MLTV)	Giá trị trung bình của biến thiên dài hạn của FHR (dao động lớn hơn và chậm hơn trong khoảng thời gian dài hơn)
12	Histogram Width (HW)	Độ rộng của biểu đồ tần suất nhịp tim (FHR)
13	Histogram Max (Hmax)	Giá trị nhịp tim tối đa trong biểu đồ FHR
14	Histogram Min (Hmin)	Giá trị nhịp tim tối thiểu trong biểu đồ FHR
15	Number of Histogram Peaks (NP)	Số lượng đỉnh trong biểu đồ FHR
16	Number of Histogram Zeroes (NZ)	Số lần FHR bằng 0 trong biểu đồ
17	Histogram Mode (HMo)	Giá trị mode (giá trị xuất hiện nhiều nhất) của FHR
18	Histogram Mean (HMe)	Giá trị trung bình của nhịp tim trong biểu đồ FHR
19	Histogram Median (HMed)	Giá trị trung vị của nhịp tim trong biểu đồ FHR
20	Histogram Variance (HV)	Độ biến thiên của FHR trong biểu đồ
21	Histogram Tendency (HT)	Xu hướng của biểu đồ FHR

Trong quá trình phân tích và phân loại tình trạng thai nhi, một số đặc trưng nổi bật có ảnh hưởng lớn đến sức khỏe thai nhi như các đặc trưng có số thứ tự 1, 2, 4, 5-7, 8-11 trong Bảng 2:

+ *Đặc trưng số 1: Nhịp tim cơ bản của thai nhi (Baseline Value - BV):*

- Đây là giá trị trung bình của FHR trong một khoảng thời gian nhất định.
- Khoảng giá trị bình thường: 110 - 160 bpm.
- Bất thường:
    - Dưới 110 bpm: Có thể là dấu hiệu của nhịp tim chậm, thường liên quan đến thiếu oxy hoặc vấn đề về tuần hoàn thai nhi.

- Trên 160 bpm: Có thể là dấu hiệu của nhịp tim nhanh, thường do stress thai nhi, nhiễm trùng hoặc sốt của mẹ.

+ *Đặc trưng số 2: Sự tăng nhịp tim (Accelerations - AC):*

- Được định nghĩa là sự gia tăng nhịp tim tạm thời trên 15 bpm kéo dài ít nhất 15 giây.
- Ý nghĩa: Đây là dấu hiệu thai nhi phản ứng tốt với các kích thích từ môi trường, cho thấy hệ thần kinh hoạt động bình thường.
- Bất thường:
  - Thiếu sự tăng nhịp tim: Có thể cho thấy thai nhi không đáp ứng tốt, có nguy cơ suy thai hoặc gặp vấn đề về hệ thần kinh.

+ *Đặc trưng số 4: Cơn co tử cung (Uterine Contractions - UC):*

- Là chỉ số đo tần suất và cường độ của các cơn co tử cung.
- Ảnh hưởng:
  - Co tử cung quá nhiều: làm giảm lượng oxy cung cấp cho thai nhi, gây suy thai.
  - Co tử cung quá ít: Có thể ảnh hưởng đến quá trình sinh nở và sức khỏe thai nhi.

+ *Đặc trưng số 5-7: Giảm nhịp tim (Decelerations):*

Giảm nhịp tim là sự sụt giảm tạm thời của FHR, có thể là phản ứng sinh lý hoặc dấu hiệu nguy hiểm. Gồm ba loại chính:

- Giảm nhịp nhẹ (Light Decelerations - LD): Không đáng lo ngại nếu chỉ xuất hiện trong thời gian ngắn.
- Giảm nhịp nghiêm trọng (Severe Decelerations - SD): FHR giảm sâu và kéo dài trên 2 phút, có thể là dấu hiệu suy thai do thiếu oxy nghiêm trọng.
- Giảm nhịp kéo dài (Prolonged Decelerations - PD): FHR giảm từ 2 đến 10 phút, cho thấy thai nhi đang gặp nguy hiểm và cần can thiệp y tế ngay lập tức.

+ *Đặc trưng số 8-11: Biến thiên nhịp tim (Variability):*

Biến thiên nhịp tim thể hiện sự dao động của FHR theo thời gian, phản ánh khả năng điều hòa của hệ thần kinh thai nhi. Gồm hai loại quan trọng:

- Biến thiên ngắn hạn (Short-Term Variability - STV):
  - Được đo bằng Abnormal Short-Term Variability (ASTV) và Mean Value of Short-Term Variability (MSTV).
  - Biến thiên thấp hoặc bất thường có thể là dấu hiệu thai nhi bị suy yếu, thiếu oxy hoặc hệ thần kinh chưa phát triển hoàn chỉnh.
- Biến thiên dài hạn (Long-Term Variability - LTV):
  - Được đo bằng Percentage of Time with Abnormal Long-Term Variability (ALTV) và Mean Value of Long-Term Variability (MLTV).
  - Biến thiên dài hạn quá thấp hoặc quá cao có thể là dấu hiệu bất thường của hệ tuần hoàn thai nhi.

2.2. Kiến trúc Alexnet

Mạng nơ-ron tích chập AlexNet được Alex Krizhevsky cùng các cộng sự giới thiệu trong nghiên cứu "ImageNet Classification with Deep Convolutional Networks" và đã giành

chiến thắng trong cuộc thi ILSVRC (ImageNet Large-Scale Visual Recognition Challenge) năm 2012 [15]. AlexNet là một mạng học sâu gồm năm lớp tích chập (convolutional layers), ba lớp kết nối đầy đủ (fully connected layers), và sử dụng các lớp kích hoạt phi tuyến ReLU (Rectified Linear Unit) và Softmax. Các lớp tích chập của AlexNet đóng vai trò trích xuất các đặc trưng từ hình ảnh đầu vào thông qua các bộ lọc (filters). Sau mỗi lớp tích chập, mạng sử dụng max-pooling nhằm giảm kích thước không gian của đặc trưng và tăng hiệu quả tính toán. Cấu trúc của AlexNet được hỗ trợ thêm bởi kỹ thuật Local Response Normalization (LRN), giúp tăng khả năng phân biệt và ổn định trong quá trình huấn luyện.

Một trong những điểm đột phá của AlexNet là việc áp dụng hàm kích hoạt phi tuyến ReLU. Hàm này được định nghĩa bởi:

$$f(x) = \max(0, x)$$

trong đó x là giá trị đầu vào. Hàm ReLU có ưu điểm đơn giản, dễ lập trình, và giảm thiểu hiện tượng gradient biến mất, giúp tăng tốc độ hội tụ trong quá trình huấn luyện [16].

AlexNet không chỉ đạt được kết quả vượt trội trong bài toán phân loại hình ảnh mà còn trở thành tiền đề cho nhiều nghiên cứu học sâu khác. Mô hình này đã được điều chỉnh và áp dụng thành công trong các lĩnh vực như nhận dạng y tế, thị giác máy tính, và nhiều bài toán phân tích dữ liệu phức tạp [17].

2.3. Support Vector Machine (SVM)

Máy vector hỗ trợ (Support Vector Machine - SVM) là một giải thuật máy học có giám sát, được xây dựng dựa trên lý thuyết học thống kê của Vapnik và Chervonenkis [18].

SVM có thể mở rộng để làm việc với dữ liệu không tuyến tính bằng cách sử dụng các hàm kernel. Các hàm kernel ánh xạ dữ liệu từ không gian gốc sang không gian đặc trưng cao hơn, nơi các lớp có thể được phân tách tuyến tính [19]. Điều này làm cho SVM trở thành một công cụ linh hoạt và hiệu quả, đặc biệt đối với dữ liệu có cấu trúc phức tạp hoặc kích thước lớn.

Với khả năng phân loại mạnh mẽ, SVM đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như nhận dạng hình ảnh, phát hiện bất thường, và phân tích tín hiệu y tế [20].

2.4. Mô hình đề xuất AlexNet-SVM

Nghiên cứu này đề xuất mô hình AlexNet-SVM, kết hợp giữa mạng nơ-ron tích chập AlexNet để trích xuất đặc trưng từ dữ liệu và thuật toán SVM để thực hiện phân loại. Cách tiếp cận này khai thác điểm mạnh của cả hai phương pháp, đặc biệt hiệu quả trong xử lý và phân loại dữ liệu tín hiệu y tế, cụ thể là dữ liệu cardiotocogram (CTG).

Trích xuất đặc trưng bằng AlexNet

Dữ liệu đầu vào bao gồm tất cả các đặc trưng từ bộ dữ liệu CTG, cụ thể là 21 đặc trưng chính. Các đặc trưng này được sắp xếp thành ma trận 3x7. Tiếp theo, ma trận này được mở rộng thành ảnh có kích thước $227 \times 227 \times 3$ bằng cách nội suy không gian để tăng kích thước từ 3×7 lên 227×227, đồng thời nhân bản giá trị trên ba kênh màu (RGB) để phù hợp với đầu vào của AlexNet.

Mô hình sử dụng AlexNet với kiến trúc gồm 5 lớp tích chập để trích xuất đặc trưng từ dữ liệu CTG. Các đặc trưng quan trọng như biến thiên nhịp tim (Short-Term Variability - STV,

Long-Term Variability - LTV), số lần tăng nhịp tim (Accelerations - AC) và số lần giảm nhịp tim (Decelerations - LD, SD, PD) được nhận diện thông qua các bộ lọc convolutional layers.

Cụ thể:

- Conv1 - Conv2: Nhận diện biên độ dao động của nhịp tim, tương ứng với đặc trưng số 1 (Baseline Value - BV).
- Conv3 - Conv5: Tổng hợp và khuếch đại các đặc trưng quan trọng như biến thiên nhịp tim (đặc trưng số 8-11), số lần tăng nhịp tim (đặc trưng số 2) và số lần giảm nhịp tim (đặc trưng số 5-7).

Sau khi đi qua năm lớp tích chập, dữ liệu được làm phẳng (Flatten) thành một vector có 9.216 giá trị. Vector này được đưa vào SVM để thực hiện phân loại tình trạng sức khỏe thai nhi thành ba nhóm: bình thường, nghi ngờ, và bệnh lý. Với cách tiếp cận này, AlexNet giúp mô hình tự động học và tối ưu hóa các đặc trưng quan trọng nhất từ dữ liệu, từ đó nâng cao độ chính xác trong chẩn đoán và hỗ trợ bác sĩ trong việc đánh giá sức khỏe thai nhi.

Thay thế lớp Fully Connected bằng SVM

Thay vì sử dụng lớp fully connected cuối cùng của AlexNet (thiết kế cho bài toán ImageNet), mô hình sử dụng SVM để đảm nhận vai trò phân loại. Thuật toán SVM tìm kiếm một siêu phẳng tối ưu để phân tách các lớp trong không gian đặc trưng.

Mô hình sử dụng SVM thay thế lớp fully connected cuối cùng của AlexNet. SVM xác định siêu phẳng tối ưu để phân loại các tình trạng sức khỏe thai nhi:

• Bình thường (Normal)

• Nghi ngờ (Suspicious)

• Bệnh lý (Pathological)

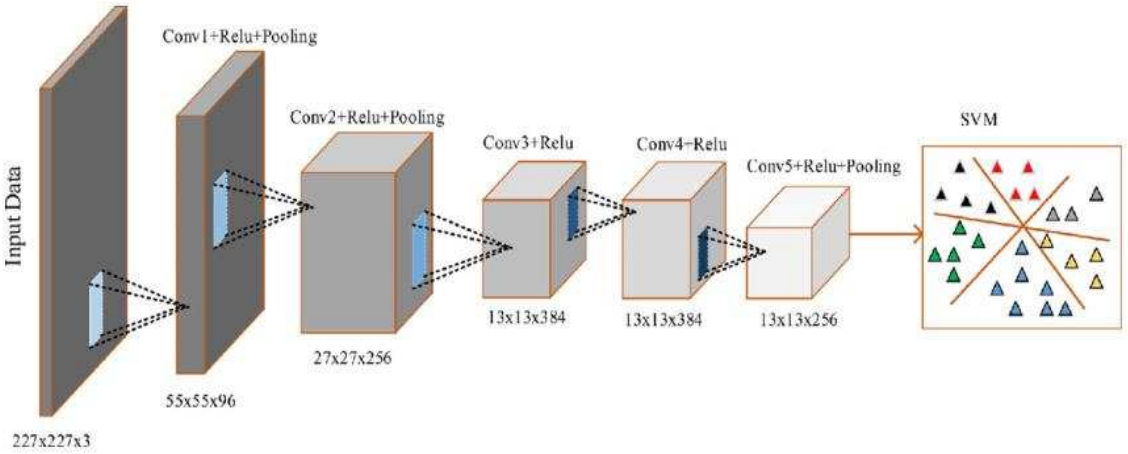
Cách xác định siêu phẳng trong SVM:

- Đầu vào của SVM là vector 9216 giá trị từ AlexNet.
- SVM sử dụng phương trình:

$$w.x + b = 0 \quad (2)$$

Trong đó:

- w là vector trọng số của SVM (xác định hướng của siêu phẳng).
- x là vector đặc trưng từ AlexNet (9216 chiều).
- b là hệ số bias điều chỉnh.



Hình 2. Mô hình đề xuất AlexNet-SVM

Học chuyển tiếp (Transfer Learning)

Học chuyển tiếp là một kỹ thuật quan trọng được áp dụng để tận dụng các đặc trưng đã học từ các tập dữ liệu lớn, chẳng hạn như ImageNet [21]. Trong mô hình này, các lớp tích chập ban đầu của AlexNet được giữ nguyên (đóng băng) để bảo toàn các đặc trưng phổ quát, trong khi các lớp fully connected được điều chỉnh lại để học các đặc trưng cụ thể từ dữ liệu CTG. Phương pháp này không chỉ giảm thiểu thời gian và tài nguyên tính toán cần thiết mà còn cải thiện độ chính xác của mô hình khi áp dụng trên dữ liệu thực tế.

Sự kết hợp giữa AlexNet và SVM cho phép mô hình khai thác tối đa khả năng trích xuất đặc trưng của mạng học sâu và hiệu quả phân loại của SVM. Điều này làm cho mô hình trở thành một giải pháp tiềm năng, đáp ứng tốt yêu cầu của các bài toán phân loại trong lĩnh vực y tế, đặc biệt đối với dữ liệu có cấu trúc phức tạp như CTG.

3. Kết quả thực nghiệm

3.1. Phương pháp đánh giá

Hiệu quả của các thuật toán phân loại được đánh giá dựa trên bốn độ đo chính: Accuracy, Precision, Recall, và F1-score. Các độ đo này được xác định dựa trên các giá trị sau:

True Positive (TP): Số lượng mẫu thuộc một lớp cụ thể được phân loại đúng vào chính lớp đó.

False Negative (FN): Số lượng mẫu thuộc một lớp cụ thể nhưng bị phân loại nhầm sang lớp khác.

True Negative (TN): Số lượng mẫu không thuộc một lớp cụ thể và được phân loại đúng là không thuộc lớp đó.

False Positive (FP): Số lượng mẫu không thuộc một lớp cụ thể nhưng bị phân loại nhầm là thuộc lớp đó.

Các độ đo được tính toán như sau:

Accuracy: Độ chính xác phân loại biểu thị tỷ lệ của các mẫu được phân loại chính xác trên tổng số mẫu và được mô tả ở phương trình (3).

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}.100\% \quad (3)$$

Precision: Giá trị dự đoán dương tính, precision biểu thị tỷ lệ số mẫu dương tính được phân loại chính xác trên tổng số mẫu dự đoán dương tính và được mô tả ở phương trình (4).

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}.100\% \quad (4)$$

Recall: Tỷ lệ dương tính thật hay độ nhạy, recall biểu thị tỷ lệ giữa mẫu dương tính với tổng số mẫu dương tính và số mẫu âm tính giả, được mô tả ở phương trình (5).

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}.100\% \quad (5)$$

F1-score: F1-score được định nghĩa là giá trị trung bình hài hòa giữa Precision và Recall, được mô tả ở phương trình (6). F1-score có phạm vi từ 0 đến 1, giá trị cao của nó thể hiện hiệu suất phân loại cao.

$$F1\text{-}\ score = \frac{2.precision.recall}{precision + recall}.100\% \quad (6)$$

Các độ đo trên được sử dụng để đánh giá hiệu quả tổng thể của mô hình phân loại và hiệu suất của từng lớp cụ thể, giúp phản ánh đầy đủ khả năng phân loại của thuật toán [22, 23].

3.2. Kết quả

Dữ liệu được chia ngẫu nhiên thành hai phần để phát triển và đánh giá các thuật toán: phần dữ liệu huấn luyện chiếm 70% tổng số dữ liệu, trong khi phần dữ liệu kiểm tra chiếm 30% còn lại. Mô hình AlexNet-SVM được xây dựng với mục tiêu cải thiện khả năng phân loại và tăng tốc độ hội tụ. Các siêu tham số của mô hình được tối ưu hóa thông qua quá trình thử nghiệm trên tập dữ liệu huấn luyện và kiểm tra để đạt hiệu suất tốt nhất về độ chính xác và hiệu quả xử lý.

Mô hình sử dụng 5 lớp tích chập, trong đó các bộ lọc có kích thước khác nhau được thiết kế để trích xuất các đặc trưng quan trọng từ dữ liệu đầu vào. Max pooling được áp dụng để giảm kích thước không gian của đặc trưng, giúp giảm thiểu độ phức tạp tính toán mà vẫn giữ được các đặc trưng quan trọng. Thay vì sử dụng các lớp fully connected truyền thống ở đầu ra, mô hình thay thế bằng SVM, giúp tăng cường khả năng phân loại và giảm hiện tượng quá khớp (overfitting). Các tham số chi tiết được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Các giá trị tham số

Tham số	**Giá trị**
Số lớp tích chập	5
Số bộ lọc (lớp 1)	96 bộ lọc, kích thước 11×11
Số bộ lọc (lớp 2)	256 bộ lọc, kích thước 5×5
Số bộ lọc (lớp 3-5)	384 bộ lọc, kích thước 3×3
Loại pooling	Max pooling (stride = 2, kích thước = 3×3)
Lớp kết nối đầy đủ	Thay bằng SVM
Hàm kích hoạt	SoftMax

Bảng 4. Trọng số w và hệ số bias

Trọng số	Giá trị				Bias
W(1,1)	0.0143	0.0041	…	0.0049	10.7488
W(2,1)	0.0036	-0.0008	…	0.0016	4.7607
W(3,1)	0.0133	0.0002	…	0.0097	-4.5462

Bảng 5. Kết quả của mô hình AlexNet-SVM

Mô hình	Accuracy (%)	Recall (%)	Precision (%)	F1-score (%)
AlexNet-SVM	96.33	96.29	96.41	96.34

Các kết quả trên cho thấy mô hình AlexNet-SVM đạt hiệu suất vượt trội, với độ chính xác là 96.33% và điểm F1 đạt 96.34%, thể hiện khả năng phân loại chính xác và ổn định. Độ nhạy (Recall) đạt 96.29%, và độ chính xác dự đoán (Precision) đạt 96.41%, chứng tỏ mô hình có khả năng dự đoán đúng trạng thái sức khỏe thai nhi một cách hiệu quả.

Kết quả so sánh với các mô hình khác được trình bày trong Bảng 6.

Bảng 6. So sánh hiệu suất giữa các mô hình

Mô hình	Accuracy (%)	Recall (%)	Precision (%)	F1-score (%)	Nguồn
AlexNet	85.45	86.10	84.67	85.38	[24]
LS-SVM	80.64	81.28	80.00	80.64	[25]
Random Forest	83.30	90.29	76.32	82.36	[26]
AlexNet-SVM	96.33	96.29	96.41	96.34	Nghiên cứu đề xuất

Kết quả này chứng minh rằng AlexNet-SVM là mô hình có hiệu suất tốt nhất, với độ chính xác cao hơn rõ rệt so với các mô hình khác như LS-SVM (80.64%) và Random Forest (83.30%). Điểm F1 của AlexNet-SVM đạt 96.34%, cao hơn so với AlexNet (85.38%), khẳng định khả năng cân bằng tốt giữa độ nhạy và độ chính xác dự đoán.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và triển khai mô hình AlexNet-SVM nhằm phân loại trạng thái sức khỏe thai nhi dựa trên dữ liệu cardiotocogram (CTG). Kết quả cho thấy mô hình đạt hiệu suất cao với độ chính xác 96,33%, độ nhạy 96,29%, độ chính xác dự đoán 96,41%, và điểm F1 96,34%. So với các mô hình khác như Random Forest, LS-SVM, và AlexNet, mô hình AlexNet-SVM cho thấy hiệu quả vượt trội, đặc biệt trong khả năng phân loại chính xác và ổn định.

Mô hình sử dụng kỹ thuật học chuyển tiếp, giúp giảm thời gian huấn luyện và tối ưu hóa tài nguyên tính toán. Việc thay thế các lớp fully connected bằng SVM ở lớp đầu ra giúp tăng cường khả năng phân loại và hạn chế hiện tượng quá khớp. Mô hình AlexNet-SVM không chỉ giúp phân loại sức khỏe thai nhi với độ chính xác cao mà còn có tiềm năng hỗ trợ bác sĩ trong việc đưa ra quyết định lâm sàng. Trong tương lai, tác giả sẽ thử nghiệm mô hình trên các bộ dữ liệu CTG từ các bệnh viện khác nhau để kiểm tra khả năng tổng quát hóa, đồng thời tối ưu hóa kiến trúc mạng để giảm thời gian tính toán.

Tài liệu tham khảo

1. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/maternal-mortality
2. Ayres-de-Campos, D., Spong, C. Y., & Chandraharan, E. (2015). FIGO consensus guidelines on intrapartum fetal monitoring: Cardiotocography. *International Journal of Gynecology & Obstetrics, 131*(1), 13–24. https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2015.06.020
3. Fergus, P., Selvaraj, M., & Chalmers, C. (2019). Modelling segmented cardiotocography time-series signals using one-dimensional convolutional neural networks for the early detection of abnormal birth outcomes. *arXiv preprint arXiv:1908.02338*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.02338
4. Al-Dhuhli, I., Boulila, W., & Hammoudeh, M. (2022). Automated classification of CTG signals using deep learning-based scalogram analysis. *IEEE Access, 10*, 75487–75495.
5. Kumar, M., & colleagues. (2020). Application of Naïve Bayes in CTG data classification. *Journal of Medical Informatics*. Retrieved from https://www.journalofmedicalinformatics.com
6. Zhang, X., & Zhao, Z. (2018). Logistic regression model for CTG data classification. *Expert Systems with Applications, 93*, 15–22. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.010
7. Huang, Z., Zhao, Y., & colleagues. (2020). Machine learning techniques for fetal health status prediction from CTG. *Journal of Biomedical Informatics, 102*, 103789.
8. Sabbir Ahmed Chowdhury. (2021). Cardiotocography classification using machine learning models: Random Forest and XGBoost. *Journal of Artificial Intelligence in Medicine*.
9. Alzubaidi, L., Al-Shamma, O., & Fadhel, M. A. (2021). CTG-Net: A convolutional neural network model for detecting abnormal fetal outcomes. *BMC Medical Informatics and Decision Making, 21*(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/s12911-022-02068-1
10. Huddar, S. A., & Sontakke, S. (2018). ANFIS for CTG data classification. *Computers in Biology and Medicine, 103*, 150–157. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.10.005
11. Alpaydin, E. (2016). Machine learning: The new AI. *MIT Press*. Retrieved from https://mitpress.mit.edu/books/machine-learning-new-ai
12. https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/cardiotocography
13. Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research, 16*, 321–357.
14. He, H., & Garcia, E. A. (2009). Learning from Imbalanced Data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 21*(9), 1263–1284.
15. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems, 25*, 1097–1105.

16. Nair, V., & Hinton, G. E. (2010). Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines. In *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML)* (pp. 807–814).
17. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature, 521*(7553), 436–444.
18. Vapnik, V. N. (1998). *Statistical Learning Theory*. Wiley.
19. Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning, 20*(3), 273–297.
20. Scholkopf, B., & Smola, A. J. (2002). *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press.
21. Yosinski, J., Clune, J., Bengio, Y., & Lipson, H. (2014). How transferable are features in deep neural networks? *Advances in Neural Information Processing Systems, 27*, 3320–3328.
22. Powers, D. M. W. (2011). Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies, 2*(1), 37–63.
23. Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management, 45*(4), 427–437.
24. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems, 25*, 1097–1105.
25. Suykens, J. A. K., & Vandewalle, J. (1999). Least Squares Support Vector Machine Classifiers. *Neural Processing Letters, 9*(3), 293–300. https://doi.org/10.1023/A:1018628609742
26. Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning, 45*(1), 5–32.

Application of the AlexNet-SVM Model in Classifying Fetal Health Status from Cardiotocogram Data

Abstract: *This paper proposes a method for classifying fetal health status based on cardiotocogram (CTG) data by combining the AlexNet convolutional neural network and support vector machines (SVM). CTG data, which includes parameters such as fetal heart rate (FHR) and uterine contractions (UC), is categorized into three groups: normal, suspicious, and pathological. The proposed model employs AlexNet to extract features and utilizes SVM to classify the health status. This approach also integrates transfer learning techniques to optimize training time, enhancing processing efficiency in real-world applications. With this methodology, the AlexNet-SVM model demonstrates potential applications in healthcare, aiding physicians in early detection of fetal health issues, thereby reducing risks and safeguarding the health of both mother and child.*

Keywords: Cardiotocogram; AlexNet; SVM.

Nghiên cứu phương pháp xác định quỹ đạo bay của mục tiêu tại thời gian thực sử dụng camera hai mắt

Phạm Minh Kha[1], Cao Hữu Tình[1], Nguyễn Quang Thi[2]

[1] *Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự*

[2] *Viện Tích hợp hệ thống, Học viện Kỹ thuật quân sự*

[*] Email: phamminhkha102@gmail.com, Contact number: 0969998319

Tóm tắt

Bài báo đề xuất một phương pháp sử dụng camera hai mắt để xác định quỹ đạo bay của mục tiêu tại thời gian thực. Để nâng cao độ chuẩn xác và tốc độ xử lý của hệ thống thì chúng tôi đề xuất phương pháp dùng thuật toán Mean-Shift kết hợp bộ lọc hạt để bám bắt mục tiêu ở camera số một, sau đó dùng phương pháp so khớp ảnh xám để xác định mục tiêu tại camera số hai, kết hợp với bệ quay tầm hướng để luôn giữ mục tiêu trong phạm vi quan sát, từ đó bám bắt và xác định được quỹ đạo bay của mục tiêu với thời gian xử lý nhập, đảm bộ độ trễ thấp.

Từ khóa: *Camera hai mắt, quỹ đạo bay, bám bắt mục tiêu*

1. Giới thiệu

Con người chủ yếu thông qua hình ảnh để nhận biết thế giới xung quanh. Mắt người bằng kinh nghiệm và trí nhớ để xác định kích thước và khoảng cách của vật thể trong không gian, còn đối với hệ thống camera thì bằng cách xác định độ sai lệch của cùng một mục tiêu tại hình ảnh từ hai camera khác nhau để tính toán ra tọa độ của mục tiêu. Đối với mục tiêu di động, nếu camera cố định thì mục tiêu khi di chuyển rất dễ vượt ra ngoài phạm vi quan sát của camera, vì thế chúng tôi đặt hệ camera lên một bệ quay tầm hướng, trong quá trình theo dõi mục tiêu bệ quay sẽ tự động bám sát mục tiêu để luôn có thể giữ mục tiêu trong tầm quan sát.

Thị giác hai mắt mô phỏng mắt người và sử dụng camera hai mắt để thu thập hình ảnh đồng thời xác định được thông tin ba chiều về mục tiêu. Tuy nhiên, do hạn chế về quy trình sản xuất camera nên các tham số của hệ thống camera không đạt độ chuẩn xác lý tưởng nên cần hiệu chỉnh để xác định các thông số liên quan đến việc thu nhận hình ảnh của hệ camera. Hiệu chỉnh máy ảnh là bước đầu tiên trong hệ thống thị giác hai mắt và cũng là bước rất quan trọng. Năm 2000, Z. Zhang đã đề xuất một phương pháp hiệu chỉnh tuyến tính cho các máy ảnh mô hình phi tuyến trong bài báo nổi tiếng của mình. Nó sử dụng mục tiêu mặt phẳng hai chiều để thu thập hình ảnh từ nhiều góc nhìn khác nhau và sau đó giải quyết các điểm đặc trưng của tấm hiệu chỉnh không gian ba chiều[]. Mối quan hệ hình học giữa các điểm chiếu trên những hình ảnh này được sử dụng để tính toán các thông số bên trong và bên ngoài của máy ảnh và đạt được các tham số hiệu chuẩn máy ảnh. Phương pháp này giới thiệu một mô hình biến dạng thấu kính, dễ thực hiện, có độ ổn định cao và dễ áp dụng thực tế.

Đối với hệ camera một mắt thì có thể xác định được góc phương và góc tầm của mục tiêu, song không thể nhận biết được khoảng cách từ mục tiêu đến camera, việc sử dụng hệ camera hai mắt nhằm xác định được khoảng cách đó, cùng với việc tính toán có thể xác định được tọa độ mục tiêu trong không gian ba chiều. Việc xác định liên tục tọa độ mục tiêu thì có thể tìm ra được quỹ đạo bay của mục tiêu, để làm được điều đó bài báo đưa ra giải pháp như sau: Dùng thuật toán bám ảnh trên camera thứ nhất để có thể bám bắt liên tục được muc tiêu, đồng thời thông qua bệ quay tầm hướng bám theo mục tiêu để luôn giữ mục tiêu trong khung

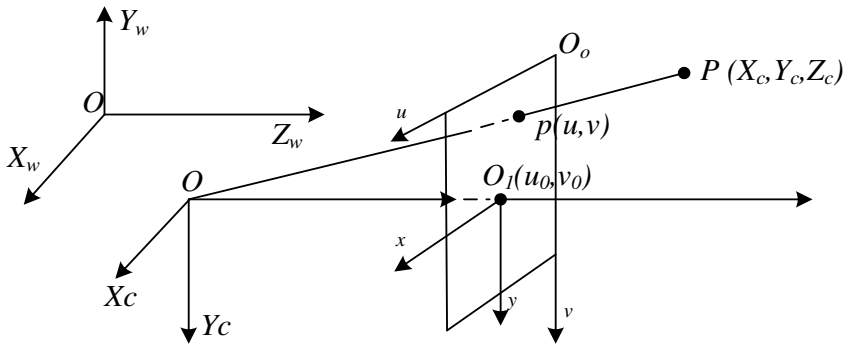
hình. Mục tiêu đã được bám bắt sẽ qua thuật toán so khớp với hình ảnh camera số hai thu nhận được để tìm được vị trí tương ứng tại camera số hai, thông qua việc tính toán độ sai lệch vị trí từ hai camera có thể liên tục xác định được khoảng cách của mục tiêu, từ đó tìm ra quỹ đạo bay của mục tiêu.

2. Phương pháp xác định quỹ đạo bay của mục tiêu bằng camera hai mắt

2.1. Hiệu chỉnh hệ camera hai mắt dựa trên phương pháp hiệu chuẩn của Z. Zhang

Bước đầu tiên để hệ thống thị giác máy tính nhận biết thế giới bên ngoài là thu được hình ảnh, có thể thu được màu sắc, hình dạng và vị trí của các vật thể trong môi trường ba chiều. Vị trí của mỗi pixel trên ảnh có mối quan hệ ánh xạ với từng điểm trên đối tượng trong không gian. Theo mô hình hình học của camera, có thể thu được mối quan hệ ánh xạ từ các điểm trong môi trường đến các điểm trên ảnh. Hiệu chỉnh camera là việc tìm kiếm các tham số của mô hình hình học hình ảnh của camera. Thông số camera còn bao gồm các thông số liên quan đến việc chụp ảnh (gọi là thông số bên trong) và vị trí, hướng của nó trên các hệ tọa độ nhất định (gọi là thông số bên ngoài) [ ]. Với mô hình đơn giản hóa thì hệ tọa độ tham chiếu và mô hình lỗ kim là những công cụ phổ biến để thiết lập mô hình hình ảnh. Hệ tọa độ tham chiếu để mô tả ánh xạ của các vật thể trong cảnh tới các hình ảnh tương ứng, Có 3 hệ tọa độ trong hệ thống thị giác máy như Hình 1., bao gồm: Hệ tọa độ pixel ảnh (uOov), hệ tọa độ camera (XcOYc), hệ tọa độ địa cầu (OXwYwZw).

Mô hình chụp ảnh qua lỗ kim (pinhole) là phổ biến nhất trong số các mô hình, hình ảnh vì nó đơn giản và trực quan. Mô hình lỗ kim thực chất chỉ có mối quan hệ tuyến tính giữa vật thể chiếu lên CCD và không có các thông số biến dạng của camera. Trong mô hình lỗ kim của mô hình hình ảnh thị giác máy tính, các tham số camera được mô tả lần lượt bằng ma trận tham số bên trong và bên ngoài.



Hình 1. Hệ tọa độ tham chiếu

Trên Hình 1. *(u,v)* là tọa độ điểm P trong hệ tọa độ ảnh. Tâm quang học là (u_0, v_0), kích thước vật lý của mỗi pixel theo hướng trục u và trục v là dx và dy, và mối quan hệ biến đổi giữa hệ tọa độ pixel ảnh và hệ tọa độ vật lý ảnh là:

$$u = \frac{x}{dx} + u_0,\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \tag{1}$$

Dạng ma trận của nó có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

Mối quan hệ giữa hệ tọa độ camera và hệ tọa địa cầu có thể được mô tả bằng ma trận quay R và vectơ tịnh tiến T. Tọa độ của điểm P trong hệ tọa độ địa cầu và hệ tọa độ camera lần lượt là và, khi đó ta có:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \boldsymbol{T} \tag{3}$$

Đối với bất kỳ điểm P nào trong không gian, tọa độ vật lý trên mặt phẳng ảnh có thể được viết là:

$$x = f\frac{X_c}{Y_c}, y = f\frac{X_c}{Y_c} \tag{4}$$

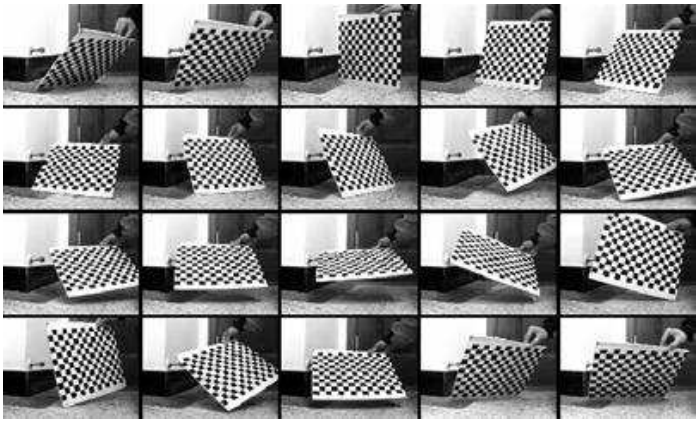
Từ công thức (2), công thức (3) và công thức (4), ta có:

$$\boldsymbol{Z}_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/dx & 0 & u_0 \\ 0 & f/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

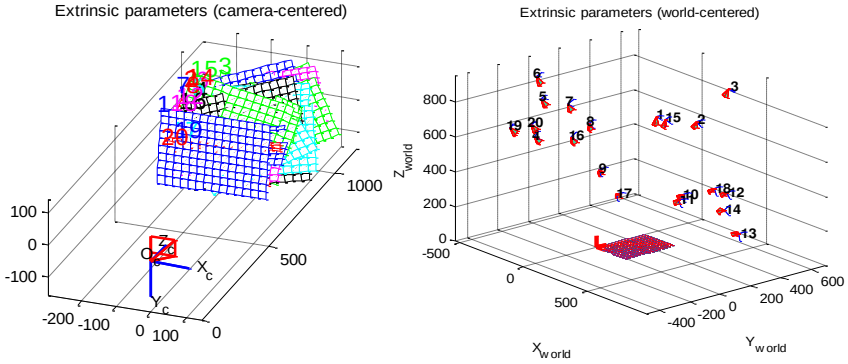
$$= \boldsymbol{K} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{P} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Trong công thức, P là ma trận chiếu, với $f_x = f/dx$; $f_y = f/dy$; các tham số ma trận K được xác định bởi fx, fy, u, v, có liên quan mật thiết đến cấu trúc bên trong và quy trình sản xuất của máy ảnh, được gọi là ma trận tham số bên trong của camera; tham số R, T là vị trí và hướng của camera trong hệ tọa độ địa cầu được gọi là ma trận tham số bên ngoài của camera.

Hiệu chuẩn Z. Zhang là phương pháp hiệu chuẩn phổ biến nhất và có ưu điểm là thực hiện đơn giản, độ chính xác cao và độ ổn định tốt. Phương pháp này sử dụng tấm hiệu chuẩn bàn cờ phẳng, chế tạo đơn giản, giá thành thấp và dễ thực hiện. Trong phương pháp hiệu chỉnh của Zhang, người ta giả định rằng mục tiêu nằm trên mặt phẳng của hệ tọa độ địa cầu. Mỗi khi một hình ảnh được di chuyển, một hình ảnh sẽ được tạo ra và được ghi lại để có thể thu được kết quả hiệu chuẩn sau khi tính toán. Bảng hiệu chuẩn thực tế được làm bằng cách in các ô vuông 15x11 lên một tờ giấy trắng rồi gắn chúng vào một mặt phẳng cứng. Để việc thu thập ảnh mục tiêu được thuận tiện hơn, bài viết này sử dụng một chương trình bằng ngôn ngữ C++ thu thập dữ liệu để thực hiện việc thu thập dữ liệu hình ảnh. Trong quá trình lấy dữ liệu ảnh để hiệu chỉnh, cần di chuyển mục tiêu hoặc máy ảnh để chụp 20 ảnh bàn cờ ở các vị trí khác nhau. Sau khi thu thập hình ảnh bàn cờ, sử dụng công cụ CameraCalibration-ToolboxforMatlab để thực hiện nhập trong MatlaR2012b.



Hình 2. Ảnh bàn cờ sau khi được thu thập



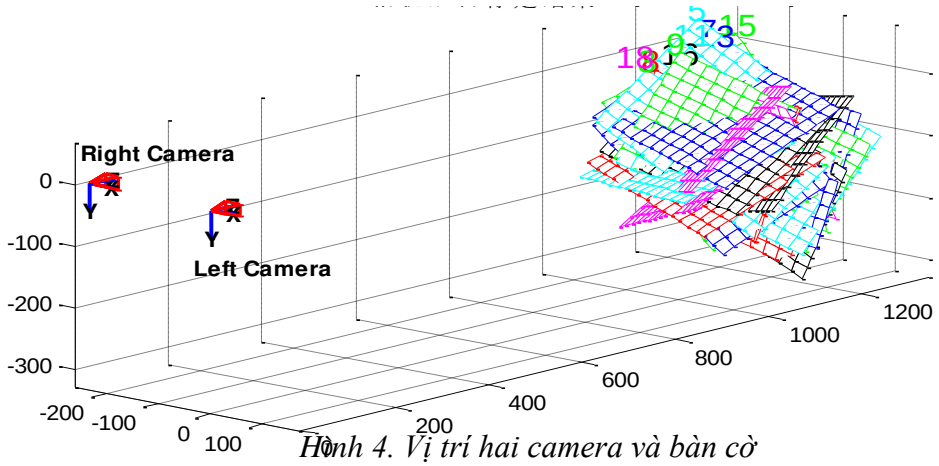
Hình 3. Vị trí của bàn cờ so với camera

Camera bên phải được hiệu chỉnh tương tự Bảng 1. thể hiện kết quả thông số bên trong của việc hiệu chỉnh camera bên trái M và bên phải M_1:

Bảng 1. Giá trị tham số camera thu được sau quá trình hiệu chuẩn

Thông số camera	Giá trị hiệu chuẩn
$\boldsymbol{M}$ (đơn vị pixel)	$\begin{pmatrix} 1059.85 & 0 & 351.11 \\ 0 & 1075.21 & 143.48 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$\boldsymbol{k}$	$\begin{pmatrix} -0.2974 & -0.9010 \end{pmatrix}^T$
$\boldsymbol{p}$	$\begin{pmatrix} -0.0066 & 0.0130 \end{pmatrix}^T$
$\boldsymbol{M}_1$ (đơn vị pixel)	$\begin{pmatrix} 1040.41 & 0 & 196.22 \\ 0 & 1066.36 & 123.97 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$\boldsymbol{k}'$	$\begin{pmatrix} -0.4546 & 1.1600 \end{pmatrix}^T$
$\boldsymbol{p}'$	$\begin{pmatrix} -0.0054 & -0.0091 \end{pmatrix}^T$

Sau khi hoàn thành công việc hiệu chỉnh của camera mục tiêu bên trái và bên phải, các thông số bên trong của từng camera sẽ được lấy và sau đó có thể thu được các thông số mối quan hệ vị trí tương đối giữa hai camera bằng cách thực hiện hiệu chỉnh hệ hai camera.



Hình 4. Vị trí hai camera và bàn cờ

Kết quả hiệu chuẩn:

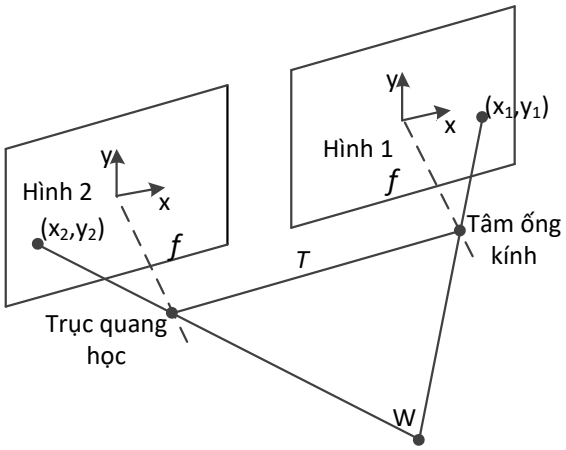
Vectơ quay (đơn vị là rad): $O_m = \begin{bmatrix} 0.02941 & -0.07402 & 0.00529 \end{bmatrix}$

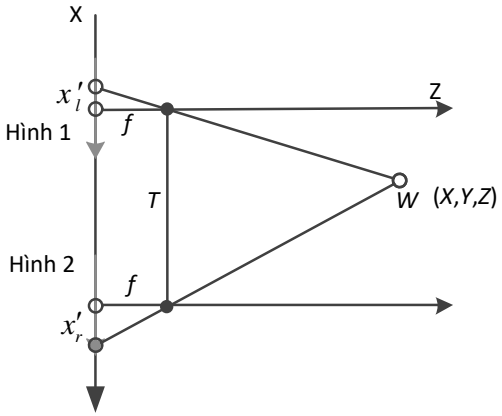
Vectơ dịch (đơn vị là mm): $T = \begin{bmatrix} 248.45971 & 1.20987 & -1.45208 \end{bmatrix}$

2.2. Đo khoảng cách bằng camera đôi

Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ máy tính, thị giác máy tính đã được sử dụng rộng rãi trong những năm gần đây. Đồng thời, hệ thống máy tính ngày càng có yêu cầu cao hơn về độ chính xác và tốc độ tính toán của phần thị giác. Do trong quá trình sản xuất camera sẽ có sự sai xót nhất định khi lắp ráp ống kính, tấm cảm biến, vì vậy hiệu chỉnh camera đóng một vai trò quan trọng trong toàn bộ hệ thống thị giác máy tính. Độ chính xác hiệu chuẩn và tốc độ hiệu chuẩn ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và tốc độ tính toán tọa độ mục tiêu. Phần này giới thiệu phương pháp hiệu chỉnh máy ảnh hai mắt và nguyên lý đo khoảng cách hai mắt dựa trên phương pháp hiệu chuẩn của Z. Zhang và tiến hành nghiên cứu thử nghiệm trong hệ thống thị giác hai mắt. Trên cơ sở đó, để giải quyết các vấn đề về tốc độ khớp chậm và độ chính xác không đủ của các thuật toán khớp hiện có, nghiên cứu đề xuất phương pháp khớp mục tiêu dựa trên các ràng buộc phạm vi chuyển động, có thể cải thiện hiệu quả tốc độ và độ chính xác của độ chính xác khớp.

Đo khoảng cách bằng hệ camera đôi là dùng hai camera đặt song song với nhau để cùng chụp ảnh mục tiêu. *Hình 5.* cho thấy sơ đồ chụp ảnh bằng camera hai mắt. Tiêu cự của cả hai thấu kính là f và đường cơ sở T là khoảng cách giữa hai camera. Đây là chế độ hai mắt được sử dụng phổ biến nhất. Hai camera chụp điểm *W* cùng một lúc. Vì vị trí của hai camera khác nhau nên vị trí của điểm *W* được chụp trên ảnh cũng khác nhau, tọa độ của điểm *W* và sự khác biệt về vị trí giữa hai điểm này tạo ra thị sai. Trong trường hợp này, phạm vi hai mắt có thể được phân tích với sự trợ giúp của *Hình 6*. Trong số đó, hệ tọa độ camera thứ nhất được sử dụng làm hệ tọa độ địa cầu và khoảng cách giữa hai camera biểu thị bằng T.





Hình 5. Sơ đồ chụp ảnh hai mắt *Hình 6. Thị sai trong chụp ảnh hai mắt song song*

Từ mối quan hệ hình học thể hiện trên Hình 6. ta có được:

$$\frac{x'_l}{f} = \frac{X + T/2}{Z}; \qquad \frac{x'_r}{Z} = \frac{X - T/2}{Z}; \qquad \frac{y'_l}{f} = \frac{y'_r}{f} = \frac{Y}{Z} \tag{7}$$

Gọi d là thị sai thì tọa độ của vật trong không gian ba chiều là:

$$X = T\frac{x'_l + x'_r}{2d}; \quad Y = T\frac{y'_l + y'_r}{2d}; \quad Z = T\frac{f}{d} \tag{8}$$

Công thức trên cho thấy mối liên hệ trực tiếp giữa khoảng cách Z của vật tới máy ảnh với thị sai d. Giá trị của thị sai có liên quan đến khoảng cách Z nên thông tin vị trí tọa độ của vật thể trong không gian được xác định bởi thị sai d. Cần lưu ý khi sử dụng công thức này là phải đảm bảo mục tiêu cần đo nằm trong tầm quan sát chung của cả 2 camera.

Có thể thấy từ công thức (8) thấy được vị trí Z có liên quan chặt chẽ với thị sai d. Nếu thị sai d không chính xác (chẳng hạn như không tìm thấy điểm tương ứng chính xác) sẽ dẫn đến sai số về khoảng cách Z thực tế. Giả sử xl tạo ra lỗi e1 và giả sử xr tạo ra lỗi e2 thì có, do đó lỗi khoảng cách có thể được viết dưới dạng sau:

$$d_e = (x'_l + e_1) - (x'_r - e_2) = (x'_l - x'_r) - (e_2 - e_1) = d - e \tag{9}$$

Trong đó: $e = |e_2 - e_1|$

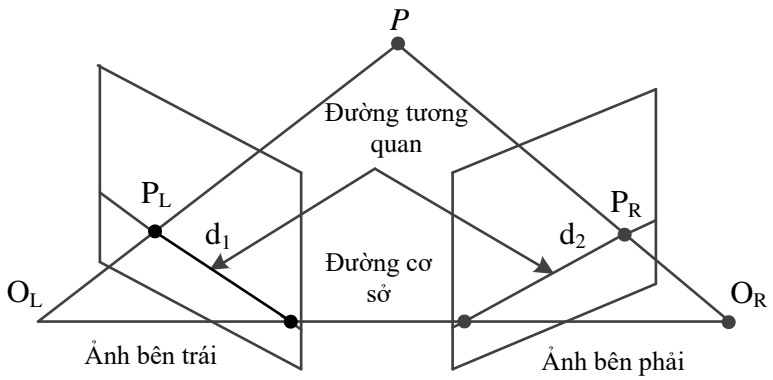
Giả sử Z1e là kết quả đo khoảng cách hai mắt và ΔZ là sai số đo khoảng cách, khi đó:

$$\Delta Z = Z_{1e} - Z = f\frac{T}{d_e} - f\frac{T}{d} = \frac{fTe}{d(d-e)} \tag{10}$$

Thay công thức (8) vào trên, ta được:

$$\Delta Z = \frac{eZ^2}{fT - eZ} \tag{11}$$

Có thể thấy từ công thức (11) rằng độ chính xác của việc đo khoảng cách có liên quan đến độ dài tiêu cự của camera, đường cơ sở T giữa hai camera.



Hình 7. Ràng buộc đường cực hình ảnh

Ràng buộc đường cực hình ảnh là ánh xạ của cùng một điểm P trên hai ảnh. Biết rằng điểm PL được ánh xạ từ điểm P sang mặt phẳng ảnh bên trái thì điểm Pr được ánh xạ từ điểm P sang mặt phẳng ảnh bên phải phải nằm trên đường cực hình ảnh tương ứng của điểm PL. Trong khớp ảnh hệ hai camera, sử dụng các ràng buộc đường cực hình ảnh và tìm các điểm khớp trên các đường cực hình ảnh tương ứng không chỉ có thể cải thiện độ chính xác khớp ảnh mà còn làm giảm độ lớn vùng tìm điểm khớp ảnh. Sơ đồ các ràng buộc đường cực khớp ảnh được thể hiện trong *Hình 7*.

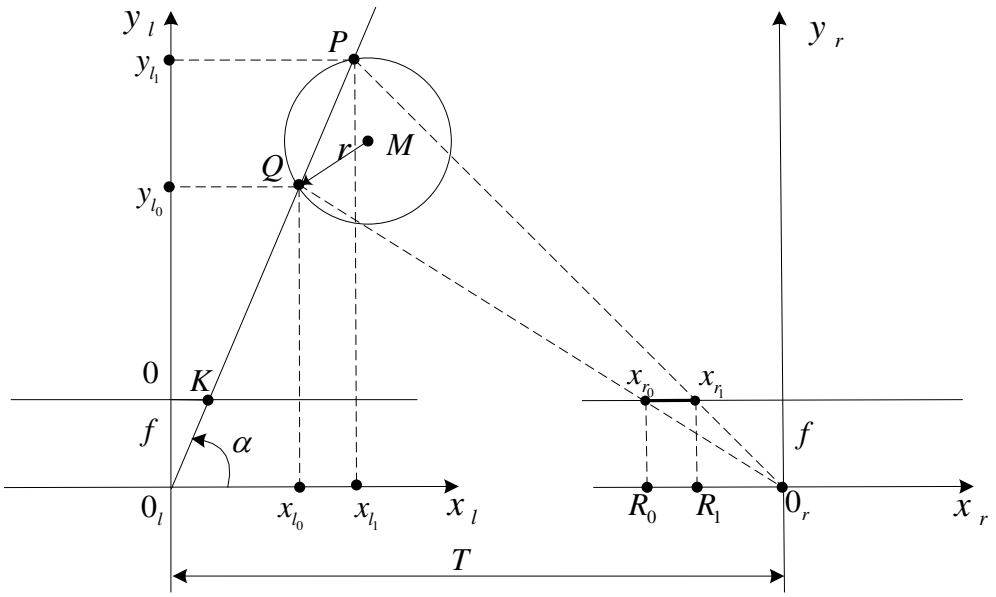
Thiết kế phương pháp so khớp mục tiêu dựa trên giới hạn phạm vi di chuyển của mục tiêu trong không gian:

Mặc dù phương pháp ràng buộc epipole của hình ảnh hai mắt có thể cải thiện tốc độ và độ chính xác khớp, nhưng phạm vi tìm điểm khớp trên các đường epi cực là lớn, điều này không có lợi cho việc cải thiện hơn nữa tốc độ và độ chính xác khớp. Để đáp ứng nhu cầu đối sánh âm thanh nổi hình ảnh hiệu suất cao hơn, bài viết này phân tích sâu các đặc điểm ánh xạ của mục tiêu đang chuyển động và đề xuất phương pháp tìm kiếm mục tiêu với các hạn chế về phạm vi chuyển động, giúp cải thiện hiệu quả độ chính xác và tốc độ của đối sánh hình ảnh.

Giả sử camera mắt trái được sử dụng để theo dõi mục tiêu theo thời gian thực thì vị trí của mục tiêu tại thời điểm tiếp theo sẽ ở gần vị trí hiện tại. Do đó, bằng cách sử dụng vị trí và tốc độ hiện tại của mục tiêu, chúng ta có thể dự đoán khu vực mà nó có thể xuất hiện vào thời điểm tiếp theo. Trong thị giác hai mắt, hình ảnh của hai camera có mối quan hệ hình học. Mối quan hệ hình học này có thể được sử dụng để tính toán mối quan hệ lưỡng cực hình ảnh của hai camera trong ảnh tĩnh. Đối với hình ảnh mục tiêu động, phạm vi chuyển động của mục tiêu có thể được dự đoán từ tốc độ và gia tốc của mục tiêu. Sau đó, dựa trên phạm vi chuyển động, có thể dự đoán được khu vực cục bộ nơi mục tiêu có thể xuất hiện trong hình ảnh mặt phẳng mắt phải.

Hình 8 là sơ đồ của phương pháp tìm kiếm mục tiêu dựa trên các ràng buộc phạm vi di chuyển được đề xuất trong bài viết này, giả sử rằng vị trí trước đó của mục tiêu và ánh xạ hiện tại của mục tiêu tới điểm K trên mặt phẳng ảnh mắt trái đã biết thì mục tiêu. phải nằm trên tia. Giả sử khoảng cách tối đa mà mục tiêu di chuyển từ gốc là r thì mục tiêu chỉ có thể xuất hiện giữa các điểm Q và P trên tia. Có thể thấy trên hình ảnh mắt phải, mục tiêu chỉ có thể xuất hiện giữa các điểm tương ứng trên đường epipole. Camera mắt phải chỉ tìm kiếm mục tiêu

giữa các điểm, điều này có thể giảm đáng kể thời gian tính toán đối sánh mục tiêu và cải thiện đáng kể độ chính xác của đối sánh.



Hình 8. Hình học biểu diễn ràng buộc phạm vị di chuyển trong không gian

Các bước tính toán tham số và công thức của phương pháp ràng buộc phạm vi di chuyển trong không gian như sau: Đầu tiên, tìm tọa độ của điểm P và điểm Q. Như trên Hình 8, P và Q là giao điểm của đường chiếu O_lK và đường tròn với M là gốc và r là bán kính. Biết góc giữa O_l và đường thẳng nằm ngang là α thì công thức mô tả của Ol có thể viết là:

$$y_l = x_l tg(\alpha) \tag{12}$$

Công thức mô tả đường tròn có gốc M và bán kính r là:

$$\left(x_l - x_0\right)^2 + \left(y_l - y_0\right)^2 = r^2 \tag{13}$$

Vì mục tiêu ở phía trước camera nên yl, thay phương trình (3.35) vào phương trình (3.36) ta có được:

$$\left(x_l - x_0\right)^2 + \left(x_l tg\alpha - y_0\right)^2 = r^2 \tag{14}$$

$$\left(1+tg^2\alpha\right)x_l^2 + 2\left(x_0 - y_0 tg(\alpha)\right)x_l + (x_0^2 + y_0^2 - r^2) = 0 \tag{15}$$

Giải phương trình (3.38), ta được xl:

$$\begin{cases} x_{l_{0,1}} = \dfrac{\left(y_0 tg(\alpha) - x_0\right) \pm \sqrt{\left(x_0 - y_0 tg(\alpha)\right)^2 - \left(1+tg^2(\alpha)\right)\left(x_0^2 + y_0^2 - r^2\right)}}{1+tg^2(\alpha)} \\ y_{l_{0,1}} = x_{l_{0,1}} tg(\alpha) \end{cases} \tag{16}$$

Theo Hình 3.11 có thể rút ra quan hệ hình học tương ứng:

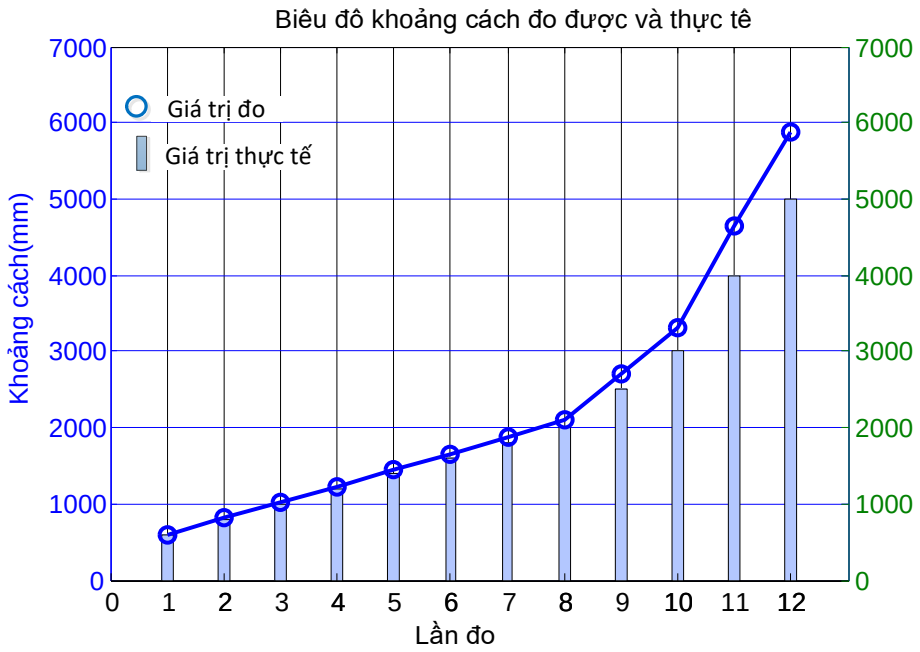
$$x_{r_0} = \frac{f(x_{l_0} - T)}{y_{l_0}} \; ; \qquad x_{r_1} = \frac{f(x_{l_1} - T)}{y_{l_1}} \tag{17}$$

3. Thí nghiệm đo khoảng cách hai mắt

Để nghiên cứu phương pháp đo khoảng cách bằng camera hai mắt, đặt các mục tiêu được đặt tại 12 vị trí ở những khoảng cách khác nhau. Đo khoảng cách thực tế giữa mục tiêu, sau đó thực hiện đo khoảng cách thông qua hệ camera hai mắt. Kết quả đo khoảng cách thực tế và đo khoảng cách bằng hệ camera hai mắt được liệt kê trong *Bảng 2*. và *Hình 9*.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm đo khoảng cách mục tiêu

STT	Vị trí mục tiêu tại ảnh trái	Vị trí mục tiêu tại ảnh phải	Kết quả đo (mm)	Khoảng cách thực tế (mm)	Sai s
1	(405,380)	(72,379)	603	600	0.50%
2	(387,317)	(154,314)	809	800	1.13%
3	(370,265)	(197,264)	1013	1000	1.30%
4	(357,253)	(226,251)	1216	1200	1.33%
5	(343,234)	(242,230)	1438	1400	2.71%
6	(335,218)	(256,217)	1656	1600	3.50%
7	(339,207)	(227,205)	1885	1800	4.72%
8	(337,198)	(288,196)	2108	2000	5.40%
9	(333,183)	(309,180)	2706	2500	8.24%
10	(336,176)	(328,175)	3307	3000	10.23%
11	(354,148)	(367,146)	4650	4000	16.25%
12	(347,144)	(372,143)	5890	5000	17.80%

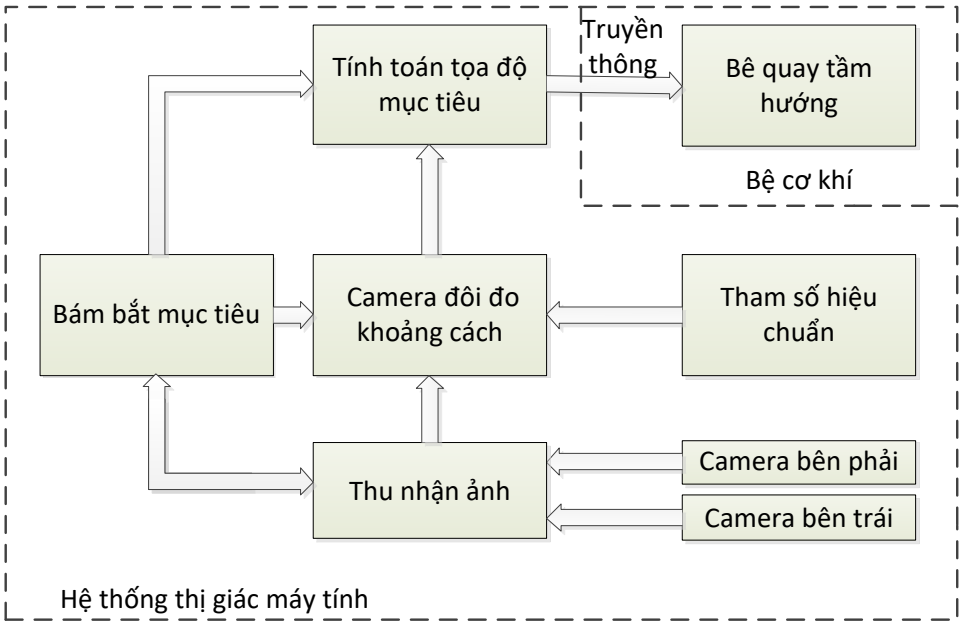


Hình 9. Biểu đồ thể hiện giá trị đo và giá trị thực tế

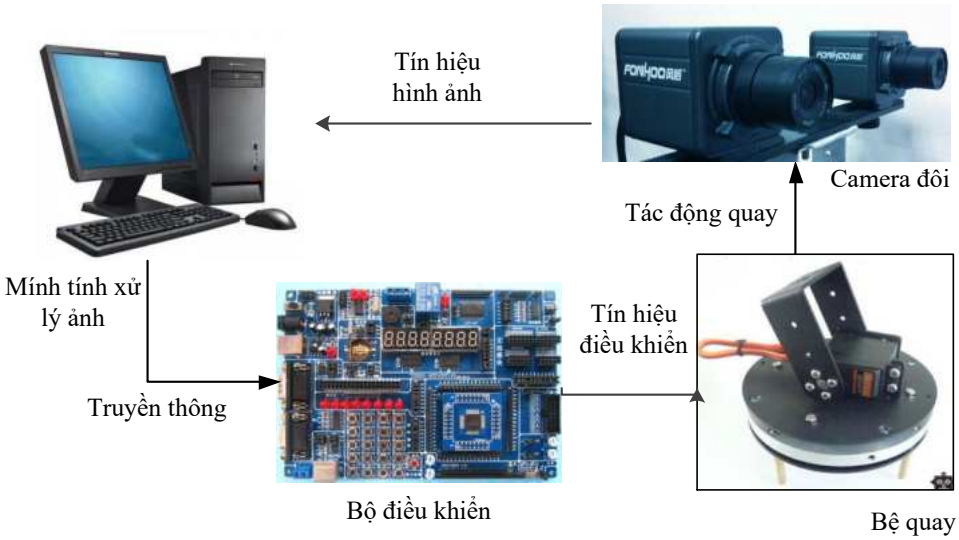
Thiết kế và triển khai hệ thống theo dõi servo trực quan mục tiêu chuyển động ba chiều

Hệ thống theo dõi servo trực quan của mục tiêu chuyển động ba chiều được thiết kế trong bài viết này chủ yếu thực hiện việc theo dõi và định vị các mục tiêu chuyển động ba chiều. Khung tổng thể của hệ thống thử nghiệm được thể hiện trên *Hình 10*, bao gồm phần điều khiển cơ học và phần xử lý hình ảnh. Chương này sẽ giới thiệu thiết kế của giao diện

người-máy và bộ điều khiển servo phía trên, cũng như thiết kế các mô-đun truyền thông máy tính và truyền động bánh lái phía dưới.



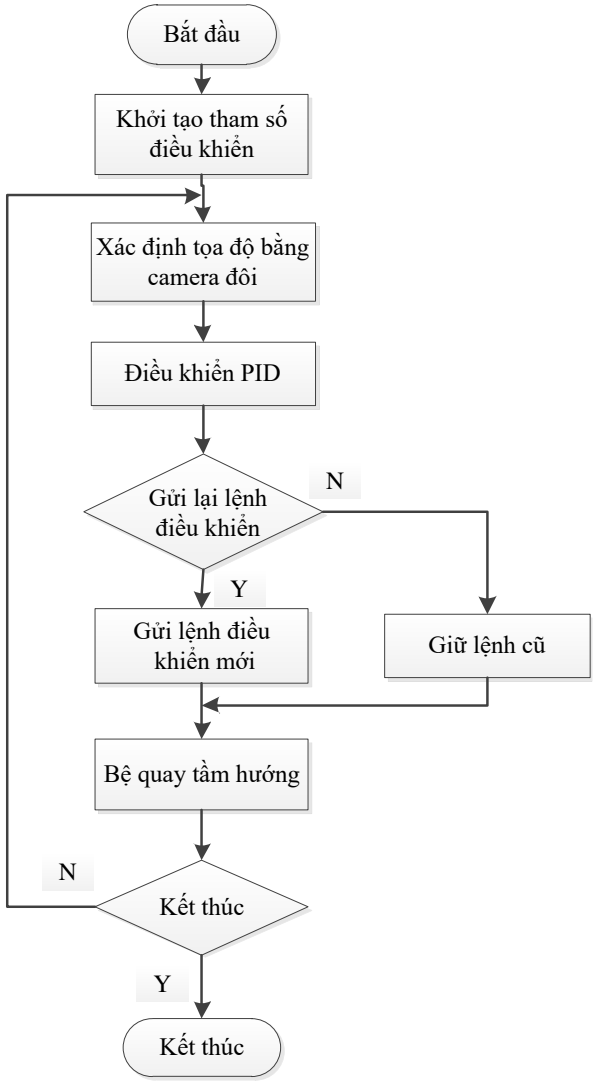
Hình 10. Sơ đồ khối hệ thống xác định quỹ đạo bay mục tiêu



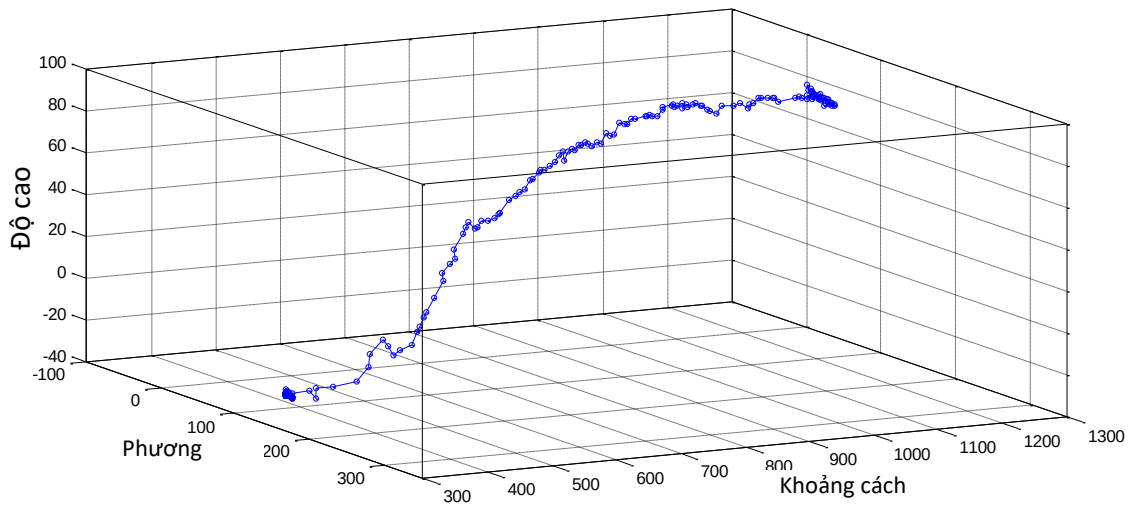
Hình 11. Sơ đồ phần cứng hệ thống xác định quỹ đạo bay mục tiêu

Thiết kế bộ điều khiển servo trực quan

Bộ điều khiển servo trực quan chủ yếu bao gồm bộ điều khiển PID máy tính phía trên, trình điều khiển xoay ngang máy tính phía dưới và cảm biến hình ảnh. Đầu tiên, thiết bị được khởi tạo. Máy tính chủ xác nhận vị trí và tốc độ của mục tiêu hiện tại bằng cách xử lý và phân tích hình ảnh do camera gửi, sau đó gửi hướng dẫn lái xe đến máy tính phía dưới. Máy tính phụ nhận các hướng dẫn và chuyển đổi chúng thành tín hiệu PWM để điều khiển xoay/nghiêng. Lưu đồ thuật toán điều khiển hệ thống thị giác máy tính được thể hiện trong *Hình 12*.



Hình 12. Lưu đồ thuật toán hệ thống xác định quỹ đạo bay mục tiêu



Hình 13. Quỹ đạo bay của mục tiêu xác định bởi hệ thống

4. Kết luận

Nội dung nghiên cứu đã kết hợp phương pháp đo khoảng cách bằng camera hai mắt và điều khiển bệ quay bằng thuật toán PID để thiết kế hệ thống điều khiển thị giác máy tính. Hệ thống thực hiện theo dõi mục tiêu di động và phản hồi trạng thái chuyển động, quỹ đạo bay của mục tiêu thông qua việc thu thập hình ảnh và điều khiển bệ quay camera. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống đáp ứng được yêu cầu theo dõi quỹ đạo mục tiêu trong thời gian thực.

Tài liệu tham khảo

[1] Trương Xuân Tùng, Hệ thống thị giác máy tính.Học viện Kỹ thuật quân sự, 2022.

[2] Haritaoglu I. , Harwood D. , Davis L.. Real-Time Surveillance of People and Their Activities[J]. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8) :809-830. **DOI:** 10.1109/34.868683

[3] Zhang Z. A Flexible new Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Translations on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(11):1330-1334. **DOI:** 10.1109/34.888718

[4] Betke M., Haritaoglu E., Davis L. S. Real-Time MultipleVehicle Detection and Tracking from a Moving Vehicle[J]. Machine Vision and Applications, 2000, 12(2): 69-83.

[5] Bui T. D. and Nguyen L. T. Recognizing Postures in Vietnamese sign Language with MEMS Accelerometers[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5):707-712.

[6] Doucet A, Godsill S, Andrieu C. On Sequential Monte Carlo Sampling Methods for Bayesian Filtering[J]. Statistics and Computing, 2000, 10(3): 197-203.

[7] Mark Fashing，Carlo Tomasi. Mean Shift is a Bound Optimization[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(3): 471-474.

Research on a method for real-time determination of target flight trajectory using a stereo camera

Abstract: *The paper proposes a method utilizing a stereo camera to determine the target flight trajectory in real time. To enhance the system's accuracy and processing speed, we propose combining the Mean-Shift algorithm with a particle filter for target tracking in the first camera, followed by grayscale image matching to identify the target in the second camera. This approach is integrated with a rotating pan-tilt platform to keep the target within the observation range, thereby enabling continuous tracking and trajectory determination with minimal processing latency.*

Keywords: Stereo camera; flight trajectory; target tracking; Mean-Shift; particle filter.

Nghiên cứu, xây dựng thuật toán điều khiển của thiết bị kiểm tra và tìm hỏng cho hệ thống khởi động điện trên xe khắc phục vật cản IMR-2M

Trịnh Văn Kháng[1], Trần Văn Tuyên[1], Lê Trọng Nghĩa[2]

[1]*Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển;* [2]*Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

Email: trinhkhang751999@gmail.com; Tel:0968450705

Tóm tắt: Hệ thống khởi động điện tự động là một thành phần quan trọng trên xe khắc phục vật cản IMR-2M, đóng vai trò là một trong hai phương pháp khởi động động cơ đốt trong trên xe. Do hệ thống có cấu tạo phức tạp và tài liệu hướng dẫn chưa đầy đủ, việc chẩn đoán và phát hiện hỏng hóc của hệ thống này gặp nhiều khó khăn. Vì vậy, bài báo này tập trung vào nghiên cứu, xây dựng thuật toán điều khiển cho thiết bị kiểm tra và phát hiện hỏng hóc trong hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M. Thuật toán kiểm tra và chẩn đoán hỏng hóc dựa trên phân tích tín hiệu điện áp từ các cảm biến và rơ-le trong hệ thống. Nếu có sai lệch vượt quá ngưỡng cho phép, hệ thống sẽ xác định bộ phận bị lỗi, từ đó đưa ra cảnh báo hoặc giải pháp khắc phục kịp thời.

Từ khóa: *Hệ thống khởi động điện tự động; thuật toán điều khiểu; xe khắc phục vật cản.*

1. Đặt vấn đề

Trên thế giới, có nhiều nghiên cứu về các thuật toán kiểm tra phát hiện hỏng hóc các hệ thống điện. Trong đó các phương pháp kiểm tra và chẩn đoán hỏng hóc hệ thống điện trên ô tô hiện nay chủ yếu dựa trên việc đo lường và phân tích các thông số điện như điện áp, dòng điện và tín hiệu điều khiển. Một số thiết bị chuyên dụng đã được phát triển để hỗ trợ việc kiểm tra hệ thống khởi động, giúp phát hiện sớm các dấu hiệu bất thường nhằm ngăn chặn sự cố nghiêm trọng. Trong lĩnh vực chẩn đoán hỏng hóc thiết bị điện, nhiều phương pháp đã được đề xuất, bao gồm phân tích rung động, phân tích phổ tần số, và ứng dụng thuật toán học máy. Đặc biệt, phân tích tín hiệu điện kết hợp với xử lý tín hiệu thời gian thực đang được ứng dụng rộng rãi để phát hiện bất thường trong hệ thống điện. Những phương pháp này có thể giúp xác định nguyên nhân hỏng hóc thông qua phân tích các đặc trưng tín hiệu trong quá trình khởi động.

Xuất phát từ thực tế đó, bài báo này tập trung vào xây dựng thuật toán điều khiển cho thiết bị kiểm tra và phát hiện hỏng hóc hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M. Thuật toán đề xuất sử dụng phân tích tín hiệu điện áp để phát hiện các bất thường, từ đó đưa ra cảnh báo hoặc giải pháp khắc phục kịp thời. Đồng thời xây dựng phần mềm kiểm tra phát hiện hỏng hóc bằng phần mềm PyCharm Community Edition và Arduino IDE. Việc áp dụng thuật toán và xây dựng phần mềm giúp tăng độ chính xác trong chẩn đoán lỗi, góp phần nâng cao hiệu quả bảo trì và vận hành phương tiện.

2. Tổng quan về hệ thống khởi động điện trên xe khắc phục vật cản IMR-2M

2.1. Cấu tạo

Các phần tử chính trong hệ thống khởi động điện trên xe gồm có [1]:

- Nguồn điện khởi động (ắc quy khởi động);

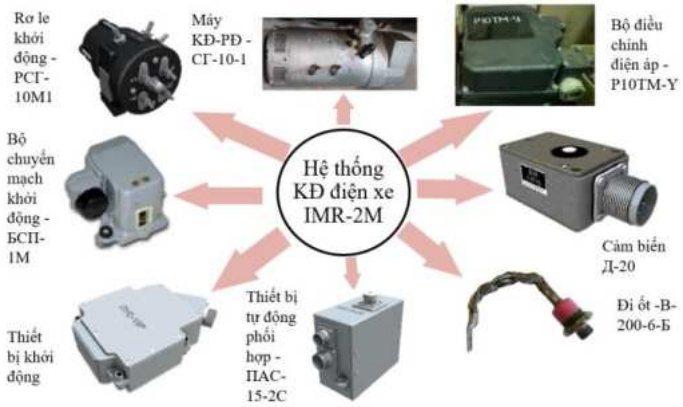
- Bộ máy khởi động - phát điện СГ-10-1 (làm việc ở chế độ động cơ);

- Bộ lọc nhiễu Ф10 hoặc Ф5; Rơ le khởi động РСГ-10М1;

- Bộ chuyển mạch khởi động БСП-1М; Thiết bị khởi động ПУС-15Р;

- Thiết bị tự động đồng bộ (phối hợp) ПАС-15-2С; Đi ốt В-200-6-Б;

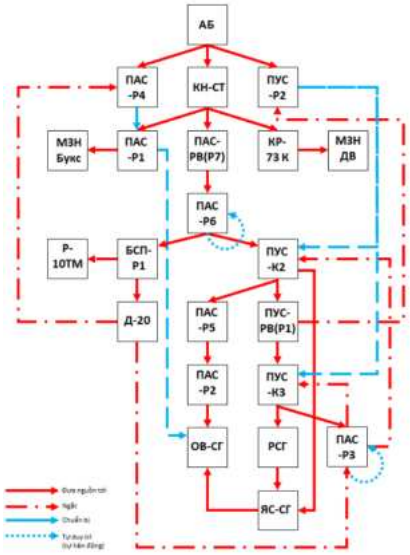
- Cảm biến loại Д-20.



Hình 1. Cấu tạo hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M

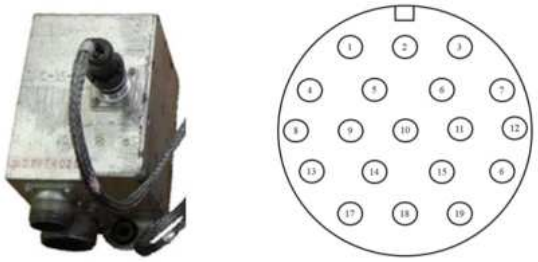
2.2. Hoạt động của các phần từ năng trong hệ thống khởi động điện

Để xem xét sự làm việc của các phần tử trong hệ thống khởi động trong quá trình khởi động động cơ hãy quan sát sơ đồ logic thứ tự thực hiện các chức năng trong hệ thống khởi động điện tự động trên xe IMR-2M được thể hiện trên Hình 2 [2, 3].



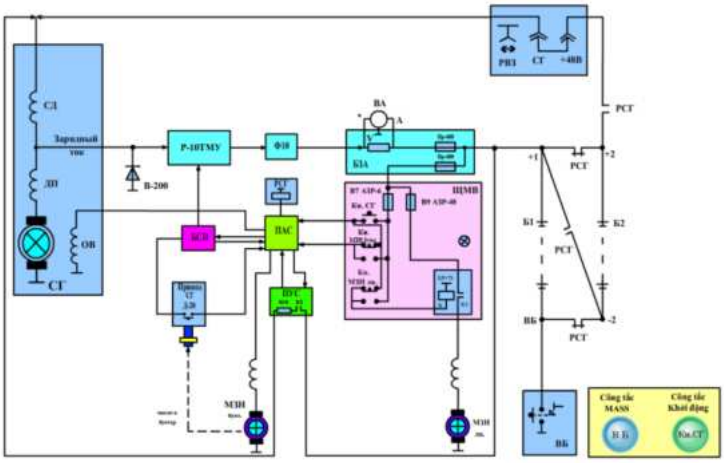
Hình 2. Sơ đồ thứ tự thực hiện các chức năng trong hệ thống khởi động
(khóa mát ВБ ở trong trạng thái đóng nguồn)

Nhìn trên sơ đồ cho thấy có tất cả 22 phần tử cơ bản tham gia vào quá trình khởi động. Trên các phần tử có các mũi tên chỉ đi ra và đi vào và trên thực tế chính là biểu thị tín hiệu điều khiển vào – ra của các phần tử đó và đo được dưới dạng điện áp một chiều có giá trị tương đương bằng giá trị nguồn ắc quy cung cho hệ thống khởi động. Do vậy, bằng tín hiệu điện áp vào – ra này có thể đánh giá sự làm việc bình thường hay không bình thường của từng phần tử, bộ phận, thiết bị nói riêng và toàn bộ hệ thống khởi động nói chung. Chính vì điều này mà nhà chế tạo để đưa ra các tín hiệu điện áp điều khiển vào – ra của các phần tử trên sơ đồ Hình 2 ra khớp nối Ш3 trên vỏ hộp thiết bị tự động đồng bộ ПАС-15-2С (Hình 3) để phục vụ cho công việc kiểm tra, xác định hỏng hóc của hệ thống khởi động điện

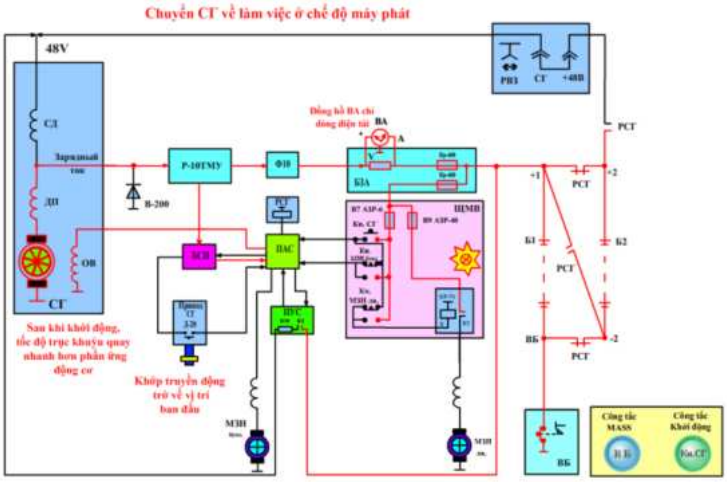


Hình 3. Khớp nối Ш3 trên ПАС-15-2С

Để hiểu rõ hơn về hoạt động của hệ thống khởi động điện trên xe khắc phục vật cản và tối ưu hóa quá trình tìm kiếm, khắc phục hỏng hóc, việc mô phỏng hoạt động hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M là cần thiết. Dưới đây là mô phỏng quá trình hoạt động của hệ thống:



Hình 4. Mô phỏng hoạt động hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M



Hình 5. Tổ hợp máy phát CГ chuyển về làm việc ở chế độ máy phát

Thông qua mô phỏng, chúng ta có thể quan sát một cách trực quan các giai đoạn khởi động, phân tích các tín hiệu điều khiển và hiểu hơn về hoạt động của hệ thống khởi động, từ đó hiểu rõ hơn về hệ thống.

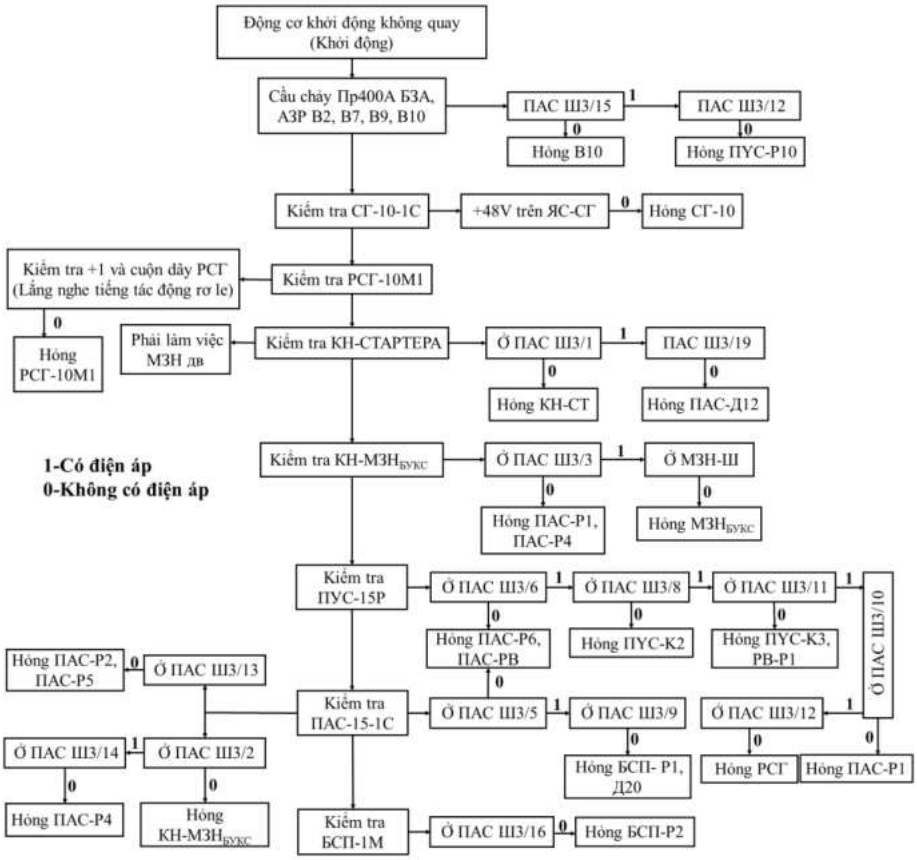
Nhằm đáp ứng yêu cầu thực tế về việc giám sát và chẩn đoán hỏng hóc cho hệ thống khởi động, nội dung tiếp theo sẽ tập trung vào việc xây dựng thuật toán phát hiện hỏng hóc cho hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M. Thuật toán này sẽ dựa trên các tín hiệu đầu ra từ khớp

nối Ш3 của khối thiết bị tự động đồng bộ ПАС-15-2С, cung cấp cơ sở để nhận biết trạng thái của từng phần tử trong hệ thống, qua đó hỗ trợ người vận hành phát hiện và xử lý lỗi nhanh chóng.

3. Xây dựng thuật toán phát hiện hỏng hóc hệ thống khởi động điện

3.1. Xây dựng thuật toán

Thuật toán phát hiện hỏng hóc này được xây dựng nhằm hỗ trợ người vận hành xác định trạng thái hoạt động của hệ thống thông qua tín hiệu lấy ra tại các đầu ra của khớp nối Ш3 trên khối ПАС-15-2С. Mỗi đầu ra tín hiệu của khớp nối Ш3 trên khối ПАС-15-2С sẽ ứng với tín hiệu của một trong những phần tử của hệ thống, thuật toán sẽ xác định và đưa ra các bước kiểm tra, xử lý cần thiết, giúp phát hiện và sửa chữa hỏng hóc nhanh chóng. Thuật toán phát hiện hỏng hóc được xây dựng trên 19 đầu ra của khớp Ш3. Để phát hiện hỏng hóc có thể dùng đồng hồ vạn năng hoặc bóng đèn led để quan sát các tín hiệu đầu ra của Ш3. Thuật toán phát hiện hỏng hóc hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M dựa trên các tín hiệu từ đầu ra của khớp nối Ш3 được thể hiện trên Hình 6 [4].



Hình 6. Thuật toán phát hiện hỏng hóc từ đầu ra của khớp nối Ш3

Thuật toán kiểm tra hoạt động của từng phần tử trong hệ thống khởi động động cơ được tiến hành bằng cách kiểm tra có điện áp tại các điểm định sẵn tại đầu ra của khớp nối ПАС-Ш3, khớp nối này đã được đặt sẵn và có nắp đậy bên hông vỏ hộp "Thiết bị tự động đồng bộ ПАС-15-2С". Theo các tín hiệu tại các đầu ra của ПАС-Ш3, so sánh tín hiệu nhận được với mức điện áp chuẩn 24V. Dựa vào điện áp của các chân tín hiệu theo thời gian trong quá trình khởi động, ta có thể kiểm tra xem hệ thống có hoạt động đúng không bằng cách thiết lập các khoảng điện áp để phát hiện lỗi:

- Tín hiệu đầu ra "0" (0≤ V <18V): Không đủ tiêu chuẩn điện áp tại đầu ra => Phần tử tương ứng hỏng.

- Tín hiệu đầu ra "1" (V ≥ 20V): Đảm bảo tiêu chuẩn điện áp tại đầu ra => Phần tử tương ứng hoạt động bình thường và chuyển tín hiệu điện đến phần tử tiếp theo.

- Tín hiệu yếu (18V≤V<20V): Điện áp yếu tại đầu ra => Rơ-le không đóng hoàn toàn, tiếp điểm kém.

3.2. Lưu đồ thuật toán

Thuật toán này bao gồm 02 thuật toán xử lý tuần tự:

1- Thuật toán xử lý tín hiệu số đo lường tín hiệu vào/ra lấy từ xe IMR-2M;

2- Thuật toán kiểm tra hỏng hóc và các bài test trong khối HMI.



Hình 7. Lưu đồ thuật toán xử lý tín hiệu số



Hình 8. Lưu đồ thuật toán kiểm tra hỏng hóc và các bài test trong khối HMI

Thuật toán xử lý tín hiệu số đo lường tín hiệu vào/ra sẽ thu nhận các tín hiệu từ đầu khớp nối ПАС-Ш3 tiến hành lọc, xử lý các tín hiệu đó, phân tích, đưa ra các kết luận và cảnh cáo. Sau đó các tín hiệu đó sẽ là đầu vào của thuật toán kiểm tra hỏng hóc và các bài test trong khối HMI. Khối HMI đóng vai trò là cầu nối giữa người sử dụng và hệ thống, cho phép người sử dụng tương tác với các thiết bị, hệ thống thông qua giao diện đồ họa hoặc các phương tiện điều khiển khác. Để đảm bảo hiệu quả và độ tin cậy của khối HMI, thuật toán kiểm tra hỏng hóc và các bài test cần được phát triển để kiểm tra tính đúng đắn của các chức năng hệ thống, cũng như đảm bảo rằng dữ liệu được hiển thị và các tác vụ người dùng được xử lý một cách chính xác.

Để thực hiện được các bước kiểm tra và phát hiện hỏng hóc này, chương trình được thiết kế dựa trên thuật toán phát hiện hỏng hóc đã được xây dựng sẽ được trình bày ở phần tiếp theo.

3.3. Nghiên cứu, xây dựng chương trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc theo thuật toán đã xây dựng

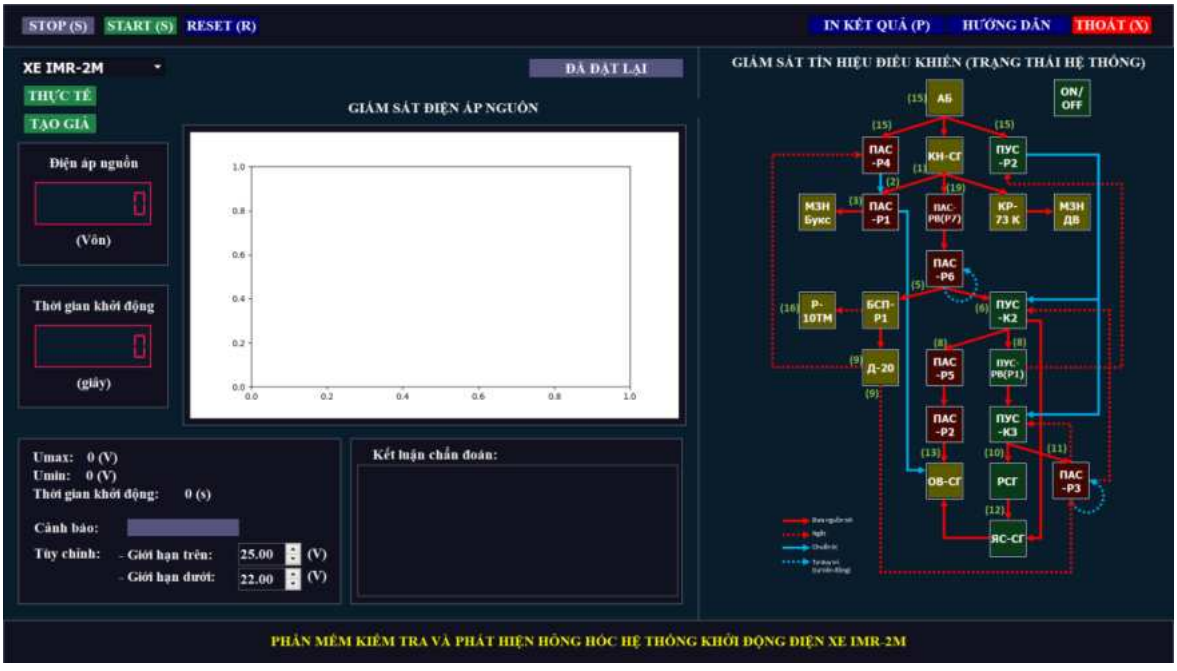
Dựa trên thuật toán phát hiện hỏng hóc đã được xây dựng trong phần trước, việc thiết kế chương trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc cho hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M được tiến hành. Chương trình này sẽ thực hiện nhiệm vụ đo lường và phân tích tín hiệu đầu ra từ khối ПАС-Ш3, từ đó phát hiện và thông báo các lỗi hỏng hóc có thể xảy ra, cùng với đó là giám sát điện áp của ắc quy trong quá trình khởi động. Chương trình được xây dựng dựa trên các thuật toán xử lý các tín hiệu điện áp và tín hiệu số, đảm bảo tính chính xác và hiệu quả trong việc kiểm tra trạng thái của hệ thống [5, 6]:

- **Giao diện người dùng (UI):** Được thiết kế trực quan và dễ dàng sử dụng thông qua công cụ Qt Designer hoặc mã Python trực tiếp, giúp người dùng dễ dàng tương tác với hệ thống;

- **Logic điều khiển**: Phần mềm điều khiển chính được lập trình bằng Python trong môi trường PyCharm Edition, nhờ vào tính dễ sử dụng và khả năng mạnh mẽ của Python trong việc xử lý tín hiệu số. Việc sử dụng các thư viện phong phú của Python giúp chương trình triển khai các thuật toán phức tạp và xây dựng giao diện người dùng một cách hiệu quả.

- **Giao tiếp phần cứng**: Các tín hiệu từ đầu ra khớp nối ПАС-Ш3 được lọc và biến đổi, sau đó đưa đến các chân I/O của board Arduino Mega2560 để xử lý các tín hiệu dựa trên thuật toán phát hiện hỏng hóc đã xây dựng, từ đó đưa ra các kết luận hỏng hóc qua truyền thông nối tiếp như UART, I2C và SPI để hiển thị các kết luận lên giao diện chương trình.

Giao diện của chương trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc được thiết kế như sau:

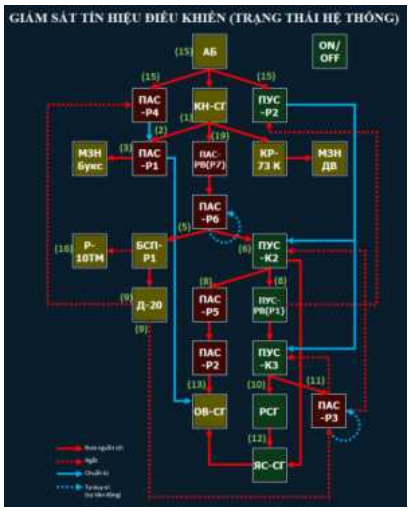


Hình 9. Giao diện chương trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc

Giao diện chương trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc hệ thống khởi động điện bao gồm phần 2 cơ bản như sau:

1 – Các tín hiệu đèn báo hiệu các khối của hệ thống khởi động điện hoạt động bình thường hay đang bị hỏng hóc giúp quan sát trực quan hơn được thể hiện trên Hình 10.

2 – Giám sát điện áp nguồn của hệ thống, các giới hạn điện áp đặt vào để giám sát điện áp nguồn. Cùng với đó là đo thời gian khởi động của hệ thống và hiển thị kết quả chuẩn đoán hỏng hóc thể hiện trên Hình 11.



Hình 10. Tín hiệu đèn báo trạng thái hoạt động

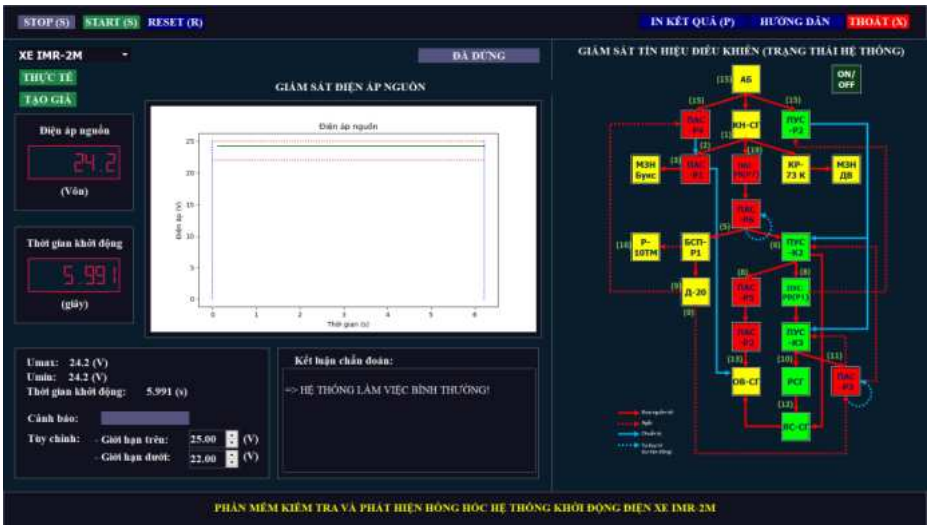


Hình 11. Các tín hiệu điện áp, thời gian và chuẩn đoán hỏng hóc hệ thống

Thuật toán phát hiện hỏng hóc đã được xây dựng được đưa vào chương trình để xử lý các tín hiệu lấy từ đầu khớp nối ПАС-Ш3, kết quả của chương trình sẽ đưa ra các tín hiệu về điện áp, thời gian khởi động, tín hiệu đèn báo trạng thái hoạt động của phần tử và chuẩn đoán hỏng hóc của hệ thống.

Nhờ vào việc áp dụng thuật toán này, chương trình thực hiện việc phân tích tín hiệu điện áp tại các điểm kiểm tra, ghi nhận thời gian khởi động, và kích hoạt các đèn báo để hiển thị trạng thái hoạt động của từng phần tử. Đồng thời, thuật toán sẽ chẩn đoán chính xác các hỏng hóc trong hệ thống, xác định phần tử gặp sự cố, và đưa ra tín hiệu cảnh báo để người vận hành có thể xử lý kịp thời, từ đó rút ngắn thời gian sửa chữa, kịp thời bảo trì các thành phần trong hệ thống khởi động điện trên xe IMR-2M.

Kết quả chạy mô phỏng hoạt động của chương trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc hệ thống khởi động điện trên xe khắc phục vật cản IMR-2M được thể hiện trên Hình 12.



Hình 12. Kết quả chạy mô phỏng chương trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc

Từ mô phỏng, ta có thể quan sát được các tín hiệu đèn báo trạng thái hoạt động của các phần tử trong hệ thống, tín hiệu giám sát điện áp nguồn, thời gian khởi động của hệ thống và đưa ra kết luận chuẩn đoán cho hệ thống theo đúng chức năng của chương trình. Chương trình này sẽ giúp người vận hành có thể kiểm tra, xác định và khắc phục sự cố một cách nhanh chóng và chính xác.

4. Kết luận và hướng phát triển

Bài báo đã xây dựng thuật toán kiểm tra phát hiện hỏng hóc hệ thống khởi động điện dựa trên phân tích các tín hiệu tại đầu ra của các phần tử trong hệ thống, cùng với đó việc phát triển một phần mềm chuyên dụng giúp tự động hóa quy trình kiểm tra và phát hiện hỏng hóc sẽ nâng cao hiệu quả sửa chữa, giảm thời gian khắc phục sự cố của hệ thống. Tuy nhiên hệ thống chưa xem xét các yếu tố môi trường như nhiệt độ, độ ẩm ảnh hưởng đến tín hiệu điện, cũng như chưa tích hợp các thuật toán học máy để nâng cao độ chính xác trong chẩn đoán lỗi. Trong tương lai, nghiên cứu sẽ tiếp tục hoàn thiện mô hình bằng cách mở rộng tập dữ liệu thu thập thực tế, cải thiện thuật toán xử lý tín hiệu và ứng dụng trí tuệ nhân tạo để tự động hóa quá trình kiểm tra. Đây là hướng đi tiềm năng nhằm tối ưu hóa công tác bảo dưỡng, sửa chữa và sử dụng xe khắc phục vật cản IMR-2M nói riêng và các loại xe chiến đấu nói chung.

Tài liệu tham khảo

[1] Đặng Sỹ Vạc, Dương Ngọc Khang, và Bùi Đức Cường, (2020), "Hướng dẫn sửa chữa hệ thống điện xe phá dỡ vật cản IMR-2M", Hà Nội, *Cục KT-Bộ Tư Lệnh Công binh*, tr.22-58.

[2] Trần Văn Tuyên, và Đặng Sỹ Vạc, (2024), "Hệ thống khởi động điện xe IMR-2M và sự khác biệt so với các xe tăng thế hệ trước", *Kỹ thuật và Trang bị,* số 290, tr.60-62.

[3] Trần Văn Tuyên, và Đặng Sỹ Vạc, (2024), "Nghiên cứu phát triển thiết bị kiểm tra và phát hiện hỏng hóc hệ thống khởi động điện trên xe khắc phục vật cản IMR-2M", *Kỹ thuật và Trang bị,* số 291, tr.44-47.

[4] Д. Н.Багин, С.В.Копцев, и А.Н.Кащук, (2019), "Диагностирование электрических цепей и сборочных единиц в системах электроспецоборудования танка Т-72Б", Россия, *Издательство Уральского университета.*

[5] Võ Tuấn Duy, (2025), "Python cơ bản", TP. Hồ Chí Minh, *NXB Giáo Dục*.

[6] M.Banzi, and M.Shiloh, (2022), "Getting Started with Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform (4th Edition)", *O'Reilly Media.*

Research and construction of a control algorithm for the testing and fault diagnosis device in the electric starting system of the IMR-2M obstacle-clearing vehicle

Abstract: *The automatic electric starting system is a crucial component of the IMR-2M obstacle-clearing vehicle, serving as one of the two methods for starting the internal combustion engine. Due to its complex structure and the lack of comprehensive documentation, diagnosing and detecting faults in this system is challenging. Therefore, this paper focuses on researching and developing a control algorithm for a testing device to identify faults in the electric starting system of the IMR-2M vehicle. The fault detection and diagnosis algorithm is based on analyzing voltage signals from sensors and relays within the system. If deviations exceed the allowable threshold, the system identifies the faulty component and provides warnings or corrective solutions in a timely manner.*

Keywords: Automatic electric starting system; control algorithm; obstacle clearing vehicle.

Thiết kế bộ điều khiển thích nghi để ổn định hệ con lắc ngược dựa trên mạng nơ-ron RBF

Huỳnh Văn Khương[1], Nguyễn Xuân Chiêm[1], Bùi Thanh Xuân[2], Hồ Thị Sương[2]

[1] Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật Quân sự

[2]Khoa Kỹ thuật cơ sở, Học viện Hải quân

[*] Email: chiemnx@mta.edu.vn, Số điện thoại liên lạc: 0966040231

Tóm tắt

Bài báo này tập trung vào việc thiết kế luật điều khiển bằng phương pháp Backstepping kết hợp với mạng nơ-ron RBF nhằm đảm bảo sự ổn định của hệ con lắc ngược. Mạng nơ-ron RBF được sử dụng để xấp xỉ các hàm phi tuyến chưa biết. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất không chỉ đạt được mục tiêu ổn định hệ thống mà còn chứng minh tính hiệu quả và độ tin cậy khi áp dụng cho hệ con lắc có thông số không chắc chắn.

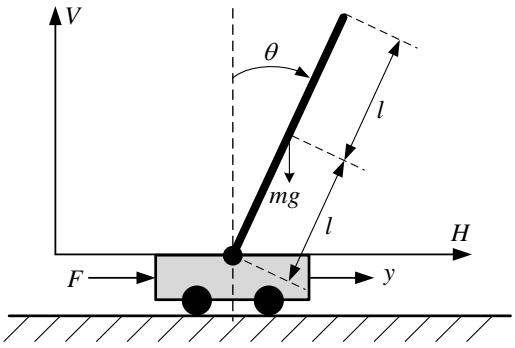
Từ khóa: *Backstepping, mạng nơ-ron RBF, điều khiển thích nghi; hệ con lắc ngược*

1. Đặt vấn đề

Hệ con lắc ngược là một hệ thống phi tuyến đặc trưng với một điểm cân bằng không ổn định, thường được chọn làm đối tượng chuẩn trong nghiên cứu và giảng dạy về lý thuyết điều khiển tự động. Nhiều luật điều khiển đã được áp dụng thành công cho hệ con lắc ngược [1-8]. Tuy nhiên, thực tế cho thấy rằng các phương pháp điều khiển như PID, điều khiển trượt, điều khiển tối ưu hoặc các phương pháp điều khiển hiện đại như Backstepping thường gặp khó khăn trước sự không chắc chắn của mô hình hệ thống hoặc khi tham số hệ thống biến đổi trong quá trình hoạt động. Để giải quyết vấn đề này, các phương pháp dựa trên mạng nơ-ron nhân tạo, đặc biệt là mạng nơ-ron RBF (Radial Basis Function), đã được chứng minh là một công cụ mạnh mẽ để xấp xỉ các hàm phi tuyến chưa biết và cải thiện hiệu suất điều khiển [9].

Vì vậy, bài báo này thực hiện phương pháp điều khiển thích nghi kết hợp giữa Backstepping và mạng nơ-ron RBF dựa trên hàm Lyapunov, nhằm đánh giá tính hiệu quả so với phương pháp Backstepping truyền thống thông qua kết quả mô phỏng. Từ đó, bài báo làm rõ và chứng minh sự vượt trội của việc áp dụng mạng nơ-ron RBF trong điều khiển các hệ thống mà động lực học của hệ thay đổi đáng kể, tính phi tuyến cao và về bản chất không thể xác định chính xác.

2. Mô hình toán hệ con lắc ngược



Hình 1. Mô hình hệ con lắc ngược

Hình 1 là mô hình hệ con lắc ngược với $\theta(rad)$ là góc của con lắc, $F(N)$ là lực điều khiển xe goòng, $l(m)$ là khoảng cách từ trục quay đến trọng tâm của con lắc và $y(m)$ là vị trí của xe theo phương ngang. Mục tiêu điều khiển ở đây là giữ con lắc ở vị trí thẳng đứng và di chuyển xe trở lại tâm của đường ray.

Theo nghiên cứu [6] mô hình toán của hệ như sau:

$$\begin{cases} \ddot{y} = \dfrac{1}{M+m}\left[F - ml\left(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta\right) - k\dot{y}\right] \\ \ddot{\theta} = \dfrac{1}{J+ml^2}\left[ml\left(g\sin\theta - \ddot{y}\cos\theta\right) - c\dot{\theta}\right] \end{cases} \tag{1}$$

Trong đó: $M(kg)$ là khối lượng xe goòng; $m(kg)$ là khối lượng con lắc; $J(kg.m^2)$ là mô-men quán tính của con lắc tại trọng tâm; $g(m/s^2)$ là gia tốc trọng trường; k là hệ số ma sát giữa xe và đường ray; c là hệ số ma sát của trục quay con lắc.

Đặt $x_1 = y$ là vị trí của xe, $x_2 = \theta$ là góc của con lắc ($x_2 = 0$ khi con lắc thẳng đứng, $x_2 = \pi$ khi con lắc hướng xuống), x_3 là vận tốc của xe, x_4 là vận tốc góc của con lắc. Trạng thái của hệ con lắc ngược là vectơ $\boldsymbol{x} = \left[x_1, x_2, x_3, x_4\right]^T$.

Lực tác động vào xe goòng có dạng như sau:

$$F = \frac{K_m K_g}{Rr}u_t - \frac{K_m^2 K_g^2}{Rr^2}\dot{y} = K_v u_t - K_r x_3 \tag{2}$$

Trong đó: u_t là điện áp cấp cho động cơ kéo xe goòng thông qua hệ thống dây xích – bánh đai, K_m là độ lợi động cơ, K_g là hệ số bánh răng, $R(\Omega)$ là điện trở nội của động cơ, $r(m)$ là bán kính bu li.

Từ (1) và (2), ta được hệ phương trình trạng thái mô tả hệ thống như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_3 = f_3(\boldsymbol{x}) + g_3(\boldsymbol{x})u_t \\ \dot{x}_4 = f_4(\boldsymbol{x}) + g_4(\boldsymbol{x})u_t \end{cases} \tag{3}$$

Trong đó:

$$f_3(\boldsymbol{x}) = \frac{\left(J+ml^2\right)\left(mlx_4^2\sin x_2 - kx_3 - K_r x_3\right) - ml\cos x_2\left(mgl\sin x_2 - cx_4\right)}{\left(M+m\right)\left(J+ml^2\right) - m^2l^2\left(\cos x_2\right)^2};$$

$$f_4(\boldsymbol{x}) = \frac{\left(M+m\right)\left(mgl\sin x_2 - cx_4\right) - ml\cos x_2\left(mlx_4^2\sin x_2 - kx_3 - K_r x_3\right)}{\left(M+m\right)\left(J+ml^2\right) - m^2l^2\left(\cos x_2\right)^2};$$

$$g_3(\boldsymbol{x}) = \frac{\left(J+ml^2\right)K_v}{\left(M+m\right)\left(J+ml^2\right) - m^2l^2\left(\cos x_2\right)^2};\ g_4(\boldsymbol{x}) = \frac{-ml\cos x_2 K_v}{\left(M+m\right)\left(J+ml^2\right) - m^2l^2\left(\cos x_2\right)^2}.$$

3. Tổng hợp luật điều khiển Backstepping thích nghi dựa trên mạng nơ-ron RBF

Các bước tổng hợp luật điều khiển Backstepping ổn định con lắc cân bằng:

Bước 1: Đặt $e_1 = x_2 - k_1 x_1$ (k_1 là hằng số) suy ra $\dot{e}_1 = \dot{x}_2 - k_1 \dot{x}_1 = x_4 - k_1 x_3$.

Để đạt được mục tiêu $e_1 \to 0$, hàm Lyapunov được chọn như sau:

$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2$ suy ra $\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left(x_4 - k_1 x_3 \right)$.

Để hệ thống ổn định, tức là $\dot{V}_1 \le 0$, ta chọn $x_4 = -c_1 e_1 + k_1 x_3$ ($c_1 > 0$). Như vậy, $\dot{V}_1 = -c_1 e_1^2 \le 0$.

Bước 2: Để $x_4 = -c_1 e_1 + k_1 x_3$, ta chọn tín hiệu điều khiển giả là $x_{4d} = -c_1 e_1 + k_1 x_3$.

Mục tiêu là $x_4 \to x_{4d}$. Đặt $e_2 = x_4 - x_{4d} = x_4 + c_1 e_1 - k_1 x_3$.

Đạo hàm $\dot{e}_2 = \dot{x}_4 + c_1 \dot{e}_1 - k_1 \dot{x}_3 = u_t \left(g_4 - k_1 g_3 \right) + f_4 - k_1 f_3 + c_1 \left(x_4 - k_1 x_3 \right)$.

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2$ suy ra $\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 = e_1 \left(e_2 - c_1 e_1 \right) + e_2 \dot{e}_2 = -c_1 e_1^2 + e_2 \left(e_1 + \dot{e}_2 \right)$.

Để $\dot{V}_2 \le 0$ thì $e_1 + \dot{e}_2 = -c_2 e_2$ ($c_2 > 0$).

Suy ra luật điều khiển như sau:

$$u_t = \frac{1}{g_4 - k_1 g_3} \left[k_1 f_3 - f_4 - c_1 \left(x_4 - k_1 x_3 \right) - e_1 - c_2 e_2 \right] \tag{4}$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov thì e_1 và e_2 hội tụ về 0.

Để hệ tiến về trạng thái ổn định mong muốn, cần bổ sung hằng số thiết kế k_2 để hiệu chỉnh giá trị của biến trạng thái x_1, tức là $x_1' = k_2 x_1$. Ở đây x_1' là tín hiệu cấp cho luật điều khiển (4) thay cho x_1 [8].

Để thực hiện luật điều khiển (4) cần có thông tin chính xác về mô hình. Nói cách khác, phải có biểu thức đúng của $f_3(\boldsymbol{x})$, $g_3(\boldsymbol{x})$, $f_4(\boldsymbol{x})$ và $g_4(\boldsymbol{x})$. Điều này là rất khó trong thực tế.

Luật điều khiển (4) được viết lại như sau:

$$u_t = \frac{1}{\left(\hat{g}_4 - k_1 \hat{g}_3 \right)} \left[k_1 \hat{f}_3 - \hat{f}_4 - c_1 \left(x_4 - k_1 x_3 \right) - e_1 - c_2 e_2 \right] \tag{5}$$

Trong đó: $\hat{f}_3$, $\hat{g}_3$, $\hat{f}_4$ và $\hat{g}_4$ lần lượt là ước lượng của f_3, g_3, f_4 và g_4.

Nếu $\hat{f}_3 = f_3$, $\hat{g}_3 = g_3$, $\hat{f}_4 = f_4$ và $\hat{g}_4 = g_4$ thì $\dot{V}_2 \le 0$.

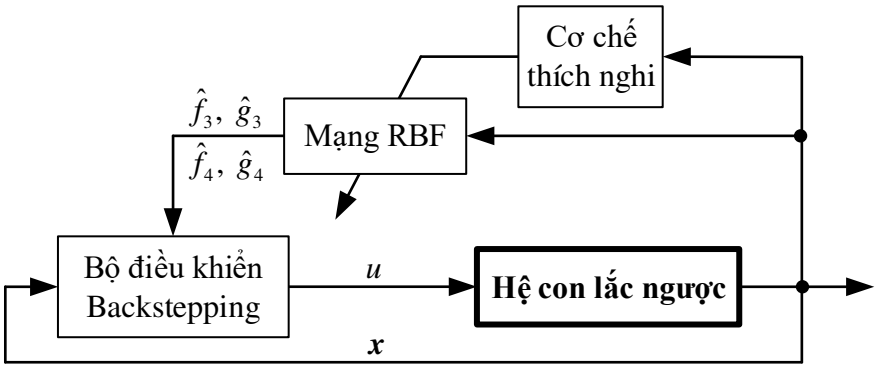
Các hàm chưa biết $\hat{f}_3$, $\hat{f}_4$, $\hat{g}_3$ và $\hat{g}_4$ có thể được xấp xỉ bởi mạng nơ-ron. Hình 2 là sơ đồ điều khiển thích nghi vòng kín dựa trên mạng nơ-ron RBF. Sử dụng bốn mạng RBF để xấp xỉ f_3, g_3, f_4 và g_4 như sau:

$$\begin{cases} f_3 = \boldsymbol{W}_1^T \boldsymbol{h}_1 + \varepsilon_1; \quad g_3 = \boldsymbol{W}_2^T \boldsymbol{h}_2 + \varepsilon_2 \\ f_4 = \boldsymbol{W}_3^T \boldsymbol{h}_3 + \varepsilon_3; \quad g_4 = \boldsymbol{W}_4^T \boldsymbol{h}_4 + \varepsilon_4 \\ i = 1,2,3,4 \end{cases} \tag{6}$$

Trong đó: W_i là giá trị trọng lượng mạng lý tưởng, h_i là hàm Gauss, ε_i là lỗi xấp xỉ.

$$\begin{cases} \hat{f}_3 = \hat{\boldsymbol{W}}_1^T \boldsymbol{h}_1 = \hat{\boldsymbol{W}}_1^T \exp\left(-\dfrac{\left\| \boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_j \right\|^2}{2\boldsymbol{b}_j^2} \right); \ \hat{g}_3 = \hat{\boldsymbol{W}}_2^T \boldsymbol{h}_2 = \hat{\boldsymbol{W}}_2^T \exp\left(-\dfrac{\left\| \boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_j \right\|^2}{2\boldsymbol{b}_j^2} \right) \\ \hat{f}_4 = \hat{\boldsymbol{W}}_3^T \boldsymbol{h}_3 = \hat{\boldsymbol{W}}_3^T \exp\left(-\dfrac{\left\| \boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_j \right\|^2}{2\boldsymbol{b}_j^2} \right); \ \hat{g}_4 = \hat{\boldsymbol{W}}_4^T \boldsymbol{h}_4 = \hat{\boldsymbol{W}}_4^T \exp\left(-\dfrac{\left\| \boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_j \right\|^2}{2\boldsymbol{b}_j^2} \right) \end{cases} \tag{7}$$

Trong đó: $\boldsymbol{x} = \left[x_1, \ x_2, \ ..., \ x_n \right]^T$ là vector đầu vào, $\boldsymbol{c}_j = \left[c_{j1}, \ c_{j2}, \ ..., \ c_{jn} \right]$ là vector tọa độ tâm của mạng nơ-ron thứ j, $\boldsymbol{b}_j = \left[b_1, \ b_2, \ ..., \ b_m \right]$ là vector độ rộng của hàm Gauss, $\hat{\boldsymbol{W}}_i^T$ là giá trị trọng lượng ước lượng.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển thích nghi vòng kín dựa trên mạng nơ-ron RBF

Sử dụng luật thích nghi sau [9]:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{Z}}} = \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{h} \boldsymbol{\xi}^T - n \boldsymbol{\Gamma} \left\| \boldsymbol{\xi} \right\| \hat{\boldsymbol{Z}} \tag{8}$$

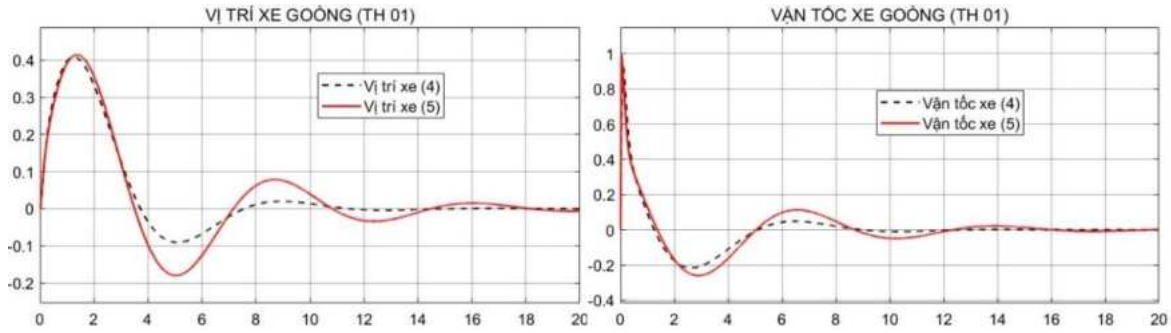
Trong đó: $\hat{\boldsymbol{Z}} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{W}}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\boldsymbol{W}}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\boldsymbol{W}}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{\boldsymbol{W}}_4 \end{bmatrix}$ là ma trận trọng lượng ước lượng; $\boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Gamma_4 \end{bmatrix}$ là ma trận xác định dương kích thước phù hợp; $\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_1 & e_2 \end{bmatrix}^T$; $\boldsymbol{h} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \end{bmatrix}^T$; n là một số dương.

4. Kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink và thảo luận

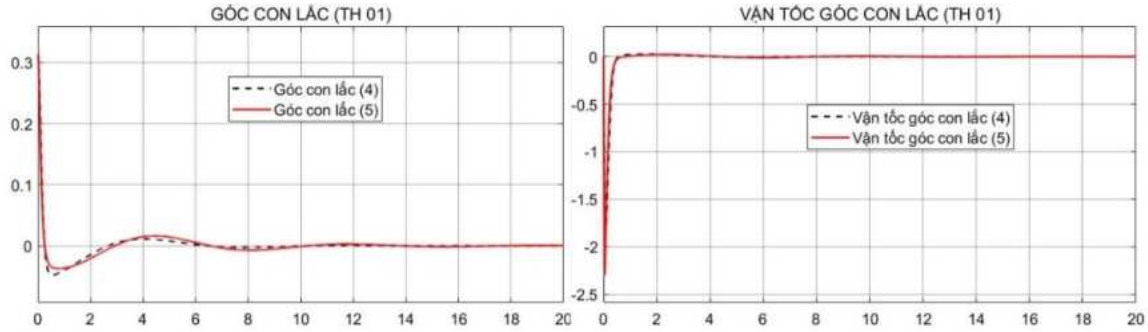
Hai luật điều khiển (4) và (5) đều có trạng thái ban đầu $\boldsymbol{x_0} = [0, \pi/10, 0, 0]^T$ và trạng thái ổn định cần đạt được là $\boldsymbol{x_1} = [0,0,0,0]^T$. Tín hiệu điều khiển u_t được giới hạn từ –12 đến +12 để đảm bảo thực hiện được trên phần cứng.

4.1. Kết quả mô phỏng

4.1.1. Trường hợp giả định các hàm phi tuyến có được là hoàn toàn chính xác, khối lượng con lắc ban đầu m_0 = 0,12 kg (TH 01)



Hình 3. Vị trí và vận tốc xe goòng của hai luật điều khiển (TH 01)



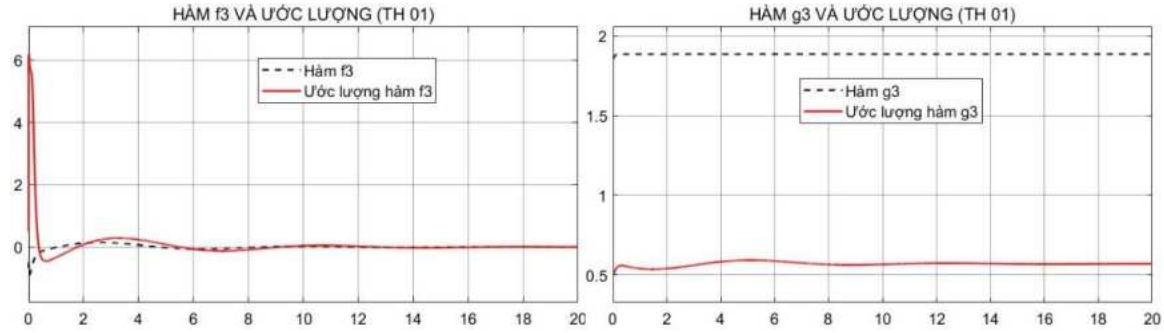
Hình 4. Góc và vận tốc góc con lắc của hai luật điều khiển (TH 01)

Bảng 1. So sánh chất lượng hai luật điều khiển (TH 01)

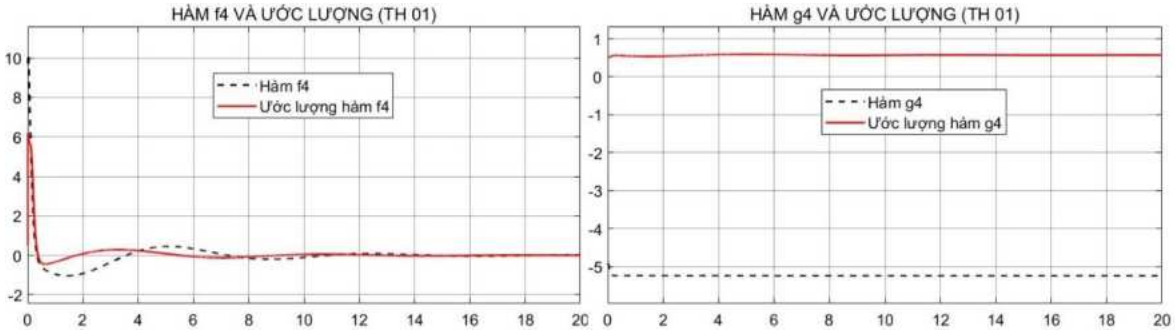
STT	Tiêu chuẩn chất lượng	Giá trị xác lập		Giá trị đỉnh (tính từ 0)		Thời gian ổn định, biên độ ≤ 0,02 (giây)	
	Luật điều khiển	**(4)**	**(5)**	**(4)**	**(5)**	**(4)**	**(5)**
1	Vị trí xe goòng, x_1	0	0	0,408	0,414	9,04	13,52
2	Góc con lắc, x_2	0	0	–	–	1,77	2,02
3	Vận tốc xe goòng, x_3	0	0	0,92	0,99	8,01	14,31
4	Vận tốc góc con lắc, x_4	0	0	-1,80	-2,30	2,47	2,94



Hình 5. Tín hiệu điều khiển u_t của hai luật điều khiển (TH 01)

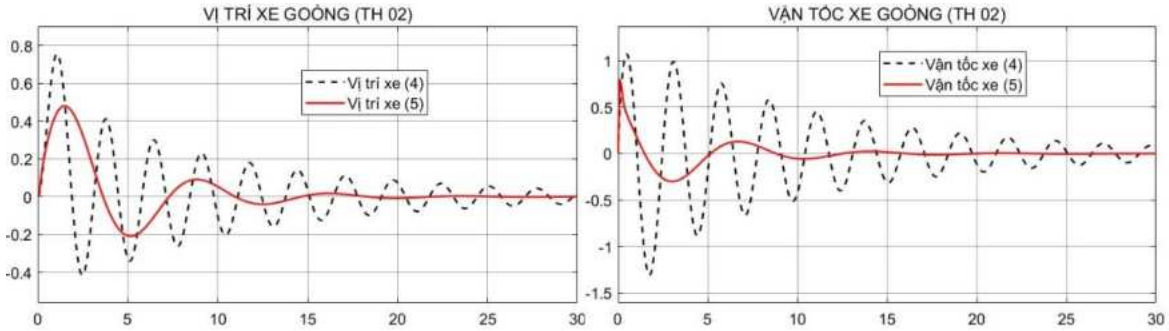


Hình 6. Hàm f_3, g_3 và giá trị ước lượng của chúng (TH 01)

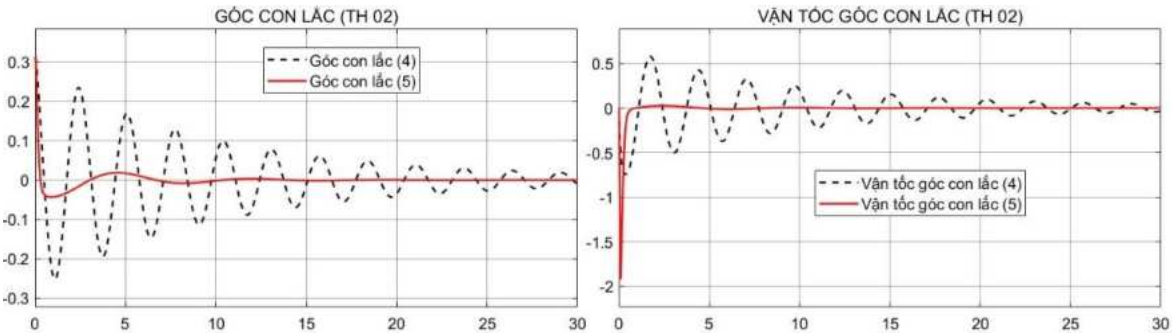


Hình 7. Hàm f_4, g_4 và giá trị ước lượng của chúng (TH 01)

4.1.2. Trường hợp giả định các hàm phi tuyến có được là hoàn toàn chính xác, khối lượng con lắc thay đổi mạnh m_1 = 3,0 kg (TH 02)



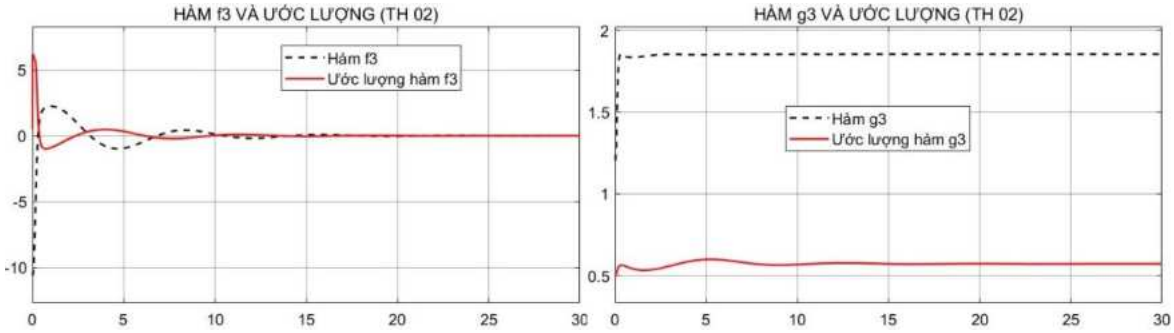
Hình 8. Vị trí và vận tốc xe goòng của hai luật điều khiển (TH 02)



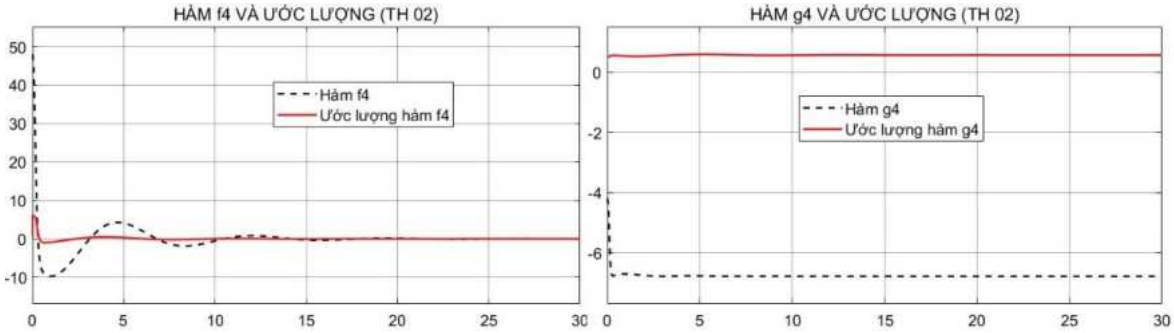
Hình 9. Góc và vận tốc góc con lắc của hai luật điều khiển (TH 02)



Hình 10. Tín hiệu điều khiển u_t của hai luật điều khiển (TH 02)

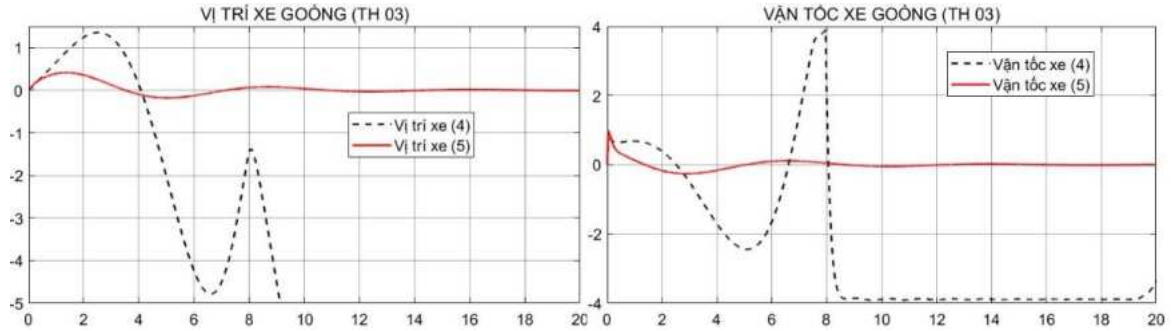


Hình 11. Hàm f_3, g_3 và giá trị ước lượng của chúng (TH 02)

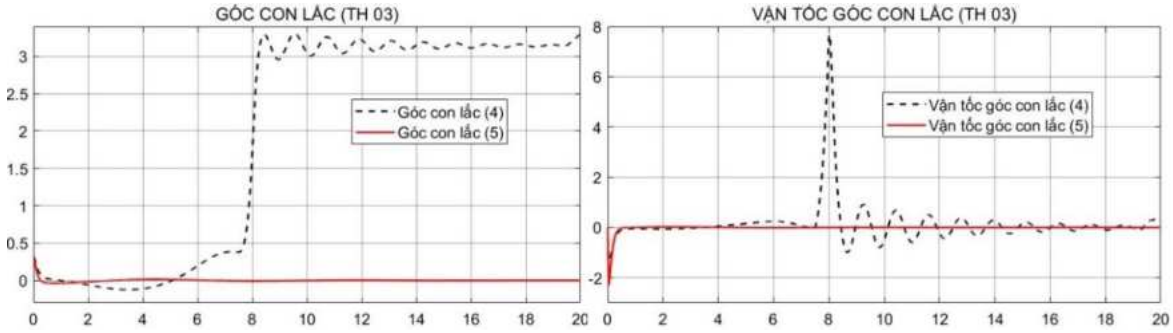


Hình 12. Hàm f_4, g_4 và giá trị ước lượng của chúng (TH 02)

4.1.3. Trường hợp hàm phi tuyến bị tính toán sai trong luật điều khiển (4), khối lượng con lắc ban đầu m_0 = 0,12 kg (TH 03)



Hình 13. Vị trí và vận tốc xe goòng của hai luật điều khiển (TH 03)



Hình 14. Góc và vận tốc góc con lắc của hai luật điều khiển (TH 03)



Hình 15. Tín hiệu điều khiển u_t của hai luật điều khiển (TH 03)

4.2. Thảo luận kết quả mô phỏng

Trong cả ba trường hợp (TH 01, TH 02, TH 03), luật điều khiển (5) đều đảm bảo hệ con lắc ngược tiến về vị trí cân bằng không ổn định $\boldsymbol{x_1}$ với các đáp ứng rất tốt, chất lượng điều khiển được duy trì ổn định. Trong khi đó, luật điều khiển (4) chỉ đảm bảo chất lượng điều khiển tốt ở TH 01, ở TH 02 mặc dù luật điều khiển (4) vẫn đưa hệ về $\boldsymbol{x_1}$ nhưng chất lượng điều khiển kém với độ dao động lớn và thời gian ổn định dài của các trạng thái, ở TH03 thì luật điều khiển (4) hoàn toàn không đưa hệ về $\boldsymbol{x_1}$.

Từ Hình 5, 10 và 15 ta thấy rằng luật điều khiển (5) cho ra tín hiệu điều khiển u_t ổn định nhanh và mượt mà về giá trị 0, đảm bảo tính khả thi khi triển khai trên thực tế. Trong khi đó, luật điều khiển (4) chỉ cho ra u_t tốt ở TH 01.

Hình 6, 7, 11 và 12 mô tả giá trị của hàm f_3, g_3, f_4 và g_4 cùng với ước lượng của chúng. Giá trị ước lượng $\hat{f}_3$ và $\hat{f}_4$ hội tụ về f_3 và f_4. Trong khi đó, giá trị ước lượng $\hat{g}_3$ và $\hat{g}_4$ lại không hội tụ về g_3 và g_4. Điều này xảy ra do quỹ đạo mong muốn của các trạng thái đầu ra không mang tính kích thích liên tục và hiệu suất lỗi bám có thể đạt được bởi nhiều giá trị khả thi của $\hat{f}_3$, $\hat{f}_4$, $\hat{g}_3$ và $\hat{g}_4$ bên cạnh giá trị thực của chúng và việc này xảy ra khá thường xuyên trong các ứng dụng thực tế [9].

5. Kết luận

Với điều kiện biết rõ về đặc tính động học của hệ con lắc ngược thì cả hai luật điều khiển Backstepping thông thường (4) và Backstepping kết hợp mạng nơ-ron RBF (5) đều đảm bảo sự ổn định cho hệ tại điểm cân bằng không ổn định $\boldsymbol{x_1}$. Khi đối mặt với các hệ thống phức tạp trong thực tế, việc xác định chính xác đặc tính động học của hệ là rất khó thực hiện, đặc biệt khi các tham số hệ thống thay đổi lớn trong quá trình làm việc. Lúc này, luật điều khiển thích nghi (5) trở nên vượt trội nhờ khả năng xấp xỉ các hàm phi tuyến chưa biết bằng

mạng nơ-ron RBF, giúp hệ thống hoạt động ổn định mà không cần thông tin chính xác về động học. Triển khai các luật điều khiển đã thiết kế, khảo sát trên các hệ thống chịu nhiễu mạnh hoặc sự thay đổi thông số hệ thống lớn, thêm luật thích nghi cho các tham số của mạng nơ-ron RBF là những định hướng nghiên cứu tiếp theo.

Tài liệu tham khảo

[1] Lal Bahadur Prasad, Barjeev Tyagi Hari, Om Gupta. (2014). Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum System Using PID Controller and LQR: Performance Analysis Without and With Disturbance Input. *International Journal of Automation and Computing, 11*(6), 661-670.

[2] Saqib Irfan, Adeel Mehmood, Muhammad Tayyab Razzaq, Jamshed Iqbal. (2018). Advanced sliding mode control techniques for Inverted Pendulum: Modelling and simulation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, In press, corrected roof, Available online 21.

[3] Arpit Jain, Deep Tayal, Neha Sehgal. (2013). Control of Non-Linear Inverted Pendulum using Fuzzy Logic controller. *International Journal of Computer Applications*, *69*(27).

[4] X. Gong, Z. C. Hu, C. J. Zhao, Y. Bai, Y. T. Tian. (2012). Adaptive backstepping sliding mode trajectory tracking control for a quad-rotor. *International Journal of Automation and Computing*, *9*(5), 555–560.

[5] Hai N. Phan, Chiem X. Nguyen. (2017). Building embedded quasi-time-optimal controller for two-wheeled self-balancing robot. *XIII International Scientific-Technical Conference* "Dynamic of Technical Systems", MATEC Web Conf.Volume 132.

[6] N. X. Chiem, N. P. Hai. (2018). Design controler of the quasitime optimization approach for stabilizing and trajectory tracking of inverted pendulum. *XIV International Scientific-Technical Conference* "Dynamic of Technical Systems", MATEC Web Conf. Volume 226.

[7] C X Nguyen, Th Tr Tran, Th X Pham, K M Le. (2020). Design of control laws for rotary inverted pendulum based on LQR and Lyapunov function. *Dynamics of Technical Systems*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1029 (2021).

[8] Nguyễn Văn Khanh, Nguyễn Vĩnh Hảo, Nguyễn Ngô Phong. (2014). Điều khiển cân bằng Con lắc ngược sử dụng bộ điều khiển Cuốn chiếu. *Tạp chí khoa học trường Đại học Cần Thơ*, Phần A, 18-25.

[9] Jinkun Liu. (2013). *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems*. Springer Berlin, Heidelberg.

Design of an adaptive controller for stabilizing an inverted pendulum system based on RBF neural networks

Abstract: *This paper focuses on designing a control law using the Backstepping method combined with an RBF neural network to ensure the stability of the inverted pendulum system. The RBF neural network is utilized to approximate unknown nonlinear functions. Simulation results demonstrate that the proposed method not only achieves the goal of stabilizing the system but also proves its effectiveness and reliability when applied to inverted pendulum systems with uncertain parameters.*

Keywords: Backstepping, RBF neural network, adaptive control, inverted pendulum system.

❑

Nghiên cứu và đánh giá hiệu quả của các thuật toán lập kế hoạch chuyển động trên môi trường pedsim cho robot làm việc trong môi trường đông đúc

Nghiêm Hoàng Nam*, Nguyễn Lan Anh, Trần Công Tân, Trương Xuân Tùng

Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự

* Email: nghiemhoangkhanh@gmail.com, SĐT: 0962514182

Tóm tắt

Bài báo này phân tích và so sánh hiệu quả của mô hình HRVO (Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles) và TEB Local Planner (Timed Elastic Band Local Planner) trong môi trường đông đúc và phức tạp, dựa trên hai tiêu chí chính: khả năng tránh va chạm với chướng ngại vật và khả năng đáp ứng các quy tắc xã hội. HRVO xem xét vị trí và vận tốc hiện tại để tính toán vận tốc mới cho robot di động, đảm bảo tránh va chạm bằng cách sử dụng không gian vận tốc. Ngược lại, TEB Local Planner tối ưu hóa quỹ đạo trong không gian và thời gian, tích hợp các ràng buộc động học và chi phí tránh chướng ngại vật để xây dựng lộ trình di chuyển mượt mà. Phương pháp đánh giá được thực hiện thông qua các thí nghiệm trong môi trường mô phỏng. Các kết quả thử nghiệm đánh giá khả năng lập kế hoạch đường đi tới mục tiêu và tránh chướng ngại vật động với việc đảm bảo các quy tắc xã hội của hai thuật toán trong môi trường đông đúc.

Từ khóa: *Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles(HRVO), Timed Elastic Band Local Planner(TEB).*

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, sự phát triển của các robot di động tự hành đã đạt được những bước tiến vượt bậc [1], đặc biệt là trong các môi trường động và không có cấu trúc rõ ràng [2]. Các robot này được phát triển thực hiện nhiều nhiệm vụ khác nhau, như lập kế hoạch chuyển đông, tránh va chạm và tương tác với con người trong môi trường phức tạp. Để giải quyết những thách thức này, nhiều thuật toán đã được phát triển, trong đó Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles (HRVO) [3, 4] và Timed Elastic Band Local Planner (TEB) [5], là hai thuật toán nổi bật, mỗi thuật toán phù hợp với các khía cạnh khác nhau của điều hướng robot và lập kế hoạch đường đi cũng như đảm bảo các quy tắc xã hội.

HRVO [3, 4], là một thuật toán được sử dụng rộng rãi cho các robot hoạt động trong môi trường có các chướng ngại vật động, như con người, robot khác, hoặc các phương tiện di chuyển. Thuật toán này đặc biệt hiệu quả với các robot có mô hình động học đơn giản. Bằng cách tính toán không gian vận tốc và chọn lựa vận tốc an toàn để tránh va chạm với các đối tượng đang di chuyển, HRVO giúp robot điều hướng hiệu quả trong những môi trường động, nơi các vật cản có thể di chuyển theo cách khó đoán trước [6, 7]. HRVO nổi bật với khả năng tính toán tiềm năng va chạm (potential collision) bằng cách dự đoán vận tốc tương lai của các tác nhân xung quanh và điều chỉnh vận tốc của chính nó một cách phù hợp. Thuật toán này tuân thủ các quy tắc xã hội trong môi trường đông đúc, đặc biệt hiệu quả khi xử lý các vật cản động có chuyển động phức tạp, đòi hỏi khả năng phản ứng nhanh. Nhờ những ưu điểm này, HRVO đã được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như xe tự lái, robot giao hàng, và robot hoạt động trong không gian đông đúc [8].

Trong khi đó, TEB Local Planner [9] là một thuật toán lập kế hoạch chuyển động được thiết kế cho các robot hoạt động trong môi trường có cả chướng ngại vật tĩnh (ví dụ như

tường, đồ đạc) và chướng ngại vật động (ví dụ như các robot khác, người đi bộ). TEB là một giải thuật cho bài toán thiết kế quỹ đạo cục bộ online để thực hiện tránh vật cản online trên đường đi của robot. Quỹ đạo tối ưu được thiết kế dựa trên tối ưu về mặt thời gian, tối ưu khoảng cách đến các vật cản, và có tính đến ràng buộc cả động học và động lực học [10]. TEB thường được sử dụng các loại robot có động học khác nhau, bao gồm robot hai bánh (differential drive), bốn bánh (car-like), và cả robot hình học phức tạp, chẳng hạn như trong các robot công nghiệp, xe tự lái trong môi trường có kiểm soát, và robot di động trong kho, nơi tối ưu hóa đường đi và hiệu suất là yếu tố then chốt.

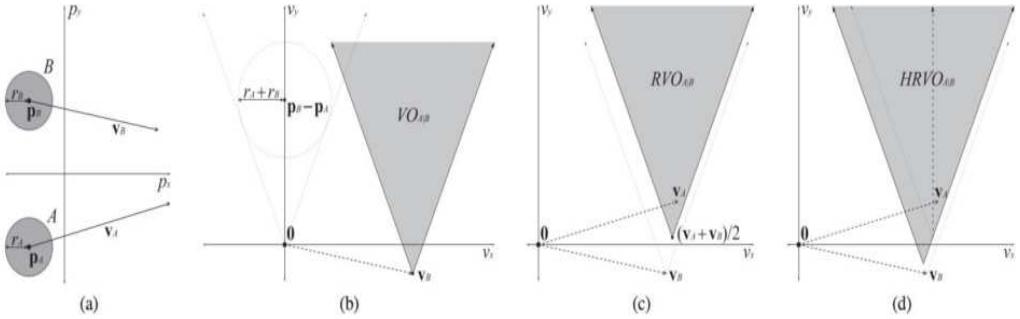
Hai phương pháp trên đã được áp dụng thành công để điều hướng robot di động trong môi trường năng động (dynamic environment), nhưng có rất ít nghiên cứu đánh giá và so sánh sâu sắc các mô hình trên. Trong bài báo này, tôi tiến hành nghiên cứu, mô phỏng và đánh giá hiệu quả của hai thuật toán lập kế hoạch chuyển động trong môi trường Pedsim cho robot vi sai làm việc trong môi trường đông đúc dựa trên hai chỉ số là thời gian đến mục tiêu và chỉ số an toàn thoải mái cho con người (HCSI).

Phần còn lại của bài viết này được tổ chức như sau. Mô tả ngắn gọn về mô hình HRVO và TEB cũng như nền tảng robot di động được trình bày trong Phần 2. Phần 3 được sử dụng để mô tả các thí nghiệm mô phỏng. Kết luận được đưa ra ở Phần 4.

2. Cơ sở toán học của các thuật toán HRVO, TEB

2.1. Thuật toán HRVO

Kỹ thuật chướng ngại vật vận tốc đối xứng lai (HRVO) do Snape và cộng sự giới thiệu [3], [4] là một phần mở rộng của phương pháp chướng ngại vật vận tốc đối xứng [11]. Kỹ thuật này là một phương pháp tiếp cận dựa trên chướng ngại vật vận tốc có tính đến chuyển động của các vật cản khác để tránh va chạm trong các hệ thống nhiều vật cản. Mô hình HRVO đã được áp dụng thành công để tránh va chạm giữa nhiều robot. Do đó, kỹ thuật HRVO cũng có thể được hiểu là một phương pháp điều khiển. Cấu trúc mô hình HRVO của một robot và một chướng ngại vật được minh hoạ trong Hình 1.



Hình 1: *Cấu trúc của HRVO*

Sự kết hợp như Hình 1 là lý do cho cái tên chướng ngại vật vận tốc đối xứng lai

Giả sử một tập hợp các chướng ngại vật động và tĩnh O xuất hiện trong vùng lân cận của robot. HRVO kết hợp cho robot di động được đưa ra trong sự tồn tại của một số chướng ngại vật là hợp của tất cả các HRVO được tạo ra bởi tất cả các chướng ngại vật:

$$HRVO_r = \bigcup_{o \in 0} HRVO_{r|o} \quad (1)$$

Theo [10], để tránh va chạm với các vật cản, vận tốc v_r^{hrvo} của robot di động cần được chọn ngoài $HRVO_r$ và gần với vector vận tốc ưu tiên của robot v_r^{pref} . Nói cách khác, v_r^{hrvo} được tính toán như sau:

$$v_r^{hrvo} = \arg \min_{v \notin HRVO_r} \left\| v - v_r^{pref} \right\| 2 \quad (2)$$

trong đó, v_r^{pref} được tính như sau:

$$v_r^{pref} = v_r^{pref} \frac{p_r - p_g}{\left\| p_r - p_g \right\| 2} \quad (3)$$

trong đó, P_r là vị trí hiện tại của robot, Pg là vị trí mục tiêu và v_r^{pref} là tốc độ mong muốn của robot di động.

Mô hình HRVO được trình bày trong Thuật toán 1. Đối với mỗi vật cản, hàm HRVO tính toán và xây dựng vùng không thể di chuyển (vùng cấm) xung quanh vật cản đó, dựa trên vị trí và vận tốc của cả robot và vật cản. kết hợp tất cả các vùng cấm từ các vật cản lại thành một vùng an toàn tổng thể (dòng 3-5 của Thuật toán 1) , giúp robot hiểu rõ các khu vực nguy hiểm mà nó cần tránh (dòng 6 của Thuật toán 2). tính toán vận tốc mới cho robot dựa trên vận tốc ưu tiên và vùng an toàn đã kết hợp, giúp robot di chuyển hiệu quả và an toàn (Dòng 7,8 của Thuật toán 1)

	Thuật toán 1: Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles (HRVO)
	Đầu vào: P_r ,v_r, g_r , Tập hợp các vật cản, mỗi vật cản o_i có tọa độ po_i và vận tốc vo_i
	Đầu ra: lệnh điều khiển v_r
1	**bắt đầu**
2	**While** (robot R chưa đạt được g_r) **do**;
3	**For** mỗi vật cản o_i thuộc O:
4	*BH← BuildHRVO(P_r , v_r, po_i , vo_i);*
5	*CH←CombineHRVO(BH) (*theo Phương trình 1*);*
6	*PV←PreferVelocity(P_r , v_r, g_r) (*theo Phương trình 3*);*
7	*NV←NewVelocity(PV,CH) (*theo Phương trình 2*);*
8	**Trả về** v_R,v_I;

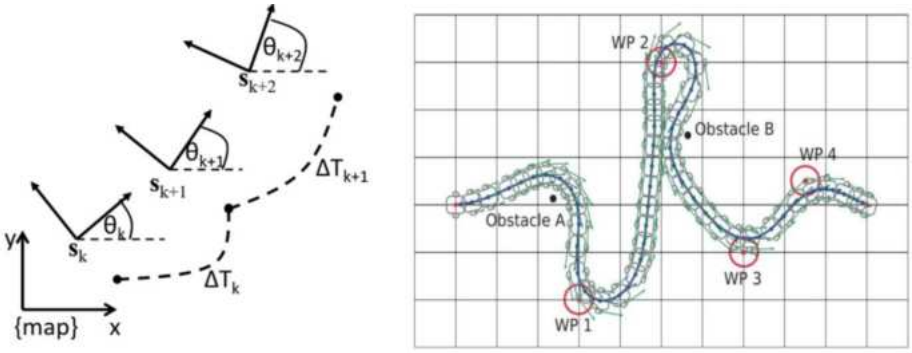
2.2. Thuật toán TEB

Thuật toán TEB (Timed Elastic Band) tạo ra quỹ đạo cục bộ cho robot bằng cách tinh chỉnh và biến đổi quỹ đạo toàn cục ban đầu. Phương pháp này đảm bảo các ràng buộc động học cũng như các giới hạn về vận tốc và gia tốc của robot được đáp ứng. Khi thực hiện tính toán quỹ đạo cục bộ, thuật toán TEB đồng thời xem xét các yếu tố môi trường như vật cản tĩnh và động. Thuật toán này được ưu tiên lựa chọn để nghiên cứu nhờ khả năng tích hợp giữa

lập kế hoạch quỹ đạo và tránh vật cản động, đồng thời đáp ứng yêu cầu thời gian thực trong quá trình xử lý.

Với mục tiêu lập kế hoạch quỹ đạo trực tuyến, TEB là công cụ hiệu quả để robot di chuyển an toàn trong môi trường có sự hiện diện của người hoặc vật cản. Thuật toán này hoạt động bằng cách tối ưu hóa thời gian thực hiện quỹ đạo, trong khi vẫn đảm bảo tránh va chạm với vật cản và duy trì các tiêu chuẩn về động học, vận tốc và gia tốc phù hợp với yêu cầu vận hành của robot.

Theo [6] thuật toán TEB được biểu diễn là một dãy N các tư thế của robot Q = $\{s_k\}$ với k = 1, 2, ..., N. Trong đó $s_k = [x^k_r, y^k_r, \theta^k_r]^T$, với $[x^k_r, y^k_r]$ và $[\theta^k_r]$ tương ứng là vị trí và hướng của robot ở tư thế thứ k, Hình 2.



Hình 2: Mô tả các tư thế liên tiếp của robot trong bản đồ toàn cục.

Gọi ΔT_k là khoảng thời gian giữa hai tư thế liên tiếp của robot là s_k và s_{k+1}. Khi đó ta sẽ có một dãy gồm N-1 khoảng thời gian. Đặt $\tau = \{\Delta T_k\}$ với k = 1, 2, ..., N-1. Ta có $0 \le \Delta T_k \le \Delta T_{max}$, trong đó ΔT_{max} là giới hạn trên của ΔT_k. Khi đó thuật toán TEB được biểu diễn như một cặp hai dãy như sau:

$$B = (Q, \tau) = \left[s_1, \Delta T_1, s_2, \Delta T_2, ..., s_{N-1}, \Delta T_{N-1}, s_N\right]^T \quad (4)$$

Yêu cầu chi phí của hàm tối ưu theo thuật toán TEB đảm bảo tìm được đường đi nhanh nhất thay vì ngắn nhất khi robot di chuyển từ điểm bắt đầu tới đích. Do đó cần đảm bảo tổng thời gian robot di chuyển nhỏ nhất, chi phí hàm mục tiêu sẽ là:

$$V^*(B) = \min_B \sum_{k=1}^{N-1} \Delta T_k^2 \quad (5)$$

Hơn nữa, yêu cầu quỹ đạo robot không chỉ đảm bảo đường đi nhanh nhất mà còn phải thỏa mãn các ràng buộc về động học non-holonomic, vận tốc, gia tốc, tránh vật cản.

Các ràng buộc được đưa vào hàm mục tiêu V(B):

$$V(B) = \sum_{k=1}^{N-1} [\Delta T_k^2 + \chi^2(h_k, \sigma_h) + \chi^2(v_k, \sigma_v) + \chi^2(\alpha_k, \sigma_\alpha) + \chi^2(o_k, \sigma_o)] \quad (6)$$

Trong đó: δ là các trọng số (hằng số) riêng cho từng ràng buộc. *V*(B) hàm mục tiêu tổng thể, *f*(B) hàm mục tiêu thành phần. Tối ưu hóa hàm mục tiêu V(B) sử dụng giải thuật LevenbergMarquardt (LM), thu được quỹ đạo tối ưu B* (TEB tối ưu):

$$B^* = arg\min_B V(B)$$

(7)

Từ quỹ đạo tối ưu B*, tín hiệu điều khiển u = [v, ω] được tính theo công thức sau

$$v_r^k = \Delta T_k^{-1} \left\| \left[x_{k+1} - x_k, y_{k+1} - y_k \right]^T \right\| \gamma(s_k, s_{k+1}) \quad (8)$$

$$\omega_r^k = \Delta T_k^{-1} (\beta_{k+1}, \beta_k) \quad (9)$$

Mô hình TEB được trình bày trong Thuật toán 2.

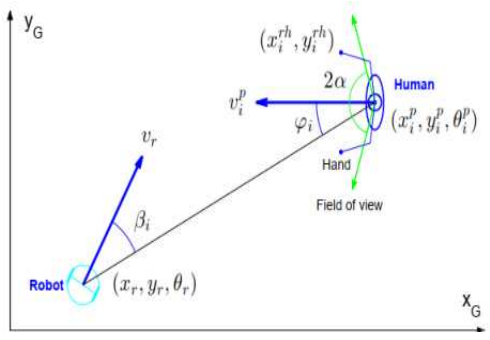
Bước 1: Khởi tạo quỹ đạo (các dòng từ 2 đến 6). Để đơn giản, ta coi tư thế của robot trùng với tư thế xuất phát. Các đường tương ứng sẽ được khởi tạo thành tập quỹ đạo T.

Bước 2: Tối ưu (các dòng từ 7 đến 11). Tập quỹ đạo T sẽ được tính toán tối ưu đối với từng quỹ đạo, chi phí hàm tối ưu sẽ được lưu lại.

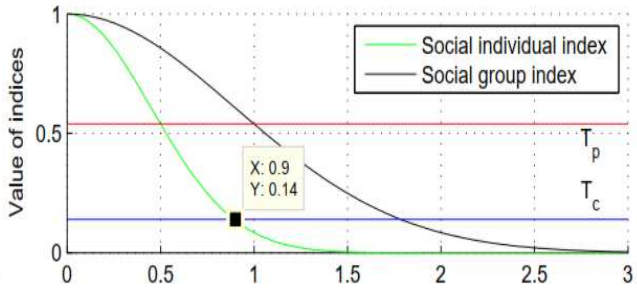
Bước 3: Chọn quỹ đạo có chi phí nhỏ nhất (các dòng 12, 13). Sau khi giải bài toán tối ưu hàm mục tiêu TEB, quỹ đạo được chọn là quỹ đạo có chi phí nhỏ nhất.

	Thuật toán 2: Timed Elastic Band Algorithm (TEB_Algorithm)	
	Đầu vào: tư thế hiện tại của robot s_r, tư thế xuất phát s_s, tư thế đích s_g, tập các vật cản O	
	Đầu ra: lệnhđiềukhiển u_r	
	bắt đầu	
1	G←createGraph(s_r,s_s,s_g,O);	Bước 1
2	D←depthFirstSearch(G);	
3	H←computeH-////(D,G);	
4	R←removeRedundantPath(D,H,G);	
5	T←initializeTrajectories(R,G);	
6	**For** (quỹ đạo $B_p \in T$) **do**	Bước 2
7	V←objectiveFunction(); (tương ứng phương trình 16)	
8	B^*_p←Optimizer(B_p,O,V); (tương ứng phương trình 17)	
9	B*←storeLocalOptimalTrajectory(B^*_p);	
0	**end for**	
1	V_c←newObjectiveFunction();	Bước 3
2	B^*←Optimizer(B^*,O,V_c); (tương ứng phương trình 18)	
3	Trả về u_r=[υ_r,ω_r]^T;	

2.3. Chỉ số An toàn - Thoải mái cho Con người HCSI



Hình 3



Hình 4

Để so sánh trực quan hiệu quả của các mô hình này, chúng tôi áp dụng hai chỉ số trong chỉ số an toàn thoải mái cho con người (HCSI) do [12] giới thiệu. Chỉ số HCSI được sử dụng để ước tính sự an toàn và thoải mái của con người cũng như các hành vi được xã hội chấp nhận của robot di động. Bao gồm chỉ số cá nhân xã hội (SII Social Individual Index) và chỉ số

nhóm xã hội (SGI Social Group Index).

Cụ thể, giá trị SII được áp dụng để đo lường mức độ an toàn về thể chất và tâm lý của mỗi cá nhân: Được tính toán dựa trên phương trình (10),

$$SII = \max_{i=1:N} \exp\left(-\left(\left(\frac{x_r - x_i^p}{\sqrt{2}\sigma_0^{px}} \right)^2 + \left(\frac{y_r - y_i^p}{\sqrt{2}\sigma_0^{py}} \right)^2 \right) \right) \tag{10}$$

Trong đó $\left(x_i^p, y_i^p\right)$ là vị trí của một cá nhân p_i, (x_r, y_r) là vị trí của robot, σ_0^{px} và σ_0^{py} là các độ lệch chuẩn, và N là số lượng người ở trong phạm vi gần robot. Giá trị chỉ số cá nhân xã hội (SII) theo khoảng cách tương ứng giữa con người và robot được minh họa trong Hình 3.

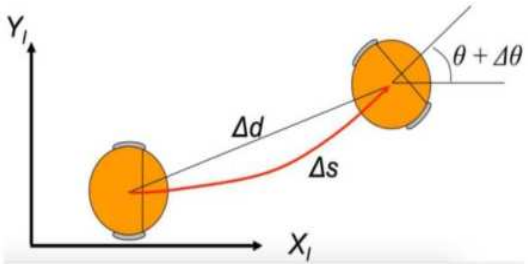
Trong khi SGI được dùng để đo lường mức độ an toàn thoải mái của nhóm người: Chỉ số nhóm xã hội (Social Group Index – SGI) được tính toán dựa trên phương trình (11):

$$SGI = \max_{k=1:K} \exp\left(-\left(\left(\frac{x_r - x_k^g}{\sqrt{2}\sigma_k^g} \right)^2 + \left(\frac{y_r - y_k^g}{\sqrt{2}\sigma_k^g} \right)^2 \right) \right)$$

$$\sigma_k^g = \frac{r_k^g}{2} \tag{11}$$

Trong đó σ_k^g được tính toán theo phương trình (11), r_k^g được xác định trong [12], và K là số lượng nhóm người trong phạm vi của robot [12]. Hình 4 minh họa ví dụ về giá trị SGI tương ứng với khoảng cách giữa robot và trung tâm không gian tương tác xã hộ

2.4. Mô hình động học robot



Hình 5. Mô Hình Differential Drive Robot

Trong bài báo này, mô hình HRVO và TEB sẽ được áp dụng cho một robot di động vi sai hai bánh để thực hiện so sánh điều hướng trong môi trường của con người. Vận tốc mới v_p^{new} của robot di động được phân tích thành 2 thành phần dọc theo trục x và y là $v_r^r(t)$ và $v_r^l(t)$. Hướng ưu tiên của robot di động là $\theta_r^{pref}(t) = a\tan(v_r^r(t), v_r^l(t))$. Trạng thái của robot tại thời điểm t được xác định là $r(t) = (x_r(t), y_r(t), \theta_r(t))$, trong đó $x_r(t), y_r(t), \theta_r(t)$ lần lượt là vị trí và hướng của robot. Tại thời điểm (t +1), trạng thái của robot được xác định bởi các phương trình sau:

$$\begin{bmatrix} x_r^{t+1} \\ y_r^{t+1} \\ \theta_r^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r^{t} \\ y_r^{t} \\ \theta_r^{t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_r^r + v_r^l}{2}\cos(\theta_t)dt \\ \frac{v_r^r + v_r^l}{2}\sin(\theta_t)dt \\ \frac{v_r^r + v_r^l}{L}dt \end{bmatrix} \quad (12)$$

trong đó L biểu diễn chiều dài cơ sở của robot, v_r^r và v_r^l lần lượt là các lệnh vận tốc tuyến tính của bánh xe bên phải và bên trái của robot. Các vận tốc tuyến tính này được tính như sau:

$$v_r^r = v_r + \frac{L\omega_r}{2}dt \quad (13)$$

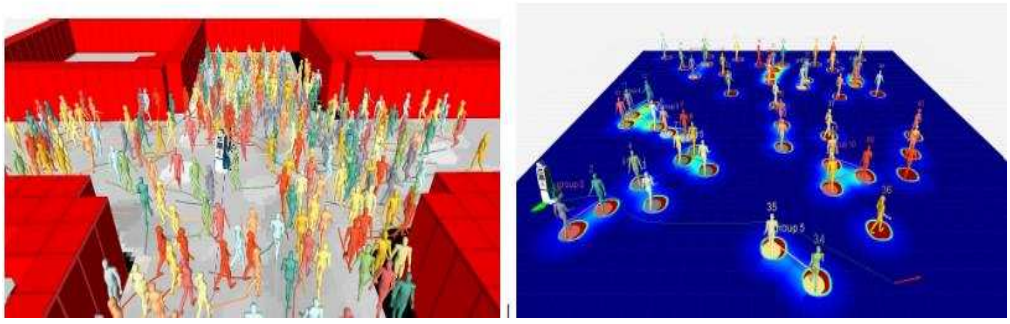
$$v_r^l = v_r + \frac{L\omega_r}{2}dt \quad (14)$$

3. Thí nghiệm và kết quả

Giả sử một robot di động tự động đang hoạt động trong một trung tâm mua sắm với các phòng và hành lang. Với nhiều vật cản và vật thể như cá nhân đứng yên và chuyển động, các nhóm người đứng yên và di chuyển, các chướng ngại vật khác như tường và bàn. Robot di động được yêu cầu tiếp cận các vị trí được xác định trước trong hành lang và trong các phòng văn phòng. Trong quá trình di chuyển, robot được yêu cầu không chỉ hướng tới các vị trí mục tiêu mà còn phải giữ khoảng cách an toàn với con người, nhóm người và chướng ngại vật đồng thời còn đảm bảo sự thoải mái cho con người khi robot di chuyển qua.

Trong phần này, chúng tôi trình bày các thử nghiệm để đánh giá hiệu quả của các giải thuật được đề cập ở Mục 2. Kết quả phân tích nhằm làm rõ sự khác biệt của hai phương pháp HRVO và TEB.

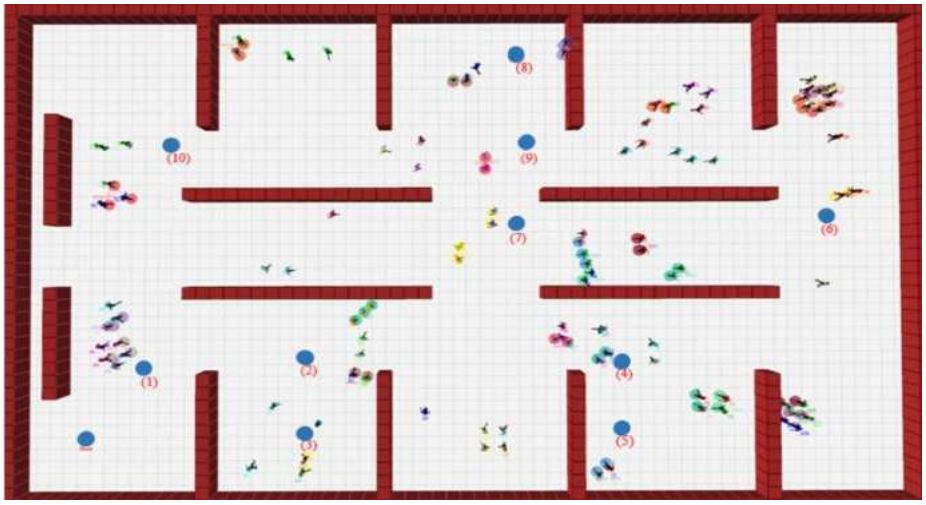
3.1. Cài đặt mô phỏng và thiết lập tham số mô phỏng



Hình 6. Môi trường Pedsim ROS

Để thực hiện các kịch bản mô phỏng, chúng tôi sử dụng hệ điều hành Robot (ROS) với sự kết hợp giữa RVIZ và PedSim ROS, trong đó môi trường Rviz dùng để xây dựng các thuật toán điều khiển, còn môi trường mô phỏng được tạo ra trên nền tảng Pedsim ROS**.** Pedsim ROS là một công cụ mô phỏng dành cho các hệ thống robot di động, được thiết kế để mô phỏng hành vi của người đi bộ (pedestrians) trong môi trường tương tác.

Nó được phát triển dựa trên Pedsim Library, một thư viện mã nguồn mở để mô phỏng các kịch bản di chuyển và tương tác giữa các đối tượng như người đi bộ, robot, và chướng ngại vật trong môi trường thực tế như Hình 6. Trong thí nghiệm, robot được lên kế hoạch điều hướng từ vị trí xuất phát (Bắt đầu) qua các điểm tham chiếu theo thứ tự sau: (start) - (1) - (2) - (3) - (2) - (4) - (5) - (4) - (6) - (7) - (8) - (9) - (10) - (1) sau đó từ vị trí (1) tiếp tục thực hiện chu trình trên và được thực hiện 100.000 lần. Môi trường mô phỏng gồm 108 người, trong đó có 80 người di chuyển và 28 người đứng yên. Ngoài ra, nền tảng phần mềm sẽ tạo ngẫu nhiên các nhóm người trong quá trình thử nghiệm Hình 7.



Hình 7. Môi trường mô phỏng

Chúng tôi đã thử nghiệm với bộ tham số cho robot được trình bày trong Bảng 1. Các tham số được chọn theo định nghĩa về không gian cá nhân trong mô hình Hall được trình bày trong [12].

Bảng 1. Các thông số trong thí nghiệm

Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
v_{max}	1.0 [m/s]	a_{max}	0.1 [m/s^2]	σ_h	1000
ω_{max}	0.5 [rad/s]	$\dot{\omega}_{max}$	0.1 [rad/s^2]	σ_v	2.0
d_p	0.54	d_c	0.09 [m]	r_h	0.25 [m]
T_p	0.54	T_c	0.14	T_g	0.14

Cụ thể, bán kính của con người r_h và robot r_r được đặt thành 0,25 m, tương ứng với khoảng cách an toàn về mặt vật lý d_p cho con người là 0,5 m. Khoảng cách an toàn về mặt tâm lý d_c cho con người được chọn là 0,9 m. Sự an toàn về mặt tâm lý của con người được đảm bảo nếu giá trị SII nhỏ hơn ngưỡng T_c = 0,14 (khi khoảng cách tương đối giữa con người và robot lớn hơn 0,9 m). Ngược lại, sự an toàn về mặt vật lý của con người bị vi phạm, dẫn đến va chạm giữa robot với con người, nếu giá trị SII lớn hơn ngưỡng tâm lý T_p = 0,54 (khi

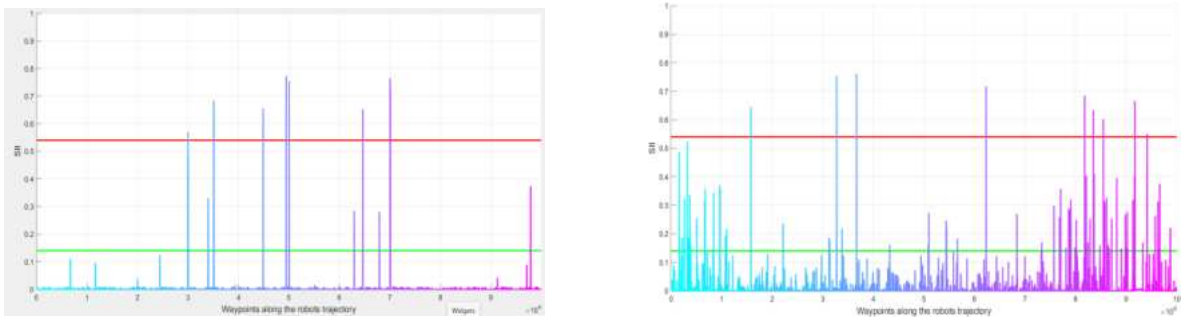
khoảng cách tương đối giữa chúng nhỏ hơn 0,5 m). Giá trị SGI bằng 1,0 khi robot di chuyển qua tâm của không gian tương tác xã hội. Sự an toàn về mặt tâm lý của con người trong tương tác nhóm hoặc tương tác giữa người và vật được đảm bảo nếu giá trị SGI nhỏ hơn ngưỡng tâm lý nhóm T_g được đặt thành 0,14. Điều đó có nghĩa là robot sẽ phải di chuyển ra ngoài ranh giới tròn của không gian tương tác xã hội.

3.2. Kết quả mô phỏng

Từ kết quả mô phỏng, xét trên chỉ số đánh giá khả năng đáp ứng yêu cầu xã hội HCSI là hai chỉ số SII, SGI được thể hiện trên Hình 10, Hình 11 và chỉ số thời gian di chuyển được đánh giá như sau:

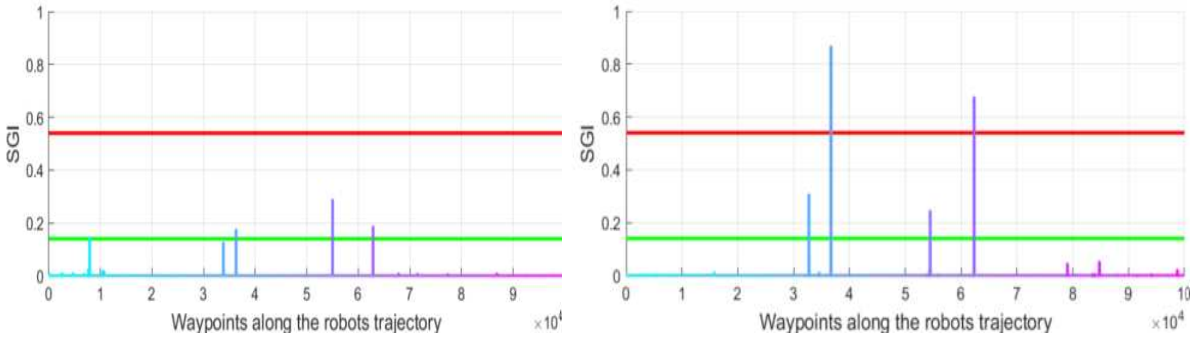
Hình 8(a) cho thấy HRVO duy trì ổn định chỉ số SII dưới ngưỡng tâm lý (Tc=0,14), đảm bảo khoảng cách an toàn giữa robot và con người. Dù xuất hiện một số đỉnh vượt ngưỡng vật lý (Tp=0,54) ở các waypoint từ 3×10^4 đến 7×10^4, những trường hợp này khá thưa thớt, cho thấy HRVO vẫn đáng tin cậy trong môi trường phức tạp. Trong khi đó, Hình 8(b) sử dụng thuật Teb cho thấy sự dao động lớn hơn, với nhiều giá trị SII vượt ngưỡng tâm lý và vật lý, đặc biệt từ waypoint 5×10^4 đến 10×10^4. Điều này phản ánh nguy cơ va chạm cao và khó khăn trong duy trì an toàn.

Hình 9(a)sử dụng mô hình HRVO thì chúng ta thấy hầu hết các giá trị SGI duy trì ở mức rất thấp và nằm dưới ngưỡng đỏ, thể hiện khả năng tránh nhóm người hiệu quả của thuật toán. Tần suất xuất hiện giá trị SGI vượt ngưỡng đỏ là rất ít. Còn với thuật toán TEB thể hiện ở Hình 9(b), cơ bản các giá trị SGI ở mức thấp, nhưng với sự xuất hiện của nhiều đỉnh SGI cao hơn, đặc biệt tại các vị trí khoảng 2×10^4 và 4×10^4**.** Một số giá trị SGI đã vượt ngưỡng đỏ, cho thấy nguy cơ va chạm tăng cao hơn so với biểu đồ đầu tiên Hình 9(a). Thể hiện nguy cơ tiềm ẩn khi robot tiếp cận các nhóm đông người hoặc tình huống phức tạp.



a) *b)*

Hình 8: Kết quả chỉ số SII trong mô phỏng: a) Chỉ số SII của thuật toán HRVO; b) Chỉ số SII của thuật toán TEB



a) b)

Hình 9. So sánh chỉ số SGI trong mô phỏng: a) chỉ số SGI của thuật toán HRVO; b) Chỉ số SGI của thuật toán TEB

Bên cạnh đó chỉ số thời gian đến mục tiêu cũng thể hiện chính xác cho hai thuật toán. Với thuật toán HRVO thời gian từ vị trí bắt đầu đến vị trí mục tiêu là 188.9169(s), trong khi đó thời gian đến mục tiêu của robot áp dụng thuật toán TEB là 165.326(s). Như vậy dựa trên phân tích thuật toán và đánh giá qua mô phỏng ta thấy thuật toán TEB ưu tiên cho việc lập kế hoạch chuyển động tới vị trí mục tiêu hơn thuật toán HRVO.

Tóm lại dựa trên kết quả mô phỏng và phân tích các chỉ số SII, SGI và thời gian đến mục tiêu chúng ta thấy: HRVO vượt trội hơn về an toàn, cả khi tương tác với các vật cản động (SII) và các nhóm người (SGI). Lựa chọn thuật toán phù hợp phụ thuộc vào yêu cầu cụ thể của ứng dụng: nếu an toàn là ưu tiên, HRVO là lựa chọn tốt hơn; nếu yêu cầu thời gian đến mục tiêu là yếu tố chính, TEB sẽ phù hợp hơn.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã tiến hành so sánh hai thuật toán dẫn đường robot phổ biến là HRVO và TEB. Cả hai thuật toán đều đã được ứng dụng thành công trong việc điều hướng robot di động trong môi trường thực tế với con người, nhưng hiệu quả của chúng trong việc tránh chướng ngại vật lại có sự khác biệt rõ rệt. Dựa trên thử nghiệm trong môi trường mô phỏng và đánh giá thông qua các chỉ số SII và SGI, thuật toán HRVO, với khả năng tận dụng thông tin vị trí và vận tốc của các tác nhân, đã cho thấy khả năng đảm bảo an toàn tốt hơn và tương tác hài hòa hơn với con người so với TEB Local Planner, vốn tập trung vào việc tối ưu quỹ đạo nhưng ít hiệu quả hơn trong các tình huống phức tạp liên quan đến nhiều tác nhân di chuyển.

Tài liệu tham khảo

[1] Autonomous Mobile Robots in Factory Logistics: A Review DAVID NITZAN, "*Development f Intelligent Robots: Achievements and Issues*", in jeee journal of robotics and automation, vol. fa-1, no. 1, march 1985

[2] Fragapane, G., Hvolby, H. H., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2020, August), "Autonomous mobile robots in hospital logistics". In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 672-679). Cham: Springer International Publishing.

[3] Snape, J., Van Den Berg, J., Guy, S. J., & Manocha, D. (2011), "The hybrid reciprocal velocity obstacle". *IEEE Transactions on Robotics*, *27*(4), 696-706.

[4] . Snape, J., Van Den Berg, J., Guy, S. J., & Manocha, D. (2009, October), "Independent navigation of multiple mobile robots with hybrid reciprocal velocity obstacles". In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 5917-5922).

[5] S. Quinlan and O. Khatib, "Elastic bands: connecting path planning and control". in *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1993, pp. 802{807.

[6] Nguyen, L. A., Pham, T. D., Ngo, T. D., & Truong, X. T. (2020, June). A proactive trajectory planning algorithm for autonomous mobile robots in dynamic social environments. In *2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)* (pp. 309-314). IEEE.

[7] Le, H. T., Nguyen, D. T., & Truong, X. T. (2021, December). Socially aware robot navigation framework in crowded and dynamic environments: A comparison of motion planning techniques. In *2021 8th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)* (pp. 95-101). IEEE.

[8] Gokul, P. (2023, August). Bluff: A Multi-Robot Dispersion Based on Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles to Solve the Blind Man's Buff Problem. In *6th EAI International Conference on Robotic Sensor Networks* (p. 41). Springer Nature.

[9] Marin-Plaza, P., Hussein, A., Martin, D., & Escalera, A. D. L. (2018). Global and local path planning study in a ROS-based research platform for autonomous vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, *2018*(1), 6392697.

[10] Imamoglu, M. R., Sumer, E., & Temeltas, H. (2023, November). A Comparison of Local Planner Algorithms for a ROS-based Omnidirectional Mobile Robot. In *2023 8th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)* (pp. 26-30). IEEE.

[11] J. van den Berg, C. L. Ming, and D. Manocha, "Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008, pp. 1928 – 1935.

[12] Truong, Xuan-Tung, and Trung-Dung Ngo. ""To approach humans?": A unified framework for approaching pose prediction and socially aware robot navigation." *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* 10, no. 3 (2017): 557-572.

Research and Evaluation of Motion Planning Algorithms in the Pedsim Environment for Robots Operating in a Crowded Environment

Abstract*: This paper analyzes and compares the effectiveness of the HRVO (Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles) model and the TEB Local Planner (Timed Elastic Band Local Planner) in crowded and complex environments based on two main criteria: the ability to avoid collisions with obstacles and the ability to comply with social rules. HRVO considers the current position and velocity to compute a new velocity for the mobile robot, ensuring collision avoidance by utilizing velocity space constraints. In contrast, the TEB Local Planner optimizes the trajectory in both space and time, integrating kinematic constraints and obstacle avoidance costs to generate smooth motion paths. The evaluation methodology is conducted through experiments in a simulated environment. The experimental results assess the path-planning performance towards the target, dynamic obstacle avoidance, and compliance with social norms for both algorithms in a crowded environment.*

Keywords**:** Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles(HRVO), Timed Elastic Band Local Planner(TEB).

Xây dựng thuật toán dẫn đường cho UAV tự hành trong môi trường động

Lê Ngọc Quỳnh*, Lê Trọng Nghĩa, Trần Công Tân, Trương Xuân Tùng
Viện TL và KTĐK, Học viện Kỹ Thuật Quân sự
*Email: ngocquynhhp0209@gmail.com; Tel: +84-976-508-076

Tóm tắt

Lĩnh vực phát triển các hệ thống điều khiển cho phương tiện bay không người lái (UAVs) ngày càng thu hút sự quan tâm mạnh mẽ từ cộng đồng nghiên cứu và ứng dụng. Đặc biệt trong các môi trường phức tạp như đô thị, rừng rậm hay khu công nghiệp, khả năng dẫn đường tự động và tránh vật cản của UAV là yêu cầu tiên quyết để đảm bảo an toàn và hiệu quả trong quá trình hoạt động. Bài báo trình bày một nghiên cứu về phát triển thuật toán dẫn đường cho UAV có thể tự phát hiện và tránh các vật cản động trong môi trường. Thông qua việc sử dụng kết hợp thông tin từ các cảm biến như Lidar, IMU, thuật toán được đề xuất có khả năng tối ưu hóa quỹ đạo bay và gia tăng tính ổn định trong các tình huống phức tạp. Các mô hình toán học và mô phỏng trên hệ điều hành ROS kết hợp với môi trường Gazebo được sử dụng để đánh giá hiệu quả của thuật toán đề xuất.

Từ khóa: *Tránh vật cản; lập kế hoạch đường đi; máy bay không người lái; tối ưu hóa.*

1. Giới thiệu vấn đề nghiên cứu

Lập kế hoạch đường đi là một trong những thành phần cốt lõi của hệ thống điều khiển bay tự động cho quadrotor, đặc biệt trong các ứng dụng phức tạp như khảo sát địa hình, tìm kiếm cứu nạn, hay giám sát công trình. Việc tạo ra các đường đi an toàn, hiệu quả và mượt mà là yếu tố quyết định để quadrotor thực hiện thành công nhiệm vụ trong môi trường đa dạng.

Một trong những thách thức lớn nhất trong lập kế hoạch đường đi cho quadrotor là vấn đề thích ứng với môi trường động, nơi có các vật cản di chuyển hoặc thay đổi theo thời gian, và môi trường chưa biết, nơi mà bản đồ không được cung cấp trước. Các thuật toán cần phải có khả năng phát hiện, tránh các vật cản, và tái lập kế hoạch đường đi một cách nhanh chóng. Một thách thức nữa là các ứng dụng thực tế đòi hỏi việc lập kế hoạch phải hoạt động trong thời gian thực để đáp ứng được tốc độ và tính linh hoạt của quadrotor. Điều này đòi hỏi các thuật toán phải có chi phí tính toán thấp và có khả năng xử lý nhanh chóng các thông tin từ cảm biến.

Có nhiều phương pháp lập kế hoạch đường đi tránh vật cản cho quadrotor đã được đề xuất như: Tối ưu hóa quỹ đạo dựa trên gradient [1, 2], phương pháp này rất phổ biến trong lập kế hoạch đường đi cho quadrotor do khả năng tạo ra các quỹ đạo mượt mà và khả thi về mặt động học. Phương pháp lập kế hoạch dựa trên không gian an toàn bằng cách tạo ra một vùng an toàn xung quanh đường đi dự kiến và tối ưu hóa quỹ đạo trong vùng đó [3]. Lập kế hoạch đường đi dựa trên mẫu: tiêu biểu như RRT*, sử dụng các mẫu ngẫu nhiên để khám phá không gian trạng thái và tạo ra các đường đi khả thi [4]. Lập kế hoạch đường đi dựa trên tìm kiếm động học, xem xét cả ràng buộc về động học của quadrotor trong quá trình tìm kiếm đường đi [5]. Thuật toán tối ưu hóa quỹ đạo di chuyển của UAV dựa trên giải thuật di truyền và thuật toán xấp xỉ lồi liên tiếp [6].

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một phương pháp lập kế hoạch đường đi cho quadrotor: i) sử dụng thông tin từ cảm biến IMU, Lidar 3D để phát hiện các vật cản động, ii)

sử dụng thuật toán kinodynamic A* để lập kế hoạch chuyển động tránh vật cản, trong đó có xét đến các ràng buộc động học.

Phần tiếp theo của bài báo được tổ chức như sau: trong Phần 2 trình bày về bài toán tìm kiếm đường đi tối ưu tránh vật cản có tính đến các ràng buộc động học cho quadrotor; trong Phần 3 sẽ trình bày về phương pháp lập kế hoạch dẫn đường sử dụng gói xác định vị trí và lập bản đồ FAST-LIO2 [7] và thuật tìm kiếm động học kinodynamic A* [8]; các mô phỏng, kiểm chứng kết quả được trình bày trong phần 4 và phần cuối là kết luận và hướng phát triển của nghiên cứu.

2. Đặt vấn đề

Đặt $\mathrm{X} \in^{-3n}$ là tập không gian trạng thái và $\mathbf{x}(t) \in \mathrm{X}$ là vector trạng thái của hệ quadrotor trong không gian X, bao gồm các thành phần vị trí và $n-1$ đạo hàm của vị trí (các thành phần về vận tốc, gia tốc, …). Đặt $\mathrm{X}^{free} \subset \mathrm{X}$ là tập không gian trạng thái không có vật cản; $\mathrm{P}^{free} \subset \urcorner^{3}$ là tập vị trí tương ứng trong không gian trạng thái không có vật cản và $\mathrm{D}^{free} \subset^{-3(n-1)}$ là tập các trạng thái động học có ràng buộc của hệ (tập các thành phần vận tốc, gia tốc, … thỏa mãn các điều kiện ràng buộc động học. Khi đó ta có: $\mathrm{P}^{free} \times \mathrm{D}^{free} = \mathrm{X}^{free}$. Đặt $\mathrm{X}^{obs} \subset^{-3n}$ là tập không gian trạng thái có vật cản, khi đó $\mathrm{X}^{free} \cup \mathrm{X}^{obs} = \mathrm{X}$.

Theo [8], các đầu vào điều khiển của hệ thống có thể xây dựng dưới dạng đa thức tham số thời gian độc lộc trên mỗi trục. Do đó ta có quỹ đạo trạng thái hệ thống được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{x}(t) = [p(t)^T, \dot{p}(t)^T, ..., p^{(n-1)}(t)^T]^T \tag{1}$$

với đầu vào điều khiển là $p^{(n)}(t) = u(t)$, trong đó,

$$p(t) = \sum_{k=0}^{K} d_k \frac{t^k}{k!} = d_K \frac{t^K}{K!} + ... + d_1 t + d_0 \in \urcorner^{3} \tag{2}$$

và $D = \left[d_0, d_1, ..., d_K\right] \in \urcorner^{3(K+1)}$ là các hệ số đa thức. Chú ý rằng đầu vào điều khiển chịu ràng buộc động học $u(t) \in \mathrm{U} = [-u_{max}, u_{max}]^3 \subset^{-3}$. Biểu diễn hệ thống dưới dạng mô hình không gian trạng thái ta được:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \tag{3}$$

trong đó,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_3 \end{pmatrix}$$

Bài toán lập kế hoạch quỹ đạo trạng thái tối ưu, tránh vật cản, thỏa mãn các ràng buộc động học được phát biểu như sau:

Bài toán: Cho một trạng thái ban đầu $\mathbf{x}_0 \in \mathrm{X}^{free}$ và một vùng mục tiêu $\mathrm{X}^{goal} \subset \mathrm{X}^{free}$, tìm các tham số quỹ đạo trạng thái dạng đa thức $D \in^{-3(K+1)}$ và thời gian $T \geq 0$ sao cho:

$$\begin{aligned} &\min_{D,T}(J(D)+\rho T) \\ &\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}u(t),\forall t\in[0,T] \\ &\mathbf{x}(0)=\mathbf{x}_0,\mathbf{x}(T)\in \mathrm{X}^{goal} \\ &\mathbf{x}(T)\in \mathrm{X}^{free},u(t)\in \mathrm{U},\forall t\in[0,T] \end{aligned} \tag{4}$$

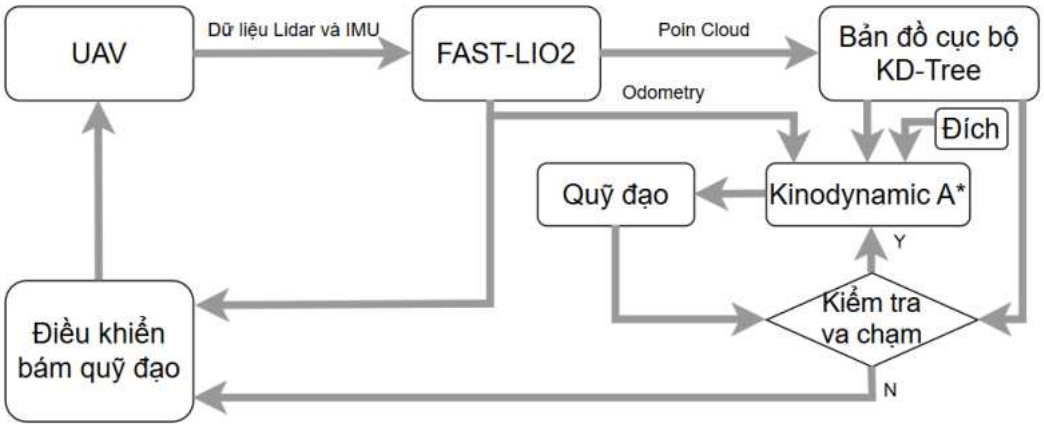
với $J(D)$ là hàm chi phí về mặt tín hiệu điều khiển được định nghĩa như sau:

$$J(D)=\int_0^T \left\|u(t)\right\|^2 dt=\int_0^T \left\|p^{(n)}(t)\right\|^2 dt \tag{5}$$

và $\rho\geq 0$ là tham số thể hiện tầm quan trọng tương đối của thời gian đạt được trạng thái nằm trong X^{goal} với chi phí về mặt tín hiệu điều khiển $J(D)$.

3. Lập kế hoạch chuyển động tối ưu tránh vật cản

Hệ thống dẫn đường và điều khiển chuyển động của quadrotor bao gồm 3 phần: xác định vị trí và lập bản đồ; lập kế hoạch chuyển động; điều khiển chuyển động báo quỹ đạo. Trong bài báo sẽ trình bày về phần xác định vị trí và lập bản đồ và phần lập kế hoạch chuyển động. Sơ đồ thuật toán như Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ thuật toán

Dữ liệu từ cảm biến Lidar 3D và cảm biến IMU được đưa đến khối xác định vị trí và lập bản đồ FAST-LIO2. Khối này tính toán trạng thái của quadrotor và xây dựng một bản đồ cục bộ lữu trữ dưới dạng các KD-Tree. Mỗi lần FAST-LIO tính toán được 1 lần quét dữ liệu mới sẽ cập nhật bản đồ cục bộ và tiến hành kiểm tra va chạm trên quỹ đạo hiện tại. Khi xảy ra va chạm thuật toán kinodynamic A* được sử dụng để lập lại quỹ đạo chuyển động.

3.1 Lập bản đồ cục bộ

Nhiệm vụ xác định vị trí và lập bản đồ (SLAM) cho quadrotor được thực hiện bằng thuật FAST-LIO2: sử dụng bộ lọc Kalman lặp lại và quy trình lan truyền ngược để kết hợp dữ liệu từ cảm biến IMU và Lidar [7].

Có nhiều cách tổ chức bản đồ để biểu diễn không gian môi trường. Phổ biến nhất là bản đồ lưới chiếm dụng (Occupancy Grid Map) [9, 10], một phương pháp chia không gian thành các ô lưới, trong đó mỗi ô biểu thị xác suất bị chiếm dụng. Phương pháp này có ưu điểm là dễ

dàng triển khai, trực quan, và phù hợp với nhiều thuật toán SLAM hiện đại. Tuy nhiên, nhược điểm chính của bản đồ lưới chiếm dụng là tiêu tốn nhiều bộ nhớ khi kích thước bản đồ lớn hoặc yêu cầu độ phân giải cao, đồng thời khả năng xử lý không gian liên tục còn hạn chế.

Ngoài ra, một số nghiên cứu sử dụng bản đồ trường khoảng cách Euclid (Euclidean Signed Distance Field - ESDF) [11, 12]. Đây là một loại bản đồ biểu diễn khoảng cách ngắn nhất từ một điểm bất kỳ trong không gian đến bề mặt của vật thể. Bản đồ ESDF có ưu điểm là cung cấp thông tin chi tiết về khoảng cách, hữu ích trong việc lập kế hoạch đường đi và tránh va chạm. Tuy nhiên, việc xây dựng ESDF đòi hỏi tài nguyên tính toán lớn, đặc biệt đối với môi trường phức tạp hoặc có độ động cao.

Để tối ưu hóa cả về hiệu quả lưu trữ và khả năng tính toán, bài báo sử dụng bản đồ KD-Tree [13]. Phương pháp này sử dụng cấu trúc cây phân vùng không gian để biểu diễn môi trường, giúp giảm thiểu đáng kể bộ nhớ sử dụng so với lưới chiếm dụng và tăng tốc độ truy vấn so với ESDF. Bản đồ KD-Tree không chỉ phù hợp với môi trường có độ phân giải cao mà còn hỗ trợ tốt các ứng dụng thời gian thực trong bài toán SLAM.

Trong bài toán lập kế hoạch đường đi tránh vật cản động, việc lưu trữ bản đồ của toàn bộ không gian mà quadrotor đã đi qua là không cần thiết vì gây lãng phí tài nguyên và mất nhiều thời gian để tính toán. Hơn nữa, việc lưu trữ toàn bộ bản đồ trong quá trình di chuyển dẫn đến trường hợp khi vật cản động đã đi qua nhưng vẫn được đánh dấu là có vật cản. Mặt khác nếu chỉ sử dụng dữ liệu từ IMU và Lidar trong 1 lần cập nhật có thể không đủ để bao phủ toàn bộ tầm nhìn dẫn đến bản đồ có độ phân giải không đủ cao và nguy cơ bỏ qua các vật cản nhỏ. Do đó, chúng ta sẽ lập một bản đồ cục bộ và lưu trữ trong một khoảng thời gian nhất định. Dữ liệu từ cảm biến IMU và cảm biến Lidar 3D được sử dụng để ước tính vị trí và lập 1 bản đồ cục bộ.

Bản đồ cục bộ được lưu trữ dưới dạng 2 KD-Tree gia tăng [13], một cây tĩnh và một cây động. Cây tĩnh đặc trưng cho môi trường xung quanh, cây động đặc trưng cho những thay đổi trong môi trường như xuất hiện vật cản động. Việc xác định thời gian lưu trữ bản độ phụ thuộc vào tốc độ cập nhật dữ liệu của cảm biến IMU, tốc độ cập nhật và trường nhìn của Lidar. Mỗi khi nhận một lần quét mới, bản đồ cục bộ lưu trữ trong cây động được cập nhật lại. Khi cây động được lấp đầy, quá trình cập nhật chuyển sang cây tĩnh và cây động hiện tại được xem là cây tĩnh mới. Thuật toán cập nhật cây KD-Tree như sau:

Thuật toán 1: Cập nhật bản đồ cục bộ KD-Tree

Đầu vào: Đám mấy điểm mới của 1 lần quét từ thuật toán FAST-LIO, *NewPoints*

Đầu ra: Các cây $KDTree$

Tham số: Số cây KD-Tree, $N = 2$; số lần quét dữ liệu lưu trữ trong 1 cây, H.

1: **if** $ScanInputNum \geq H.N$ **then**
2: $ScanInputNum = 0$;
3: $TreeInputNum = 0$;
4: **else**
5: $TreeInputNum = \text{floor}(ScanInputNum / H)$;
6: **endif**

7: **if** $ScanInputNum \bmod H = 0$ **then**
8: $CloudAccumulate.Clear()$
9: $CloudAccumulate = NewPoints$
10: **else**
11: $CloudAccumulate.add(NewPoints)$
12: **endif**
13 $CloudFilterd = VoxelGridFilter(CloudAccumulate)$
14 $KDTree[TreeInputNum].build(CloudFilterd)$
15 $ScanInputNum = ScanInputNum + 1$

Quá trình cập nhật 2 cây KD-Tree được thực hiện tuần tự, khi nhận một lần quét dữ liệu mới từ thuật toán FAST-LIO2, kiểm tra xem 2 cây KD-Tree đã được lấp đầy chưa (dòng 1), nếu đã được lấp đầy quá trình cập nhật quay lại cây đầu tiên (dòng 2 - 3). Khi 2 cây chưa được lấp đầy, tiến hành xác định cây đang được cập nhật (dòng 5). Nếu cây hiện tại được lấp đầy (dòng 7) tiến hành xóa biến $CloudAccumulate$ lưu trữ đám mây điểm tích lũy (dòng 8) và thực hiện tích lũy lại (dòng 9). Nếu cây hiện tại chưa được lấp đầy, tiến hành thêm dữ liệu lần quét mới vào biến $CloudAccumulate$ (dòng 10). Dữ liệu tích lũy sau mỗi lần quét mới được giảm mẫu để giảm thiểu quá trình tính toán (dòng 13) và sau đó được sử dụng để xây dựng cây KD-Tree. Các hàm trong Thuật toán 1 được sử dụng từ thư viện $Point\ Cloud\ Library\ (PCL)$ [14].

3.2 Thuật toán tìm đường tối ưu tránh vật cản

Thuật toán tìm đường tránh vật cản sử dụng phương pháp dựa trên các nguyên mẫu chuyển động và áp dụng thuật toán kinodynamic A* [8]. Khi hệ thống nhận trạng thái đích mới hoặc khi phát hiện vật cản trên quỹ đạo chuyển động hiện tại, thuật toán kinodynamic A* được sử dụng để lập lại kế hoạch đường đi an toàn. Thuật toán kinodynamic A* giúp giải quyết bài toán tối ưu hóa quỹ đạo toàn cục để có được các quỹ đạo mượt mà, khả thi về mặt động học, tránh va chạm và có thời gian tối thiểu trong thời gian thực. Điều này được thực hiện bằng việc chuyển đổi bài toán điều khiển tối ưu thành bài toán tìm kiếm đồ thị và sử dụng hàm heuristic dựa trên nghiệm tường minh của bài toán tối thiểu thời gian bậc hai tuyến tính (Linear Quadratic Minimun Time) [15].

Các nguyên mẫu chuyển động được tạo ra bằng việc phân rã không gian điều khiển trong bài toán 1 thành các tín hiệu điều khiển rời rạc. Với mỗi tín hiệu rời rạc, ta đặt làm đầu vào hệ thống trong một khoảng thời gian nhất định (τ) và thu được một quỹ đạo trạng thái thỏa mãn ràng buộc động học được gọi là các nguyên mẫu chuyển động. Kiểm tra va chạm sẽ được thực hiện trên mỗi nguyên mẫu chuyển động, khi nguyên mẫu chuyển động không có va chạm và thỏa mãn các ràng buộc động học thì trạng thái cuối của nó sẽ được thêm vào đồ thị. Quá trình như vậy sẽ được thực hiện tuần tự đến khi đạt được điểm mục tiêu. Cuối cùng ta thu được một đồ thị gồm các đỉnh là các trạng thái cuối có thể đạt được của hệ thống (trạng thái cuối của mỗi nguyên mẫu chuyển động thỏa mãn điều kiện tránh va chạm và các ràng buộc động học); các cạnh của đồ thị là quỹ đạo trạng thái của mỗi nguyên mẫu chuyển động đưa hệ thống từ đỉnh đồ thị này sang đỉnh đồ thị kia.

Theo [8] việc sử dụng tín hiệu đầu vào là các đạo hàm cấp cao của vị trí $p(t)$ là không cần thiết và gây lãng phí thời gian tính toán. Ở đây ta chọn gia tốc là đầu vào điều khiển và

phân rã không gian gia tốc theo mỗi hướng thành 3 giá trị: $[-a_{\max}, 0, a_{\max}]$, như vậy với mỗi khoảng thời gian τ sẽ có 27 nguyên mẫu chuyển động.

Việc kiểm tra quỹ đạo chuyển động hiện tại có an toàn không được thực hiện sau mỗi lần quét dữ liệu mới. Quá trình kiểm tra này đơn giản hơn so với quá trình kiểm tra va chạm với mỗi nguyên mẫu chuyển động trong kinodynamic A*, vì ta chỉ cần kiểm tra các điều kiện về vị trí $\mathcal{P}^{free}$. Quá trình kiểm tra được thực hiện như sau:

Thuật toán 2: Kiểm tra va chạm trên quỹ đạo hiện tại

Đầu vào: Bản đồ cục bộ *KDTree*, tọa độ điểm cần kiểm tra
Đầu ra: Biến kiểu Bool chỉ ra rằng có va chạm hay không
Tham số: Số cây *KDTree*, $N = 2$; khoảng cách an toàn: *SAFE _ DIST*

```
for i = 1 to 2 do
    if KDTree[i].nearestKSearch > 0
        if pointNKNSquareDistance < SAFE _ DIST
            return true
        endif
    endif
    return false
endfor
```

Thuật toán duyệt qua 2 cây *KDTree* và tìm kiếm điểm gần nhất với điểm đang cần kiểm tra ở mỗi cây. Điều này có thể dễ dàng thực hiện với phương thức *nearestKSearch* trong thư viện *PCL*. Tiến hành so sánh khoảng cách từ điểm kiểm tra đến điểm gần nhất trong *KDTree* với khoảng cách an toàn để xác định quỹ đạo hiện tại có xảy ra va chạm hay không.

4. Kết quả mô phỏng và kết luận

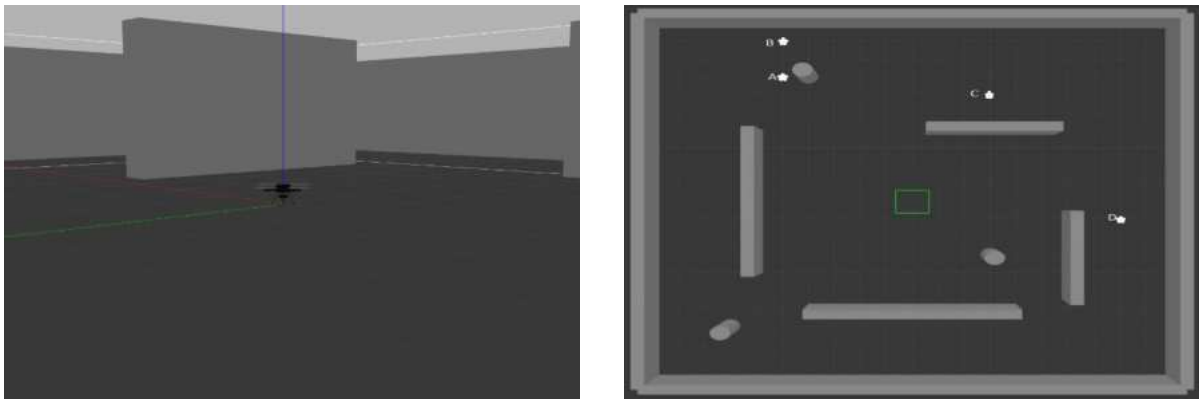
Trong phần này, mô phỏng trên hệ điều hành ROS và môi trường Gazebo được thực hiện để kiểm chứng hiệu quả của thuật toán. Các tham số mô phỏng như sau:

Bảng 1. Bảng tham số mô phỏng

	Tham số	Giá trị
Cảm biến IMU	Tần số cập nhật	100 Hz
Cảm biến Lidar 3D Velodyne VLP-32	Tần số cập nhật	20 Hz
	Số tia quét đồng thời theo chiều dọc	32
	Số mẫu theo chiều ngang	1875
	Góc quét theo chiều ngang	-180° ÷ 180°
	Góc quét theo chiều dọc	-15° ÷ 15°
	Khoảng cách tối đa	130 m
	Độ phân giải	1 cm
Bản đồ cục bộ	Số lần quét lưu trữ trong 1 cây KDTree	50
Thuật toán kiểm tra va chạm	Khoảng cách an toàn	0,3 m

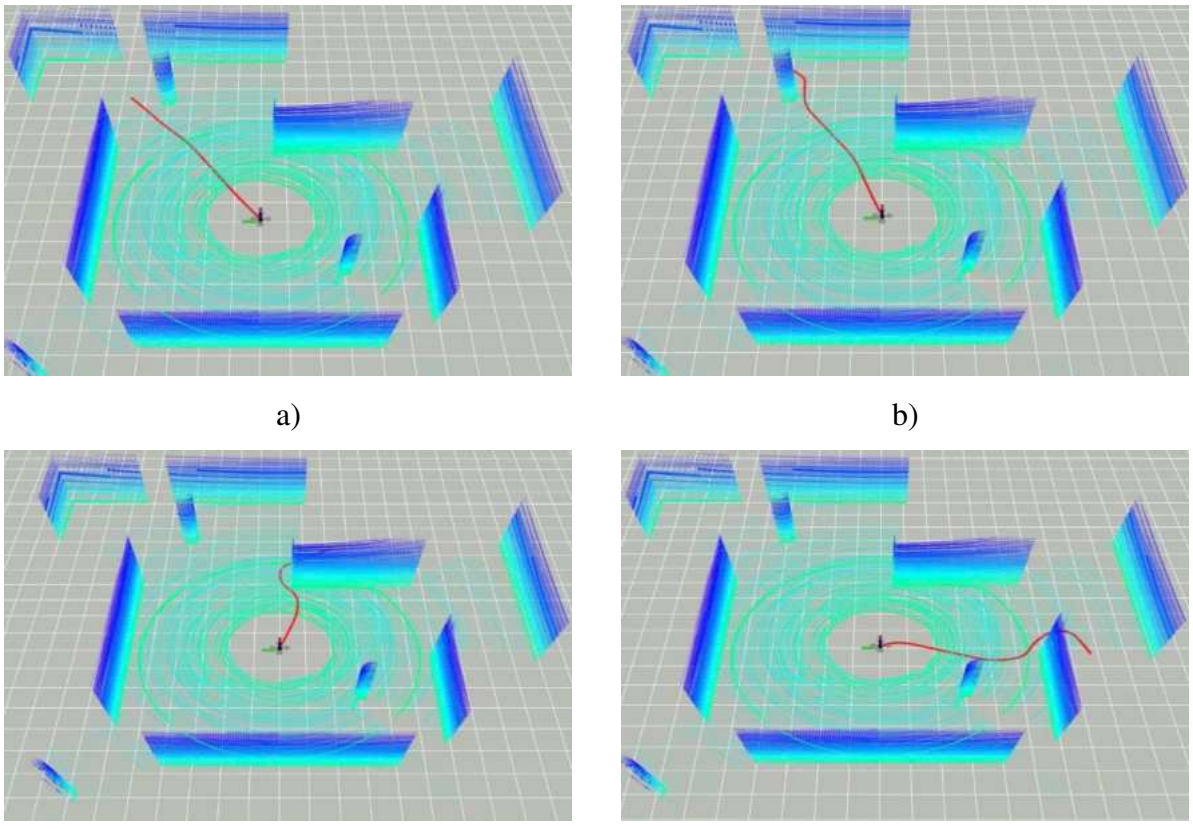
Kịch bản mô phỏng: Môi trường mô phỏng được xây dựng dạng trong nhà, với các vật cản tĩnh như tường và cột. Quadrotor xuất phát ở vị trí có tọa độ $(0,0,0)$. Lập quỹ đạo chuyển động đến các vị trí $A(7,6,1)$, $B(9,6,1)$, $C(7,-1,1)$, $D(-8,-1,1)$ được đánh dấu trên Hình 2b.

Một bản đồ cục bộ được xây dựng từ mô đun lập kế bản đồ cục bộ FAST-LIO2 như Hình 3. Trên bản đồ thể hiện các vật cản nằm trong trường nhìn của Lidar 3D như cột, tường. Trên Hình 3a thể hiện đường đi đến điểm A, trên đường đi không có vật cản, một quỹ đạo tối ưu đến điểm đích được thiết lập. Trên đường đi đến điểm B, có vật cản dạng cột trụ, đường đi được thiết lập vòng tránh cột (Hình 3b). Tương tự khi gặp các vật cản là các bức tường, thuật toán lập quỹ đạo đường đi tối ưu tránh vật cản (Hình 3c, Hình 3d).



a) b)

Hình 2. Môi trường mô phỏng và các điểm đích

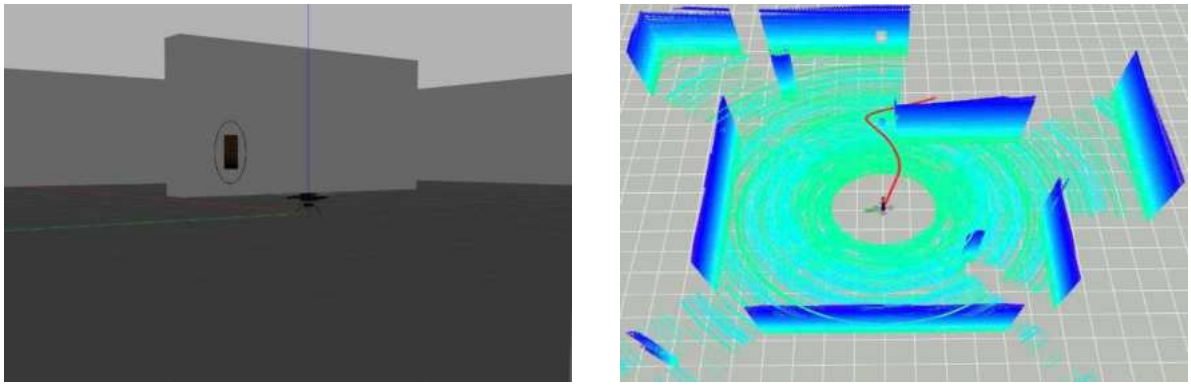


a) b)

c) d)

Hình 3. Kết quả mô phỏng tìm đường đi đến các điểm trong bản đồ

Hình 4 minh họa khi có vật cản nhỏ xuất hiện trên đường đi hiện tại (Hình 4a), mô đun lập lại kế hoạch đường đi được kích hoạt và tạo ra một quỹ đạo đường đi khác an toàn hơn.



a) b)

Hình 4. Kết quả mô phỏng khi có vật cản xuất hiện trên đường đi hiện tại

5. Kết luận và hướng phát triển

Bài báo đã trình bày 1 phương pháp dẫn đường cho UAV tự hành dạng quadrotor, trong đó, mô đun lập kế hoạch đường đi dựa trên thuật toán kinodynamic A* được liên kết với một mô đun xác định vị trí và xây dựng bản đồ FAST-LIO2. Bản đồ số được xây dựng là một bản đồ cục bộ được tổ chức dưới dạng các KD-Tree. Mô phỏng trên hệ điều hành ROS và môi trường Gazebo đã minh chứng hiệu quả của phương pháp.

Các nghiên cứu trong tương lai tập trung vào cải thiện tính tối ưu của thuật toán và triển khai trên quadrotor thực tế để đánh giá hiệu quả của phương pháp bằng thực nghiệm.

Tài liệu tham khảo

[1] X. Zhou, Z. Wang, H. Ye, C. Xu, and F. Gao, "EGO-Planner: An ESDF-Free Gradient-Based Local Planner for Quadrotors," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 478–485, Apr. 2021, doi: 10.1109/LRA.2020.3047728.

[2] X. Zhou, J. Zhu, H. Zhou, C. Xu, and F. Gao, "EGO-Swarm: A Fully Autonomous and Decentralized Quadrotor Swarm System in Cluttered Environments," in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2021, pp. 4101–4107. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561902.

[3] S. Liu *et al.*, "Planning Dynamically Feasible Trajectories for Quadrotors Using Safe Flight Corridors in 3-D Complex Environments," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 1688–1695, Jul. 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2663526.

[4] H. Gao, X. Hou, J. Xu, and B. Guan, "Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicle Path Planning Based on the Target Bias Extension and Dynamic Step Size RRT* Algorithm," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/wevj15010029.

[5] R. E. Allen and M. Pavone, "A real-time framework for kinodynamic planning in dynamic environments with application to quadrotor obstacle avoidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 115, pp. 174–193, May 2019, doi: 10.1016/j.robot.2018.11.017.

[6] J. Zheng and K. Liu, “3D UAV Trajectory Planning with Obstacle Avoidance for UAV-enabled Time-Constrained Data Collection Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3419842.
[7] W. Xu, Y. Cai, D. He, J. Lin, and F. Zhang, “FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-Inertial Odometry,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 4, pp. 2053–2073, Aug. 2022, doi: 10.1109/TRO.2022.3141876.
[8] S. Liu, N. Atanasov, K. Mohta, and V. Kumar, “Search-based motion planning for quadrotors using linear quadratic minimum time control,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 2017, pp. 2872–2879. doi: 10.1109/IROS.2017.8206119.
[9] S. Liu, M. Watterson, S. Tang, and V. Kumar, “High speed navigation for quadrotors with limited onboard sensing,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2016, pp. 1484–1491. doi: 10.1109/ICRA.2016.7487284.
[10] F. Gao, L. Wang, B. Zhou, X. Zhou, J. Pan, and S. Shen, “Teach-Repeat-Replan: A Complete and Robust System for Aggressive Flight in Complex Environments,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 5, pp. 1526–1545, Oct. 2020, doi: 10.1109/TRO.2020.2993215.
[11] H. Oleynikova, Z. Taylor, M. Fehr, R. Siegwart, and J. Nieto, “Voxblox: Incremental 3D Euclidean Signed Distance Fields for on-board MAV planning,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 2017, pp. 1366–1373. doi: 10.1109/IROS.2017.8202315.
[12] L. Han, F. Gao, B. Zhou, and S. Shen, “FIESTA: Fast Incremental Euclidean Distance Fields for Online Motion Planning of Aerial Robots,” in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Oct. 2019, pp. 4423–4430. doi: 10.1109/IROS40897.2019.8968199.
[13] Y. Cai, W. Xu, and F. Zhang, “ikd-Tree: An Incremental K-D Tree for Robotic Applications,” Feb. 22, 2021, *arXiv*: arXiv:2102.10808. doi: 10.48550/arXiv.2102.10808.
[14] M. Muja and D. Lowe, “FLANN - Fast Library for Approximate Nearest Neighbors User Manual,” *Computer Science Department, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada*, vol. 5, 2009.
[15] E. I. Verriest and F. L. Lewis, “On the linear quadratic minimum-time problem,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 7, pp. 859–863, Jul. 1991, doi: 10.1109/9.85066.

Developing a navigation algorithm for UAVs in dynamic environments

Abstract*: The field of developing control systems for unmanned aerial vehicles (UAVs) is increasingly attracting strong attention from the research and application community. Especially in complex environments such as urban, dense forest or industrial areas, the ability to automatically navigate and avoid obstacles of UAVs is a prerequisite to ensure safety and efficiency during operation. This paper presents a study on developing a navigation algorithm for UAVs that can automatically detect and avoid dynamic obstacles in the environment. Through the combined use of information from sensors such as Lidar, IMU, the proposed algorithm is capable of optimizing flight trajectories and increasing stability in complex situations. Mathematical models and simulations on the ROS operating system combined with the Gazebo environment are used to evaluate the effectiveness of the proposed algorithm.*

Keywords: Obstacle avoidance; path planning; quadrotor; optimization

Ứng dụng hộp giới hạn định hướng từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 cho bài toán theo dõi nhiều đối tượng

Vũ Minh Nhương*, Nguyễn Văn Xuân, Nguyễn Lan Anh, Trương Xuân Tùng

[1]*Học viện Kỹ thuật quân sự*

*Email: vmnhuong.k45@gmail.com; Sđt: 0339456268

Tóm tắt

Ứng dụng hộp giới hạn định hướng từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 cho bài toán theo dõi nhiều đối tượng. Khi tiến hành theo dõi nhiều đối tượng trên cơ sở xử lý ảnh có rất nhiều cách ứng dụng các bộ phát hiện với các thuật toán theo dõi. Trong đề tài nghiên cứu khoa học này, tôi tập trung nghiên cứu việc áp dụng hộp giới hạn định hướng (Oriented Bounding Boxes) lấy từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 kết hợp với thuật toán DeepSort để thực hiện bài toán theo dõi nhiều đối tượng. Kết quả hộp giới hạn định hướng cho phép mô hình định dạng chính xác hơn về hình dạng và vị trí của các đối tượng trong không gian, cải thiện khả năng phân loại và theo dõi so với hộp giới hạn truyền thống.

Từ khóa: *DeepSort với hộp giới hạn định hướng; Theo dõi nhiều đối tượng với hộp giới hạn định hướng; YOLO11 hộp giới hạn định hướng.*

1. Giới thiệu về nghiên cứu

Hiện nay, đã có rất nhiều nghiên cứu về theo dõi nhiều đối tượng trên cơ sở xử lý ảnh, có thể kể ra các thuật toán như Sort, DeepSort, BOT-Sort, ByTrack, và StrongSORT [1-5]. Những nghiên cứu này đều nhằm mục đích tăng hiệu suất phát hiện và theo dõi đối tượng trong từng khung hình được cung cấp bởi camera hoặc video.

Thông thường, các nghiên cứu sẽ sử dụng một mô hình phát hiện đối tượng kết hợp với thuật toán theo dõi để giải quyết các nhiệm vụ liên kết dữ liệu, cho phép theo dõi nhiều đối tượng cùng lớp hoặc khác lớp. Để tăng hiệu suất, có những nghiên cứu tập trung vào việc cải thiện mô hình phát hiện (mô hình phát hiện càng tốt thì khả năng theo dõi càng tốt), trong khi một số khác lại tập trung vào thuật toán theo dõi (thuật toán theo dõi ảnh hưởng lớn đến độ chính xác và tốc độ xử lý).

Hầu hết các nghiên cứu theo dõi nhiều đối tượng hiện nay sử dụng các hộp giới hạn truyền thống để phát hiện và theo dõi đối tượng. Điều này dễ thực hiện vì đa số các mô hình phát hiện đều có đầu ra là hộp giới hạn truyền thống (hộp giới hạn được căn chỉnh theo trục - AABB). Tuy nhiên, AABB tồn tại một số nhược điểm: chúng có thể không khớp chặt với đối tượng, tạo ra nhiều khoảng trống không cần thiết và làm mất đi thông tin về hướng của đối tượng, dẫn đến khó khăn trong việc theo dõi và phân tích hành vi.

Đã có những nghiên cứu về hộp giới hạn định hướng (OBB) như Align Deep Features for Oriented Object Detection, Rotated RetinaNet, YOLOv8, và YOLO11 [6-9]. Những mô hình này có khả năng xoay và không bị giới hạn theo trục, được định nghĩa bởi tâm, kích thước và góc xoay của hộp, giúp bao quanh các đối tượng có hình dạng phức tạp hoặc không theo trục chính, như các đối tượng có góc nghiêng. Điều này cung cấp độ phù hợp cao hơn cho các đối tượng không hình chữ nhật.

Câu hỏi nghiên cứu đặt ra là: Liệu việc sử dụng OBB từ đầu ra của mô hình phát hiện kết hợp với thuật toán DeepSort có thể cải thiện hiệu quả và độ chính xác của bài toán theo dõi nhiều đối tượng so với việc sử dụng AABB hay không? Mục tiêu của bài báo này là ứng dụng OBB từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 kết hợp với thuật toán DeepSort, giúp các hệ thống theo dõi đối

tượng có thể phát hiện và theo dõi một cách chính xác hơn, đặc biệt trong những tình huống phức tạp và biến động lớn.

2. Các nội dung liên quan

2.1. Mô hình phát hiện YOLO11 và hộp giới hạn định hướng

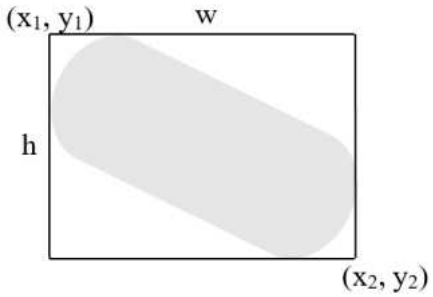
Mô hình phát hiện YOLO11 là phiên bản mới nhất trong chuỗi mô hình phát hiện đối tượng YOLO (You Only Look Once). Được công bố tại hội nghị YOLO Vision 2024 (YV24), YOLO11 đại diện cho bước tiến đáng kể trong công nghệ phát hiện đối tượng theo thời gian thực. Phiên bản mới này giới thiệu những cải tiến đáng kể về cả kiến trúc và phương pháp huấn luyện, mở rộng ranh giới về độ chính xác, tốc độ và hiệu quả.

Thiết kế sáng tạo của YOLO11 kết hợp các kỹ thuật trích xuất tính năng tiên tiến, cho phép nắm bắt chi tiết đặc trưng hơn trong khi vẫn duy trì số lượng tham số nhỏ. Điều này dẫn đến độ chính xác được cải thiện trên nhiều tác vụ thị giác máy tính khác nhau, từ phát hiện đối tượng đến phân loại. Hơn nữa, YOLO11 đạt được những bước tiến đáng kể về tốc độ xử lý, cải thiện đáng kể khả năng hiệu suất theo thời gian thực [11].

YOLO11 nổi bật nhờ khả năng thích ứng được cải tiến, hỗ trợ nhiều tác vụ thị giác máy tính hơn ngoài chức năng phát hiện đối tượng truyền thống. Đáng chú ý trong số đó là ước tính tư thế và phân đoạn trường hợp, mở rộng khả năng ứng dụng của mô hình trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Thiết kế của YOLO11 tập trung vào việc cân bằng sức mạnh và tính thực tiễn, nhằm giải quyết các thách thức cụ thể trong nhiều ngành công nghiệp khác nhau với độ chính xác và hiệu quả cao hơn [11].

Trong bài báo này tác giả sẽ tập trung vào OBB lấy từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 (YOLO OBB). Hộp giới hạn là đường viền hình chữ nhật được sử dụng để xác định vị trí và tỷ lệ của một đối tượng trong hình ảnh, đồng thời đóng vai trò là công cụ quan trọng cho các tác vụ như phát hiện đối tượng, phân đoạn hình ảnh và chú thích hình ảnh. AABB là một hình chữ nhật được định nghĩa bởi hai điểm: góc trên bên trái (x1, y1) và góc dưới bên phải (x2, y2). Hộp này luôn song song với các trục của hệ tọa độ. Với các giá trị : $\mathrm{w} = x_2 - x_1, h = y_2 - y_1$

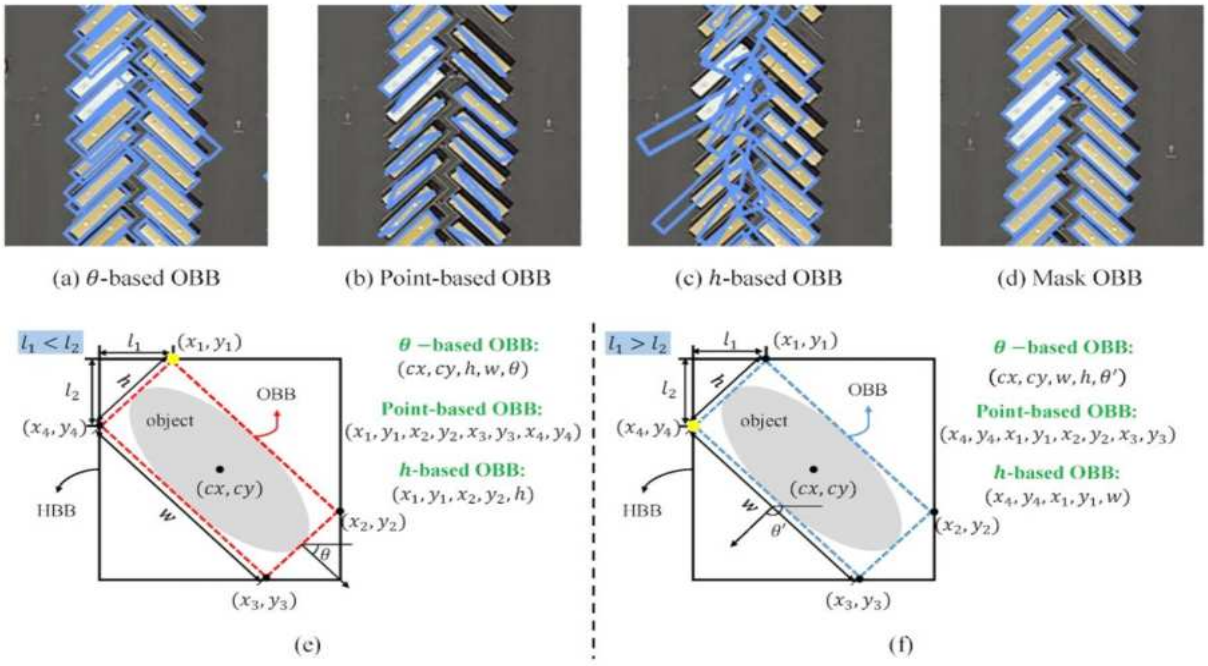
(1)



Hình 1. Hộp giới hạn truyền thống

Hộp giới hạn định hướng (YOLO OBB) là một hộp có thể xoay quanh một điểm trung tâm nào đó và được mô tả bằng các tham số như tọa độ của tâm (x_center, y_center), chiều rộng, chiều cao và góc xoay. OBB cho phép định dạng linh hoạt hơn, phù hợp với hình dạng không đều của đối tượng, giúp cải thiện độ chính xác trong phát hiện.

Tùy thuộc vào độ lớn của giá trị $l_1 = |x_1 - x_4|$ so với giá trị $l_2 = |y_1 - y_4|$ ta có hộp giới hạn ở Hình (a), (b), (c) được biểu diễn theo Hình (e) hoặc Hình (f).



Hình 2. Hộp giới hạn định hướng

Hình (a) θ-based OBB**:** Đây là hộp giới hạn định hướng dựa trên góc θ của đối tượng. Thông số của nó bao gồm tọa độ trung tâm (cx, cy), chiều cao (h), chiều rộng (w) và góc quay (θ). Với Hình (e):

$$cx = \frac{x_1 + x_3}{2} = \frac{x_2 + x_4}{2}\ ; \quad cy = \frac{y_1 + y_3}{2} = \frac{y_2 + y_4}{2} \tag{2}$$

$$\theta = \arctan\frac{l_1}{l_2}\ ;\ h = \frac{l_1}{\sin\theta}\ ;\ \mathrm{w} = \frac{l_1}{\cos\theta} \tag{3}$$

Với Hình (f) thay θ là θ’ với $\theta' = \theta + \frac{\pi}{2}$ (4)

Hình (b) Point-based OBB**:** Hộp này được định nghĩa dựa trên các điểm dữ liệu xác định ranh giới của đối tượng. Tọa độ của bốn điểm $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ và (x_4, y_4) sẽ được sử dụng để xác định vị trí và kích thước của hộp.

Hình (c) h-based OBB**:** Hộp giới hạn này dựa trên chiều cao (h) của đối tượng. Nó cũng sử dụng các tọa độ trung tâm (cx, cy) và các điểm tương tự như Point-based OBB để xác định ranh giới.

Mask OBB**:** Đây là loại hộp được phát hiện dựa trên mặt nạ của đối tượng, thường áp dụng trong nhận diện đối tượng hoặc phân khúc hình ảnh.

Khi mô hình phát hiện YOLO11 hoạt động, kết quả về hộp giới hạn định hướng có thể được lấy ra từ lớp lưu trữ và thao tác các hộp giới hạn định hướng (OBB) để xử lý các bước tiếp theo. Lớp này cung cấp chức năng xử lý các hộp giới hạn định hướng, bao gồm chuyển đổi giữa các định dạng khác nhau, chuẩn hóa và truy cập vào các thuộc tính khác nhau của hộp.

2.2. Bộ lọc Kalman

Bộ lọc Kalman được giới thiệu vào năm 1960 bởi R.E. Kalman trong bài báo "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", nhằm khắc phục những hạn chế của bộ lọc

Weiner. Nó sử dụng mô hình không gian trạng thái để đưa ra ước lượng tối ưu với sai số trung bình bình phương nhỏ nhất cho loại nhiễu ngẫu nhiên. Bộ lọc Kalman đã được nghiên cứu và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực giúp ước lượng trạng thái của quá trình, cho phép dự đoán cả quá khứ, hiện tại và tương lai, hoạt động hiệu quả ngay cả khi thông tin về mô hình hệ thống không hoàn chỉnh. Bộ lọc Kalman cổ điển áp dụng cho mô hình hệ thống tuyến tính.

Để mô tả hệ thống hoặc quá trình dưới tác động của nhiễu trong miền rời rạc, ta dùng phương trình sai phân tuyến tính (biểu diễn trong không gian trạng thái):

$$\mathbf{x_k} = \mathbf{A x_{k-1}} + \mathbf{B u_{k-1}} + \mathbf{w_{k-1}} \quad (5)$$

Phương trình đo đạc hay quan sát:

$$\mathbf{z_k} = \mathbf{H x_{k-1}} + \mathbf{v_k} \quad (6)$$

Trong đó $\mathbf{x_k}, \mathbf{x_{k-1}}$ là véc tơ trạng thái tại thời điểm k và trước đó, $\mathbf{z_k}$ là véc tơ trạng thái đo được tại thời điểm k, A là ma trận chuyển trạng thái kích thước n×n thể hiện mối quan hệ giữa trạng thái của đối tượng tại thời điểm k-1 và trạng thái hiện tại k, B là ma trận điều khiển kích thước n×l thể hiện mối liên hệ giữa tín hiệu điều khiển và trạng thái hệ thống, $\mathbf{u_k}$ là tín hiệu điều khiển tại thời điểm k, H là ma trận quan sát kích thước m×n thể hiện mối quan hệ giữa đại lượng đo lường được với trạng thái của hệ thống, các biến ngẫu nhiên $\mathbf{w_k}, \mathbf{v_k}$ là nhiễu quá trình và nhiễu đo lường giả sử chúng độc lập với nhau và đều là tạp trắng tuân theo phân bố chuẩn:

$$w \sim N(0, Q), v \sim N(0, R) \quad (7)$$

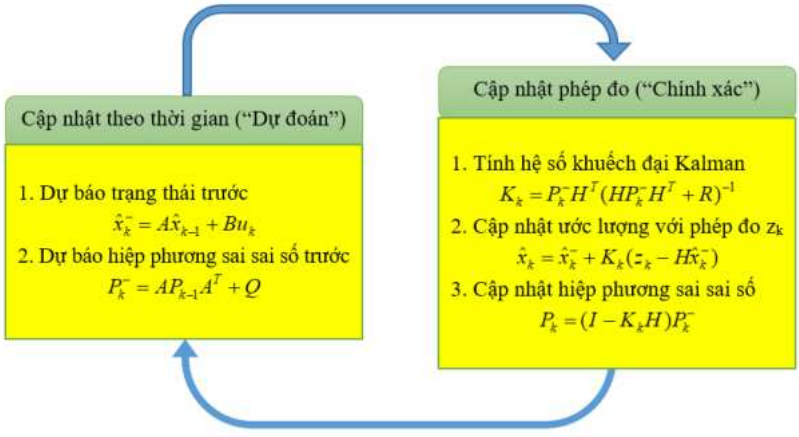
Các ma trận hiệp phương sai của nhiễu quá trình Q và nhiễu đo lường R có thể thay đổi theo thời gian hoặc các bước đo lường.

Thuật toán lọc Kalman ước lượng một quá trình nhờ sử dụng một dạng điều khiển phản hồi kín. Bộ lọc ước lượng quá trình tại một số thời điểm rồi nhận phản hồi dưới dạng phép đo tạp. Các phương trình bộ lọc Kalman được chia thành hai nhóm là các phương trình cập nhật theo thời gian (pha dự đoán) và các phương trình đo (pha hiệu chỉnh).

Phương trình cập nhật theo thời gian dự đoán trạng thái hiện tại và ước lượng sai số hiệp phương sai để nhận được ước lượng tiền nghiệm ở bước tiếp theo:

$$\hat{\mathbf{x}}_\mathbf{k}^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{k-1}} + \mathbf{B u_k} \quad (8)$$

$$\mathbf{P_k^-} = \mathbf{A P_{k-1} A^T} + \mathbf{Q} \quad (9)$$



Hình 3. Sơ đồ thuật toán lọc Kalman

Phương trình cập nhật phép đo sẽ cập nhật giá trị đo mới vào ước lượng tiên nghiệm để nhận ước lượng hậu nghiệm chính xác hơn:

$$\mathbf{K_k} = \mathbf{P_k^-}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P_k^-}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K_k}(\mathbf{z_k} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (11)$$

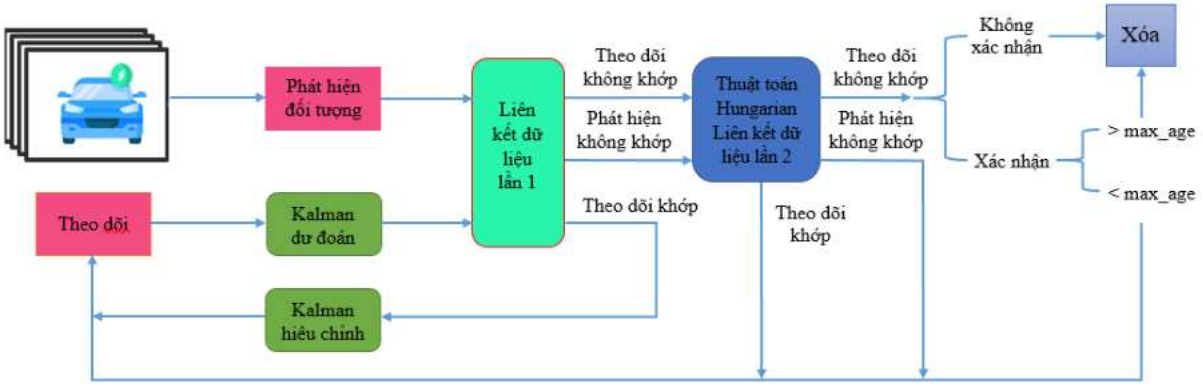
$$\mathbf{P_k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K_k}\mathbf{H})\mathbf{P_k^-} \quad (12)$$

Sau mỗi lần cập nhật theo thời gian và phép đo quá trình được lặp lại với ước lượng hậu nghiệm trước đó được dùng như ước lượng tiền nghiệm mới dự kiến. Sơ đồ thuật toán lọc Kalman được thể hiện như Hình 3. Tiến hành các tính toán từ phương trình (1) đến phương trình (2) trong pha dự đoán, rồi đến phương trình (1), (2), (3) trong pha hiệu chỉnh. Các bước tính toán được lặp lại trong suốt quá trình xử lý.

2.3. Thuật toán DeepSort

DeepSort là một thuật toán theo dõi nhiều đối tượng trong video, được phát triển để cải thiện khả năng theo dõi so với các phương pháp truyền thống như SORT (Simple Online and Realtime Tracking). Thuật toán này kết hợp giữa các kỹ thuật theo dõi và học sâu để nhận diện và theo dõi các đối tượng qua nhiều khung hình.

Các thành phần chính của DeepSort gồm mô hình phát hiện đối tượng, trích xuất đặc trưng, gán ID, bộ lọc Kalman, thuật toán Hungarian. Trong đó bộ phát hiện đối tượng thường là YOLO hoặc Faster R-CNN để phát hiện các hộp giới hạn xung quanh đối tượng trong các khung hình video. Trích xuất đặc trưng sử dụng một mạng nơ-ron sâu (thường là CNN) được sử dụng để trích xuất các đặc trưng từ các đối tượng đã phát hiện. Các đặc trưng này sẽ giúp phân biệt các đối tượng khác nhau, ngay cả khi chúng bị che khuất hay thay đổi hình dáng. Gán ID (ID Assignment) sử dụng thuật toán gán ID cho các đối tượng dựa trên các đặc trưng đã trích xuất và tọa độ của các hộp giới hạn. Nó sẽ áp dụng một phương pháp gán ID hiệu quả hơn bằng cách sử dụng khoảng cách Euclidean giữa các đặc trưng. Thuật toán sử dụng bộ lọc Kalman để ước lượng vị trí tương lai của các đối tượng. Bộ lọc Kalman giúp làm mượt các dự đoán và dự báo vị trí của các đối tượng trong khung hình tiếp theo. Để gán các hộp giới hạn và ID đối tượng, DeepSort sử dụng thuật toán Hungarian để tối ưu hóa quá trình gán, đảm bảo rằng mỗi đối tượng nhận được một ID duy nhất và tránh nhầm lẫn.



Hình 4. Sơ đồ khối thuật toán DeepSort

Hoạt động của thuật toán được mô tả như sau: Bước đầu tiên sử dụng mô hình phát hiện để phát hiện các đối tượng quan tâm trong khung hình hiện tại. Bước hai sử dụng bộ lọc Kalman để dự

đoán các trạng thái theo dõi mới dựa trên các theo dõi trong quá khứ (dự đoán vị trí của đối tượng ở khung hình ảnh tiếp theo sử dụng mô hình chuyển động). Các trạng thái này lúc mới khởi tạo sẽ được gán một giá trị mang tính thăm dò (tentative). Giá trị này nếu vẫn đảm bảo duy trì được trong 3 khung hình tiếp theo, trạng thái sẽ chuyển từ thăm dò sang xác nhận (confirmed), và sẽ cố gắng được duy trì theo dõi trong 30 khung hình tiếp theo. Ngược lại, nếu mất dấu khi chưa đủ 3 khung hình, trạng thái sẽ bị xóa khỏi trình theo dõi. Bước ba sử dụng những theo dõi đã được xác nhận, tiến hành đưa vào tầng liên kết dữ liệu thứ nhất (matching cascade) nhằm liên kết với các phát hiện được dựa trên độ đo về khoảng cách và đặc trưng (tính ma trận giá giữa các đối tượng phát hiện và dự đoán, gán các đối tượng phát hiện với các đối tượng dự đoán). Bước bốn các theo dõi và các phát hiện chưa được liên kết sẽ được đưa đến một lớp lọc tiếp theo. Sử dụng giải thuật Hungary giải bài toán phân công với ma trận chi phí IOU để liên kết dữ liệu lần hai. Bước năm xử lí, phân loại các phát hiện và các theo dõi (tạo một theo dõi mới cho phát hiện mới chưa được gán, xóa những theo dõi mà không được gán với phát hiện mới). Bước sáu sử dụng Kalman filter để hiệu chỉnh lại giá trị của theo dõi từ những phát hiện đã được liên kết với theo dõi và khởi tạo các theo dõi mới.

3. Ý tưởng và giải pháp

3.1. Ý tưởng

Có dữ liệu đầu vào là một video hoặc lấy trực tiếp từ camera. Thực hiện theo dõi đối tượng xuất hiện trong video đó bằng cách sử dụng mô hình phát hiện YOLO11 và thuật toán DeepSort. Lần thứ nhất sử dụng AABB và gói thư viện DeepSort đã được công bố tại "https://pypi.org/project/deep-sort-realtime". Lần thứ hai sử dụng OBB và gói thư viện DeepSort đã được chỉnh sửa. Lấy kết quả đầu ra của hai lần thử nghiệm để đánh giá. Mong muốn rằng việc sử dụng OBB sẽ tốt hơn AABB.

3.2. Giải pháp

Sử dụng phần mềm Pycharm để thực hiện dự án. Tạo môi trường làm việc, tải mô hình phát hiện YOLO11 và các thư viện cần thiết cho dự án vào môi trường làm việc (trong đó cần có thư viện Ultralytics và DeepSort).

Để việc thử nghiệm được dễ dàng tác giả sẽ sử dụng trọng số (weight) YOLO11x-obb.pt cho mô hình phát hiện YOLO11. Trọng số này được nhà phát hành YOLO11 công bố cùng nghiên cứu của mình, nó được tạo ra từ việc huấn luyện mô hình khi sử dụng bộ dữ liệu DOTAv1.0. Bộ dữ liệu gồm 2806 hình ảnh với 188282 trường hợp đã được gán nhãn sẵn 15 lớp đối tượng (plane, ship, storage tank, baseball diamond, tennis court, basketball court, ground track field, harbor, bridge, large vehicle, small vehicle, helicopter, roundabout, soccer ball field, swimming pool) với hộp giới hạn định hướng. Tỷ lệ phân chia: 1/2 cho đào tạo, 1/6 cho xác thực và 1/3 cho thử nghiệm. Tác giả sẽ tập trung vào lớp đối tượng ship (tàu thủy).

Tiếp theo thực hiện thử nghiệm lần thứ nhất kết hợp AABB với DeepSort. Lấy các hộp giới hạn của các phát hiện từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 dưới dạng xyxy (chính là hai điểm trên cùng bên trái và dưới cùng bên phải của hộp giới hạn). Sau đó biến đổi về dạng xywh (điểm trên cùng bên trái, chiều rộng và chiều cao) đây là đầu vào của DeepSort. Trong thư viện DeepSort sẽ có các chương trình con có liên hệ chặt chẽ với nhau detection.py, iou_matching.py, kalman_filter.py, linear_assignment.py, nn_matching.py, track.py, tracker.py,

$$\mathbf{X}i = \left[x_i, y_i, a_i, h_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{a}_i, \dot{h}_i \right]^T \tag{13}$$

deepsort_tracker.py sẽ được chương trình chính gọi ra để thuật toán hoạt động. Ở đây véc tơ trạng thái theo dõi của đối tượng thứ i là:

Trong đó (x_i, y_i) là tâm của hộp giới hạn, a_i, h_i lần lượt là tỉ lệ chiều rộng/chiều cao (w/h), chiều cao của hộp giới hạn, $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{a}_i, \dot{h}_i$ lần lượt là tốc độ thay đổi của x_i, y_i, a_i, h .

Véc tơ trạng thái phát hiện của đối tượng thứ i là:

$$\mathbf{Z}i = \left[x_i, y_i, a_i, h_i\right]^T \tag{14}$$

Các ma trận A, P, Q có kích thước lần lượt là 8×8, ma trận H kích thước 4×8 và ma trận R có kích thước 4×4.

Lần thử nghiệm thứ hai kết hợp OBB với DeepSort. Lấy hộp giới hạn của các phát hiện từ đầu ra của mô hình phát hiện YOLO11 dưới dạng xywhr (là tọa độ tâm, chiều rộng, chiều cao và góc xoay so với mặt phẳng ngang thể hiện như Hình 2. Vì đầu vào DeepSort đã thay đổi so với nguyên bản nên phải viết lại detection.py, hộp giới hạn không định hướng theo các trục nên cũng phải viết lại iou_matching.py đồng thời cũng phải sửa lại tất cả các yếu tố liên quan đến phát hiện ở các chương trình con khác trong gói thư viện DeepSort để phù hợp với các trạng thái đầu vào.

Tính IoU theo công thức:

$$IoU = \frac{S_i \cap S_j}{S_i \cup S_j} = \frac{S_i \cap S_j}{S_i + S_j - S_i \cap S_j} \tag{15}$$

Trong đó S_i và S_j là diện tích hộp giới hạn thứ i và j, $S_i \cap S_j$ và $S_i \cup S_j$ là phần diện tích giao nhau và hợp nhau của 2 hộp giới hạn.

Véc tơ trạng thái theo dõi của đối tượng thứ i sẽ là:

$$\mathbf{X}i = \left[x_i, y_i, a_i, h_i, \theta_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{a}_i, \dot{h}_i, \dot{\theta}_i\right]^T \tag{16}$$

Véc tơ trạng thái phát hiện đối tượng thứ i là:

$$\mathbf{Z}i = \left[x_i, y_i, a_i, h_i, \theta_i\right]^T \tag{17}$$

Trường hợp này bổ xung thêm vào trạng góc quay θ_i và tốc độ góc quay $\dot{\theta}_i$. Các ma trận A, P, Q có kích thước 10×10, ma trận H có kích thước 5×10 và ma trận R có kích thước 5×5.

Ở cả hai lần thử nghiệm tác giả chọn tín hệu điều khiển đầu vào u = 0 (nên bỏ qua ma trận B). Để đánh giá hiệu suất theo dõi tác giả sẽ sử dụng cùng 1 video đầu vào và lấy video nhận được sau theo dõi ở mỗi lần so sánh với nhau một cách trực quan và sử dụng các chỉ số đánh giá đối với theo dõi nhiều đối tượng đó là các chỉ số MOTA, MOTP, IDF1, IDs, FP, FN. Các chỉ số này được định nghĩa và tính như sau:

Chỉ số MOTA (Multi-Object Tracking Accuracy): Chỉ số này đo lường hiệu suất tổng thể của thuật toán theo dõi bằng cách tính toán số lượng các trường hợp theo dõi đúng, các trường hợp theo dõi sai, và các lỗi theo dõi (như mất hoặc nhầm lẫn đối tượng).

$$MOTA = 1 - \frac{FP + FN + IDs}{GT} \tag{18}$$

Chỉ số MOTP (Multi-Object Tracking Precision): Chỉ số này đo lường mức độ chính xác của các dự đoán đối với vị trí dự đoán của các đối tượng theo dõi.

$$MOTP = \frac{\sum_t \sum_i d_i}{\sum_t TP(t)} \tag{19}$$

Chỉ số ID F1 là tỷ suất giữa độ chính xác và độ nhạy cho các đối tượng, tính toán tương tự như F1 score nhưng với sự chú ý đến danh tính của các đối tượng.

$$IDF1 = \frac{2 \cdot precision \cdot recall}{precision + recall} \tag{20}$$

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{21}$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{22}$$

Trong đó FP (False Positives) là số lượng phát hiện sai hay số lượng các đối tượng mà thuật toán dự đoán nhưng thực tế không tồn tại trong khung hình. Số lượng FP càng thấp thì thuật toán càng tốt. FN (False Negatives) là số lượng đối tượng bị bỏ sót hay số lượng các đối tượng có thực trong khung hình nhưng không được thuật toán theo dõi. FN thấp thể hiện khả năng phát hiện tốt của thuật toán. GT (Ground Truth) là số lượng đối tượng thực tế trong tập dữ liệu. IDs (Identity Switches) là số lần nhầm lẫn danh tính giữa các đối tượng trong quá trình theo dõi. Mỗi lần một đối tượng bị nhầm với một đối tượng khác gây ra sự thay đổi trong danh tính của đối tượng đó. d_{ti} là khoảng cách giữa vị trí dự đoán và vị trí thực tế của đối tượng. TP là số lượng dự đoán chính xác tại thời điểm t.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả

Các chỉ số tính được và hình ảnh để đánh giá như sau:



Hình 5. Hình ảnh trong video gốc



Hình 6. Kết quả theo dõi sử dụng AABB



Hình 7. Kết quả theo dõi sử dụng OBB

Chỉ số	MOTA	MOTP	IDF1	IDs	FP	FN
Sử dụng AABB	0.845	0.974	0.775	80	2375	58
Sử dụng OBB	**0.936**	**0.987**	**0.806**	128	**793**	114

Bảng 1. Chỉ số đánh giá nhận được

Nhìn vào kết quả từ bảng chỉ sô, chúng ta có thê thây răng các chỉ sô của OBB là tôt hơn so với khi sử dụng AABB. Điều này phù hợp với nhận định ban đầu, bởi vì OBB có khả năng xoay để phù hợp với hướng và hình dạng của đối tượng, giúp bám sát đối tượng hơn và giảm khoảng trống không cần thiết xung quanh đối tượng.

Đối với video, hình ảnh trực quan càng thể hiện rõ hơn sự phù hợp của OBB. Các AABB có kích thước lớn hơn và thường bị chồng chéo nhiều hơn, làm cho việc quan sát trở nên khó khăn. OBB bao sát đối tượng kể cả khi đứng yên hay khi chuyển động và xoay, cho phép theo dõi chính xác hơn.

Trong thực tế, thử nghiệm hiện tại mới chỉ xét đến đối tượng là tàu thủy và chưa kiểm tra với các đối tượng khác. Ngoài ra, tác giả cũng chưa can thiệp sâu vào cấu trúc của DeepSort mà chỉ thêm trạng thái theo dõi và điều chỉnh một số chương trình con cho phù hợp. Điều này dẫn đến việc đánh giá mới chỉ dừng lại ở mức sơ bộ, cho thấy rằng sử dụng OBB có thể cải thiện hiệu suất theo dõi và cho kết quả tốt hơn.

Trong thời gian tới, tác giả sẽ mở rộng thử nghiệm với nhiều lớp đối tượng hơn và tạo dữ liệu khác để kiểm tra toàn diện hơn. Tác giả cũng dự định sẽ huấn luyện các mô hình ReID khác trong DeepSort để đánh giá khả năng cải thiện hiệu suất và độ chính xác của hệ thống theo dõi. Ngoài ra, việc kết hợp với các công nghệ tiên tiến khác như học sâu và trí tuệ nhân tạo cũng sẽ được xem xét để phát triển các hệ thống theo dõi thông minh hơn.

5. Kết luận

Qua hai lần thử nghiệm trên, nghiên cứu này đã có thể trả lời câu hỏi nghiên cứu đặt ra và kết luận rằng việc sử dụng OBB kết hợp với thuật toán DeepSort đã cải thiện hiệu quả và độ chính xác của bài toán theo dõi nhiều đối tượng so với việc sử dụng AABB. Kết quả này cho thấy tính ưu việt của OBB trong việc bám sát đối tượng, giảm thiểu khoảng trống không cần thiết và xác định rõ hướng di chuyển của các đối tượng.

Ứng dụng này đặc biệt hữu ích cho các hệ thống theo dõi phức tạp yêu cầu độ chính xác cao, chẳng hạn như giám sát an ninh, quản lý giao thông và phân tích hành vi trong không gian công cộng. OBB cho phép các hệ thống này theo dõi chính xác các đối tượng có hình dạng và hướng di chuyển đa dạng, ngay cả khi các đối tượng di chuyển không có quy luật cố định.

Thành công của nghiên cứu này mở ra nhiều hướng nghiên cứu và ứng dụng mới trong tương lai. Có thể tiếp tục cải tiến thuật toán theo dõi để tối ưu hóa hiệu suất và độ chính xác hơn nữa. Ngoài ra, việc tích hợp các công nghệ khác như học sâu và trí tuệ nhân tạo có thể giúp phát triển các hệ thống theo dõi thông minh hơn, có khả năng dự đoán và phản ứng nhanh với các tình huống bất thường.

Cuối cùng, nghiên cứu này không chỉ đóng góp vào việc cải thiện hiệu quả và độ chính xác của các hệ thống theo dõi đối tượng, mà còn mở rộng khả năng ứng dụng của OBB trong nhiều lĩnh

vực khác nhau, từ y tế, thương mại đến quốc phòng và vũ trụ. Sự linh hoạt và tính chính xác của OBB sẽ tiếp tục thúc đẩy sự phát triển của các công nghệ theo dõi và nhận diện đối tượng trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

[1] Bewley, A., Farnsworth, C., & Williams, L. (2016). *SORT: A simple, online and real-time tracker.*
In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (pp. 3464-3468). IEEE.

[2] Wojke, N., Bewley, A., & Paulus, D. (2017). *Deep SORT: Deep learning to track custom objects.* In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (pp. 2017-2021). IEEE.

[3] Xu, Y., Zhang, Z., & Zhang, W. (2021). *BOT-SORT: Robust multi-object tracking with a new selfmatching association.* arXiv preprint arXiv:2109.12506.

[4] Yu, X., Wang, X., & Wei, Y. (2021). *ByteTrack: Multi-object tracking by information filtering.* In
Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) (pp. 2010-2019). IEEE.

[5] Wang, D., & Zhang, Z. (2022). *StrongSORT: Strong associations for real-time multi-object tracking.*
arXiv preprint arXiv:2206.02266.

[6] Jiaming Han, Jian Ding, Jie Li, Gui-Song Xia.(2020). *Align Deep Features for Oriented Object Detection.* arXiv preprint arXiv:2008.09397v3.

[7] Liu, Y., Li, J., & Xia, G.-S. (2020). *Rotated RetinaNet: Detecting oriented objects in aerial images.* In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)'
pp. 83-92.

[8] Wang, C. Y., Yang, J., Huang, F., & Belongie, S. J. (2023). *YOLOv8: Improved object detection for real-time applications.* arXiv preprint arXiv:2307.08430.

[9] Khanam, R., & Hussain, M. (2024). *YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements.* Department of Computer Science, Huddersfield University. https://doi.org/ [DOI_LINK_IF_APPLICABLE].

[10] Phạm Trung Dũng. (2019). *Giáo trình điều khiển thiết bị bay trên cơ sở nhiều nguồn thông tin*. Nhà xuất bản quân đội nhân dân.

[11] G.-S. Xia, X. Bai, J. Ding, Z. Zhu, S. Belongie, J. Luo, M. Datcu, M. Pelillo, and L. Zhang. (2018). *DOTA: A large-scale dataset for object detection in aerial images* (CVPR, pp. 3974–3983).

Bounding box orientation application from YOLO11 output detected model for multiple spreadsheet tracking objects.

Abstract: *Applying oriented bounding boxes from the output of the YOLO11 detection model to the problem of multi-object tracking. When performing multi-object tracking based on image processing, there are many ways to apply detection models with tracking algorithms. In this research project, I focus on studying the application of Oriented Bounding Boxes derived from the output of the YOLO11 detection model in combination*

with the DeepSort algorithm to perform the task of multi-object tracking. The results of the oriented bounding boxes allow the model to represent the shape and position of objects in the space more accurately, improving classification and tracking capabilities compared to traditional bounding boxes.

Keywords: DeepSort with Box-bound Orientation; Multiple Object Tracking with Box-bound Orientation; YOLO11 Oriented Bounding Boxes.

Phát hiện dấu hiệu run trong bệnh parkinson bằng các mô hình học máy có giám sát

Vũ Quân[1], Nguyễn Mạnh Cường[2]

[1] ***Lớp NCS 42, H2, Học viện kỹ thuật quân sự.***

[2]***Học viện kỹ thuật quân sự.***

[*] Email:***quanvu42@lqdtu.edu.vn***, Contact number: 0968179769

Tóm tắt:

Người mắc bệnh Parkinson (PD) có nhiều triệu chứng, chẳng hạn như đóng băng dáng đi (FoG), run tay, khó nói và các vấn đề về thăng bằng, trong các giai đoạn khác nhau của bệnh. Trong các nghiên cứu về phát hiện PD đa phần chỉ tập trung trong một tập dữ liệu còn nhiều hạn chế về số mẫu cũng như đối tượng để phân biệt. Bài viết này giới thiệu một phương pháp phát hiện PD từ một tập dữ liệu được nghi nhận trong lâm sàng bao gồm: người bệnh (PD), nhóm khỏe mạnh (HC), nhóm có triệu chứng (DD). Chúng tôi đã chọn các đặc trưng thủ công miền thời gian và miền tần số. Các đặc trưng lựa chọn được đưa vào nhiều mô hình học máy có giám sát, bao gồm Hồi quy Logistic (LR), K (KNN), Máy vector hỗ trợ (SVM) và Mạng tích chập (CNN), để phát hiện PD. Hiệu suất của các mô hình sử dụng các đặc trưng của chúng tôi có hơn 93% điểm F1 trong xác thực chéo năm lần và 89% điểm F1 trong đánh không sử dụng các tham số tối ưu. Cụ thể, Mạng hồi quy logitic (LR) hoạt động tốt nhất trong xác thực chéo năm lần với hơn 96% điểm F1. SVM cũng cho thấy hiệu suất tốt trong đánh giá không có tham số tối ưu với hơn 89% điểm F1.

Từ khóa: *Parkinson's Disease, Action Tremor Detection, Wearable Device, Supervised-learning.*

1. Mở đầu

Bệnh Parkinson (PD) là một bệnh thoái hóa thần kinh trung ương mãn tính và liên tục với hơn mười triệu bệnh nhân mắc phải trên toàn thế giới [6]. PD có các triệu chứng vận động chính, bao gồm chậm vận động, mất ổn định tư thế, cứng nhắc, đóng băng dáng đi và run. Run PD điển hình là run tay và ngón tay, có thể gây bất tiện và hậu quả nghiêm trọng tiềm ẩn trong cuộc sống hàng ngày của bệnh nhân [2]. Trong những năm gần đây, các thiết bị đeo ít xâm nhập hơn như thiết bị rung đã được sử dụng để giảm thiểu run trong môi trường gia đình [16].

Trong thực tế, các rối loạn vận động như bệnh Parkinson (PD) chủ yếu được chẩn đoán thông qua khám lâm sàng. Các phân tích tổng hợp của Marzieh Keshtkarjahromi, Ahmed Nasimuddin. [1,8] chỉ ra rằng độ chính xác chẩn đoán tổng hợp là 73,8% đối với các bác sĩ thần kinh tổng quát, bác sĩ lão khoa hoặc bác sĩ đa khoa (95% Khoảng thời gian đáng tin cậy (CRI): 67,8% -79,6%) và 79,6% (95% CrI 46% -95,1%) đối với các chuyên gia rối loạn vận động liên quan đến đánh giá ban đầu và 83,9% (95% CrI 69,7% -92,6%) về chẩn đoán tinh chỉnh sau khi theo dõi. Nó xác định rằng tính hợp lệ tổng thể của chẩn đoán lâm sàng ít được cải thiện trong nhiều năm qua và cần có các dấu ấn sinh học mới, lý tưởng nhất là bộ dữ liệu có tính mở để dễ dành xác thực trong các nghiên cứu.

Bên cạnh đó hầu hết các mô hình liên quan (tóm tắt trong [14]) cho PD đều xử lý kích thước mẫu hạn chế (n<<100) và bị hạn chế quá mức để phân loại PD và khỏe mạnh. Tuy nhiên, trong thực hành lâm sàng, bác sĩ thần kinh không chỉ đối mặt với những người chỉ là một trường hợp PD hoặc trường hợp khỏe mạnh (HC). Thay vào đó, cần có nhiều chẩn đoán phân biệt với các triệu chứng tương tự như PD. Trong những trường hợp này, các mô hình được đề cập ở trên sẽ không được áp dụng hoặc sẽ hoạt động kém hơn đáng kể. Để giải quyết vấn đề này, khâu phân loại bệnh là một phần quan trọng của việc tuyển dụng mẫu bệnh nhân:

rối loạn vận động không phải PD như run cơ bản, parkinson không điển hình, nguyên nhân thứ phát của bệnh parkinson, loạn trương lực cơ, sẽ được tóm tắt là DD. Chúng tôi tìm thấy bộ dữ liệu thỏa mãn các tiêu chí trên về: số lượng, mẫu bệnh, nhóm chứng trong nghiên cứu nhóm Julian Varghese. 2023[14].

Thông thường, run trong PD có ba loại: run khi nghỉ ngơi, tư thế và run hành động [5]. Các hoạt động của bệnh nhân giúp phân biệt các loại run. Run khi nghỉ ngơi được nhìn thấy khi bệnh nhân ngồi hoặc nằm xuống mà không thực hiện bất kỳ hoạt động nào. Run tư thế xảy ra khi bệnh nhân duy trì tư thế đứng yên. Phương pháp CNN phát hiện run khi nghỉ ngơi và run tư thế với độ chính xác trên 90%. Tuy nhiên, độ chính xác và điểm F1 để phát hiện run chỉ là 70% -80% trong các bài báo mà chúng tôi đã khảo sát. Vấn đề này thúc đẩy chúng tôi tiến hành nghiên cứu các đặc trưng đáng tin cậy hơn và các mô hình mạnh mẽ để phân loại run, từ đó xác định được PD trong thực tế lâm sàng.

Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu một cách tiếp cận để phát hiện dấu hiệu run của PD. Chúng tôi đã sử dụng bộ dữ liệu PADS với hai thiết bị đeo được bao gồm cảm biến gia tốc kế và vận tốc góc trên cổ tay của người tham gia. Việc phân loại giữa: PD, HC, DD được chia thành hai bài toán: 1) là phân loại giữa PD và HC, 2) là phân loại giữa PD và DD. Chúng tôi đã trích xuất các đặc trưng dựa trên kiến thức miền và chọn các đặc trưng bằng thuật toán LASSO. Để đánh giá hiệu quả của tập các đặc trưng được lựa chọn, các mô hình học máy được sử dụng là: Linear Regression (LR), Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbors (KNNs) và Convolutional Neural Network (CNN). Hiệu suất của các mô hình có hơn 93% điểm F-1 và độ chính xác là 96%, ấn tượng nhất là mô hình LR.

2. Thực nghiệm

2.1 Tập dữ liệu PADS

Bộ dữ liệu được tạo ra từ một nghiên cứu tiền cứu cắt ngang được thực hiện từ năm 2018 đến năm 2021 để nghiên cứu các dấu hiệu sinh học kỹ thuật số của bệnh Parkinson (PD).[15] Tổng cộng, 5159 bước đo của 469 người đã được ghi nhận bao gồm người khỏe mạnh (HC), bệnh nhân PD và những người có các dấu hiệu khác (DD). Bộ dữ liệu PADS bao gồm: tín hiệu cảm biến gia tốc và vận tốc góc, cũng như chi tiết về các bước chuyển động, nhân khẩu học, tiền sử bệnh và các triệu chứng không vận động cụ thể của các nhóm.Trong mỗi bước đánh giá, dữ liệu được ghi nhận gồm: gia tốc và vận tốc góc trên ba trục không gian (x, y, z) với tần số lấy mẫu 100 Hz. Tổng cộng 11 nhiệm vụ đánh giá tương tác đã được thực hiện, ba trong số đó mất 20 giây và phần còn lại 10 giây, được tóm tắt trong Bảng 1. Đối với phân tích ML, các bản ghi 20 giây được cắt thành hai phần, tạo ra 14 chuỗi thời gian 10 giây cho mỗi nhiệm vụ thử nghiệm. Với thiết lập này, sẽ thu được 1000 mẫu cho mỗi kênh dữ liệu theo thời gian, tổng số kênh của mỗi người tham gia (14 nhiệm vụ × 2 cánh tay × 2 cảm biến × 3 trục = 168). Trong các thí nghiệm sơ bộ, chúng tôi đã đánh giá riêng cảm biến: gia tốc, vận tốc góc, kết hợp cả gia tốc và vận tốc góc để kiểm tra xem hiệu năng của mô hình.

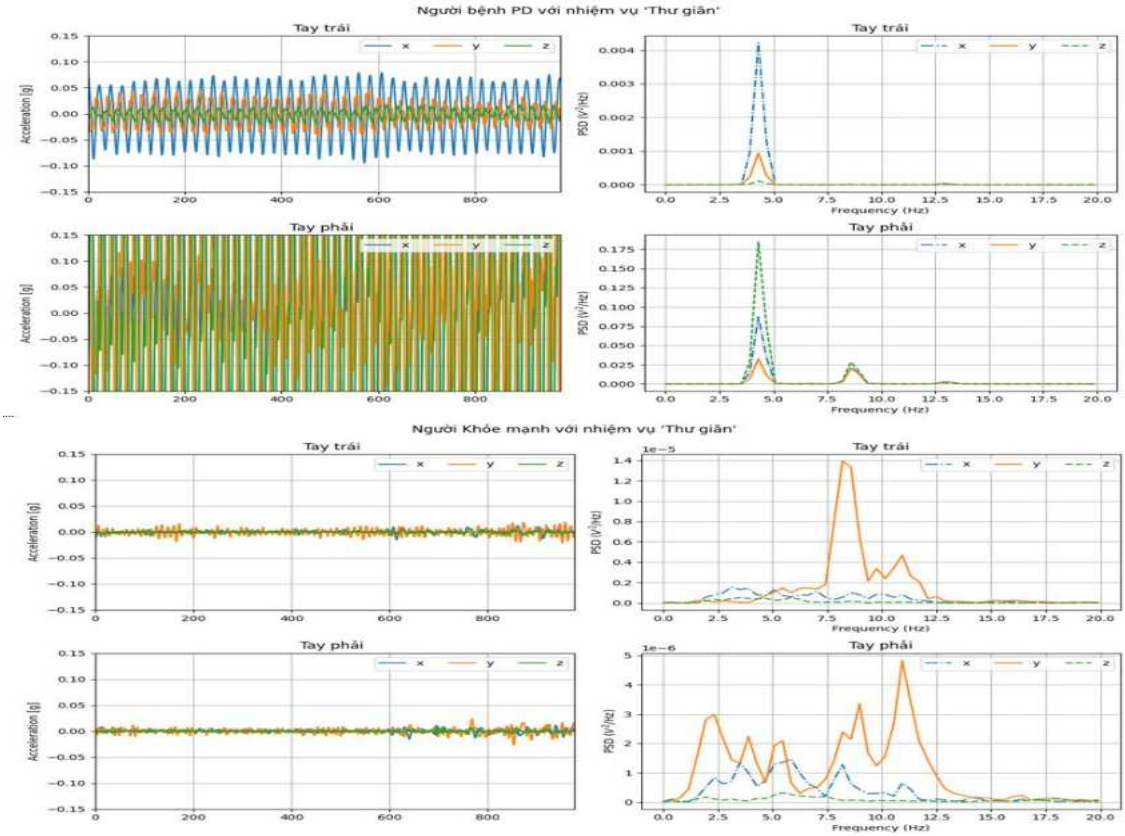
Bảng 1. Các bài thử nghiệm ghi dữ liệu

Số	Miêu tả nội dung	Hành động
1	Nghỉ ngơi với đôi mắt nhắm trong khi ngồi, vị trí chuẩn hóa cho Zhang et al. [3]	Nghỉ ngơi
2	Nghỉ ngơi trong khi bệnh nhân đang tính toán số bảy nối tiếp.	Nghỉ ngơi
3	Nâng và mở rộng cánh tay theo Zhang et al. [3]	Tư thế
4	Vẫn giơ tay lên.	Tư thế
5	Giữ trọng số một kg trong mỗi tay trong 5 giây. Bắt đầu bằng tay phải. Sau đó, để cánh tay nghỉ ngơi một lần nữa như trong 1a.	Tư thế
6	Chỉ ngón trỏ cho các giám khảo nhấc tay lên. Bắt đầu với chỉ mục phải, sau đó sang trái Lặp lại chuyển động.	Kinetic
7	Uống từ ly. Nắm lấy một cái ly rỗng như thể uống từ nó. Bắt đầu bằng tay phải. Sau đó lặp lại bằng tay trái	Kinetic
8	Bắt chéo và mở rộng cả hai cánh tay.	Kinetic
9	Đưa cả hai ngón trỏ vào nhau.	
10	Chạm vào mũi của chính mình bằng ngón trỏ. Bắt đầu với bên phải, sau đó với chỉ mục bên trái. Sau đó mở rộng cánh tay.	Kinetic

Hình 1 dưới đây cho thấy đồ thị gia tốc của người bệnh PD trong nhiệm vụ "Thư giãn", đây là một trong 11 bước đánh giá dựa trên các thiết kế nhiệm vụ (xem Bảng 1). Tín hiệu thu được cho thấy một kiểu run nhịp nhàng chiếm ưu thế hơn trên cánh tay phải. Mật độ phổ công suất (PSD) cho thấy đỉnh rõ ràng ở tần số khoảng 4Hz. Phần bên dưới hiển thị các biểu đồ tương đương cho người tham gia HC. Gia tốc gần bằng không, cho thấy cánh tay đang nghỉ ngơi mà không có hoạt động giống như run rẩy.

Để đánh giá hiệu quả của các mô hình cũng như tập đặc trưng, chúng tôi chỉ sử dụng bộ dữ liệu ghi nhận chuyển động của các nhóm tham gia. Chúng tôi tiến hành tiền xử lý tín hiệu từ các tệp txt, và thông tin được lưu trong các tệp định dạng “jonson” tương ứng.

Kết quả tiền xử lý thu được bộ dữ liệu gồm 469 bản ghi được dán nhãn từ: (“0”, ”1”, ”2”) tương ứng với nhóm: khỏe mạnh, bệnh nhân parkinson, có các triệu chứng. Các kênh được loại bỏ gồm có: thời gian, Bước ba ("Nhấc và giữ"), Bước năm ("ngón trỏ") và Bước tám ("chạm cảm ứng"), các bước này cũng không mang lại nhiều thông tin hữu ích. Như vậy bộ dữ liệu thu được dùng trong nghiên cứu sẽ có: 168 kênh với mỗi kênh có 1000 mẫu, với tần số f=100Hz.



Hình 1. Hình ảnh dữ liệu gia tốc của bệnh nhân PD và người khỏe mạnh.

2.2 Trích xuất và lựa chọn đặc trưng

Khi đánh giá các đặc trưng dựa trên dữ liệu, độ chính xác chỉ khoảng 80%. Kết quả này đã thúc đẩy chúng tôi lựa chọn nhiều đặc trưng thủ công hơn. Do đó, chúng tôi đã trích xuất 66 đặc trưng từ cả miền thời gian và tần số. Mỗi một kênh được chia thành 4 phân đoạn để trích xuất các đặc trưng. Bảng 2 thể hiện các đặc trưng được trích xuất. Các đặc trưng miền thời gian bao gồm các giá trị: Biên độ tuyệt đối lớn nhất, tổng năng lượng tuyệt đối, trung bình, độ lệch chuẩn và trung vị. Các đặc trưng này được tính toán cho từng thành phần thô của gia tốc kế và vận tốc góc. Tương tự, đặc trưng miền tần số là: Mật độ phổ công suất (PSD) được tính bằng phương pháp Welch, với độ phân giải tần số là: $\Delta f = 0.39Hz$. Thông tin về sự phân bố năng lượng của tín hiệu được lấy trên dải tần số 1Hz-19Hz. Sau khi trích xuất các đặc trưng này, chúng tôi sử dụng các kỹ thuật chọn đặc trưng để chọn các đặc trưng tốt nhất để dự đoán run PD.

Lựa chọn đặc trưng có ý nghĩa cho việc giảm chi phí phân loại kích thước cao và giúp tránh quá tải. Thuật toán lựa chọn đặc trưng mà chúng tôi đã chọn trong phương pháp Hồi quy Logistic là Toán tử lựa chọn và co ngót tối thiểu tuyệt đối (LASSO).

Các đặc trưng được chọn thể hiện trong Bảng 3. Ngoài ra, trong miền thời gian các đặc trưng: giá trị tối đa và tối thiểu bị loại bỏ cho tất cả các trục. Những đặc trưng này bị loại bỏ vì các giá trị tối đa và tối thiểu thường không thể dự đoán được khi bệnh nhân thực hiện các hoạt động. Tổng cộng, các đặc trưng được chọn là: miền thời gian "5 × 4", miền tần số 46 trong dải tần số từ 1Hz-19Hz. Bảng 3 cho thấy 20 đặc trưng được chọn hàng đầu và điểm quan trọng của chúng. Tổng cộng 20 đặc trưng có tổng trọng số là 54,96%, đại diện cho các

đặc trưng quan trọng nhất. Tiếp theo, chúng tôi đưa tất cả các đặc trưng đã chọn vào các mô hình học tập có giám sát.

Bảng 2. Các đặc trưng được trích xuất

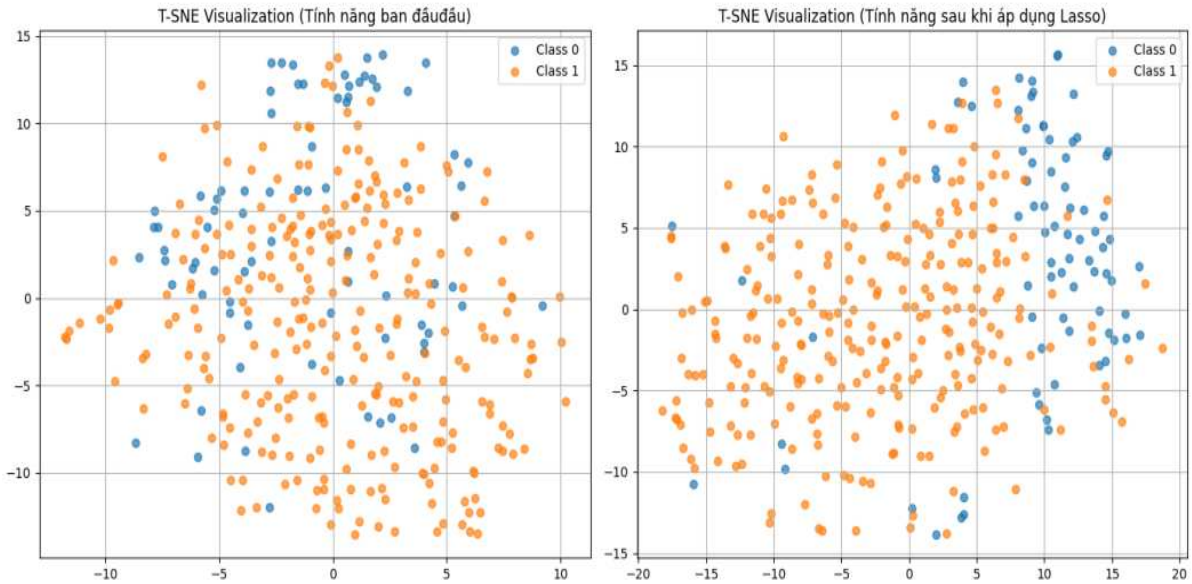
Miền	Đặc trưng
Thời gian	MaxAbs, Mean, Median, Độ lệch chuẩn, Sum AbsEnergy
Tần số	Mật độ phổ công suất (PSD) được tính bằng phương pháp Welch trong khoảng 1Hz-19Hz. Hàm $\log_{10}$ để nén giá trị PSD, giúp giảm độ lệch giữa các giá trị lớn và nhỏ trong phổ tín hiệu.

Bảng 3. Hai mươi đặc trưng được lựa chọn.

Đặc trưng	Rải	Trọng số	Đặc trưng	Rải	Trọng số
Vận tốc góc (X) PSD	1	0.106329	Gia tốc (Y) trung bình	11	0.022211
Vận tốc góc (Y) PSD	2	0.040107	Gia tốc (X) trung vị	12	0.021460
Gia tốc góc (Z) PSD	3	0.031144	Gia tốc (X) PSD	13	0.018248
Gia tốc (Y) tổng năng lượng tuyệt đối	4	0.025649	Gia tốc (X) PSD	14	0.016350
Vận tốc góc(X) tổng năng lượng tuyệt đối	5	0.025549	Gia tốc (Z) trung vị	15	0.015566
Gia tốc (Y) PSD	6	0.024793	Vận tốc góc (Z) Trung bình	16	.015533
Gia tốc (Y) trung bình	7	0.023834	Gia tốc (X) PSD	17	0.014577
Gia tốc (Z) PSD	8	0.023817	Gia tốc (Y) PSD	18	0.014207
Vận tốc góc (X) PSD	9	0.023251	Vận tốc góc (Z) Trung vị	19	0.013653
Vận tốc góc (Y)PSD	10	0.023177	Gia tốc (X) trung bình	20	0.011999

Dưới đây là minh họa các đặc trưng sau khi áp dụng Lasso:

Có thể thấy hiệu quả phân lớp trong trường hợp này khá tốt. Các đặc trưng thể hiện cho lớp “0” được thể hiện có màu xanh gần như đã được tách biệt với lớp “1” có màu cam.



Hình 2. Hình ảnh trực quan hóa các đặc trưng trước và sau khi dùng Lasso

3 Kết quả và thảo luận

3.1 Kết quả

Chúng tôi đã tiến hành thực nghiệm đánh giá như sau: Hai nhiệm vụ phân loại đã được phân tích: (1) PD so với HC và (2) PD so với DD. Chúng tôi giả định rằng độ khó khi phân loại (1) thấp hơn nhiệm vụ phân loại (2) đối với các mô hình ML, vì nó chỉ cần phát hiện các đặc điểm không lành mạnh. PD so với HC được trình bày chủ yếu cho mục đích so sánh. Nhiệm vụ phân loại thứ hai yêu cầu phân tích đặc điểm nâng cao hơn để phân biệt các rối loạn vận động có đặc điểm kiểu hình rất giống nhau. Các thuật toán huấn luyện và kiểm gồm: xác thực chéo (Cross-Evaluation) không lựa chọn các tham số tối ưu và đánh giá có lựa chọn các tham số tối ưu (Nested Cross-Evaluation), để minh họa hiệu suất của các bộ phân loại học tập có giám sát và các đặc trưng được chọn. Chúng tôi đã sử dụng bộ dữ liệu của bệnh nhân được đề cập trong phần trước. Các mô hình được huấn luyện và đánh giá với các trên cơ sở phần cứng và mền như sau: dual Xeon(R) 8171 Platinum 2.60GHz, 128Gb DDRam, GPU: Nivida Tesla P100-PCIE-16GB; pyhon 3.11.11, pytorch 2.5.1, cuda 11.8. Tiếp theo, chúng tôi trình bày kết quả đánh giá và trực quan hóa đặc trưng một cách chi tiết.

3.1.1 Đánh giá một lần

Bảng 4 Thể hiện kết quả trung bình của test fold. Mặc dù kết quả bỏ qua một lần ít hơn một chút so với đánh giá có lựa chọn các tham số tối ưu, hiệu suất vẫn mạnh mẽ. Từ kết quả trung bình tổng hợp thì mô hình LR có hiệu suất cao nhất với tất cả các tham số ma trận nhầm lẫn lớn hơn 96%. Kết quả này chứng minh rằng các đặc trưng và mô hình thủ công của chúng tôi hoạt động tốt với các đối tượng phân loại.

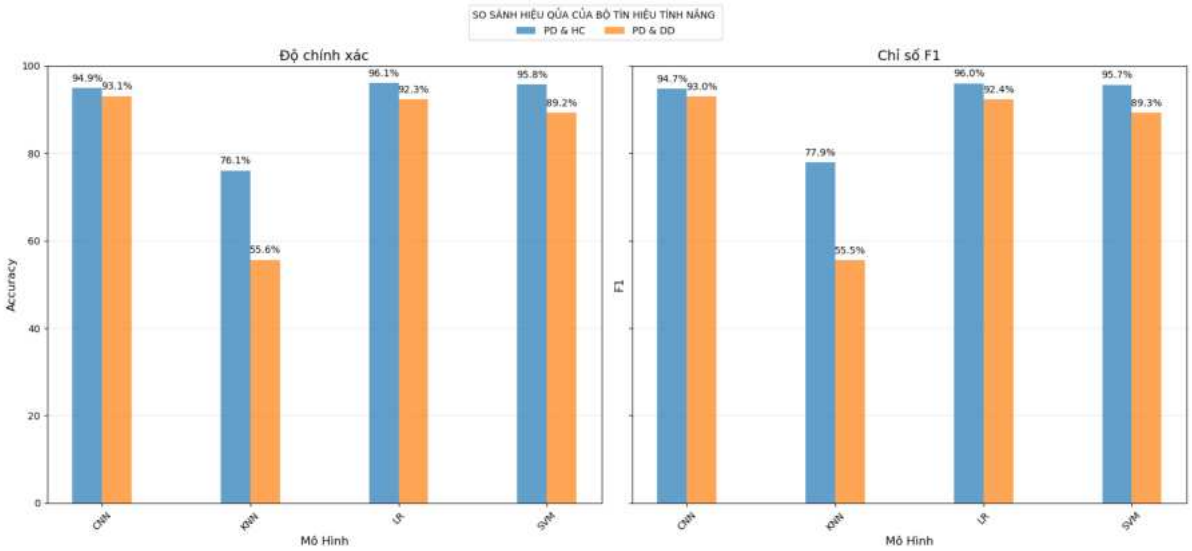
Kết quả tổng thể thể hiện trong hình 4, có thể ta thấy ràng các mô hình CNN, LR, SVM đều cho kết quả phân loại hơn 93%. Riêng mô hình KNN cho kết quả thấp nhất, trong việc phân loại PD và DD, kết quả chỉ dừng ở mức 55,6%. Mô hình khó có khả năng nắm bắt được các đặc trưng giữa các lớp dữ liệu, thể hiện rõ ở kết quả khi phân biệt PD và HC, độ chính xác và F1 đều chỉ ở mức trên 75%.

So sánh hiệu quả phân loại giữa PD và HC, PD và DD, kết quả cho thấy về tổng thể không khác biệt nhiều trong độ chính xác và chỉ số F1, trong việc phân biệt giữa PD với HC, PD với DD. Trong bài toán phân loại PD và HC các mô hình đều cao hơn so với khi phân biệt PD và DD. Đáng chú ý là mô hình CNN có hiệu năng ổn định nhất, khi sự khác biệt nhỏ chỉ

dao động ở mức 2%. Mô hình SVM thể hiện dao động lớn nhất khi sự khác biệt lên đến 6%. Kết quả như vậy cũng phản ánh tính chất phức tạp của tập đặc trưng giữa PD và DD.

Bảng 4. Kết quả đánh giá một lần

Mô hình	Fold	Độ chính xác	Độ chính xác cân bằng	F1	Độ chuẩn xác	Độ phủ
PD & HC						
CNN	3	94.93%	90.97%	94.74%	95.12%	94.93%
KNN	3	76.06%	81.05%	77.94%	85.57%	76.06%
LR	3	96.06%	93.47%	96.01%	96.07%	96.06%
SVM	3	95.77%	92.40%	95.69%	95.82%	95.77%
PD & DD						
CNN	3	93.08%	91.01%	93.04%	93.16%	93.08%
KNN	3	55.64%	67.38%	55.54%	79.26%	55.64%
LR	3	92.31%	92.01%	92.41%	92.78%	92.31%
SVM	3	89.23%	88.06%	89.34%	89.66%	89.23%
CNN	3	93.08%	91.01%	93.04%	93.16%	93.08%



Hình 3. Hiệu quả của bộ đặc trưng khi phân biệt PD, HC, DD

Độ chính xác cao, ổn định trong mô hình CNN cũng như chỉ số F1, cho thấy tầm quan trọng của các đặc trưng thể hiện qua PSD. CNN nổi bật nhờ khả năng học sâu các mẫu không tuyến tính và phức tạp.

Sự tương phản trong hiệu năng của LR và KNN cho thấy các đặc trưng: trung bình, trung vị và PSD được sử dụng tốt với LR. Ngược lại đối với KNN có thể các đặc trưng quá nhiều hoặc quá phức tạp. Vì đơn giản KNN chỉ dựa vào khoảng cách giữa các điểm.

Trong tất cả các mô hình thì SVM có hiệu năng trung bình, nhưng có khả năng cải thiện lớn nhất vì có thể tận dụng tốt các đặc trưng từ PSD, tổng năng lượng tuyệt đối.

Từ những kết quả trên có thể thấy rằng vai trò quan trọng của PSD trong tập đặc trưng. Các đặc trưng: trung bình, trung vị thể hiện rõ vai trò trong bài toán phân biệt PD và HC. Các

đặc trưng: độ lệch chuẩn, biên độ tuyệt đối, tổng năng lượng tuyệt đối có thông tin hữu ích nhưng có khả năng không đủ để phân biệt tốt các lớp PD và DD, khi mà các cả hai lớp có sự tương đồng.

Bước tiếp theo nghiên cứu sẽ trình bày kết quả đánh giá chéo sử dụng tìm tham số tối ưu cho các mô hình.

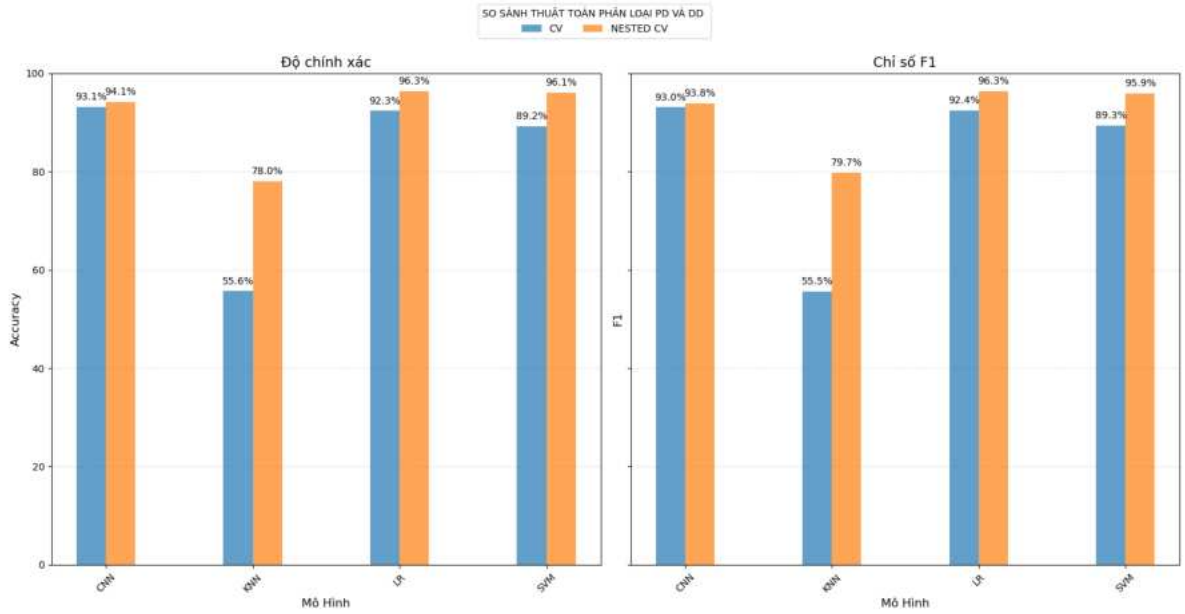
3.1.2 Xác thực chéo (Nested CV)

Chúng tôi đã sử dụng các phương pháp xác thực chéo năm lần: với tìm kiếm các tham số tối ưu và kiểm tra cho mỗi vòng. Bảng 5 cho thấy độ chính xác tổng thể, độ chuẩn xác, độ phủ và điểm F1 cho mỗi bộ phân loại. Điểm F1 cho cả bốn mô hình huấn luyện đều cao. Mô hình LR hoạt động tốt nhất với hơn 92% độ chính xác và điểm F1. Bảng 5 thể hiện kết quả trung bình theo các test fold.

Bảng 5. Kết quả đánh giá chéo

Mô hình	**Fold**	**Độ chính xác**	**Độ chính xác cân bằng**	**F1**	**Độ chuẩn xác**	**Độ phủ**
PD & HC						
CNN	3	93.80%	88.91%	93.53%	94.02%	93.80%
KNN	3	78.03%	82.76%	79.70%	86.67%	78.03%
LR	3	96.34%	94.54%	96.32%	96.42%	96.34%
SVM	3	96.06%	92.14%	95.93%	96.17%	96.06%
PD & DD						
CNN	3	94.08%	89.54%	93.84%	94.28%	94.08%
KNN	3	78.03%	82.76%	79.70%	86.67%	78.03%
LR	3	96.34%	94.54%	96.32%	96.42%	96.34%
SVM	3	96.06%	92.14%	95.93%	96.17%	96.06%
CNN	3	94.08%	89.54%	93.84%	94.28%	94.08%

So sánh hiệu năng phân biệt PD với HC, DD như kết luận ở trên thì SVM có biến động lớn nhất gần 6%. Kết quả so sánh hiệu năng của các mô hình (hình 4) tăng lên đáng kể khi xửa dụng các tham số tối ưu trong bài toán 2 cả về độ chính xác với chỉ số F1: với KNN từ 55,6% so với 78.0%, LR và SVM sự khác biệt lên đến gần 7%. Kết quả này thể hiện rõ khi được tối ưu hóa các tham số, hiệu suất các mô hình có sự cải thiện đáng kể.



Hình 4. So sánh hiệu năng phân biệt PD và HC trước và sau khi dùng thuật toán tối ưu

3.2 Thảo luận

Bài báo của chúng tôi đã sử dụng dữ liệu thu được từ các cảm biến chuyển động trên đồng hồ thông minh. Những cảm biến này rất thiết thực và linh hoạt cho bệnh nhân PD sử dụng trong sinh hoạt hàng ngày. Tuy nhiên, rất khó để các cảm biến có thể dự báo các sự kiện chấn động. Cảm biến chỉ có thể phát hiện tín hiệu khi rung động đã xảy ra. Nghiên cứu trong tương lai có thể xem xét cách dự đoán run tay và các triệu chứng PD khác bằng cách kết hợp với các cảm biến EEG và EMG.

Dữ liệu chúng tôi sử dụng được ghi nhận trong môi trường lâm sàng. Dữ liệu dùng trong nghiên cứu này mới chỉ khai thác phần chuyển động của các đối tượng tham gia, chưa khai thác phần các câu hỏi cũng như thông tin lâm sàng liên quan, nhưng kết quả thể hiện trong các mô hình cũng khá thuyết phục về độ chính xác, cũng như độ tin cậy cao. Như chúng tôi đã đề cập trong phần tổng quan, phân biệt được giữa bệnh nhân, người có triệu chứng (DD) là một vấn đề khó, nhưng kết quả bước đầu dựa trên các mô hình đơn giản trình bày trong nghiên cứu này đưa đến hướng triển khai hứa hẹn trong thực tế. Sử dụng đồng hồ thông minh có thể phân biệt được PD, HC, DD. Việc triển khai các mô hình học sâu trên nền tảng mobiphone có nhiều thách thức, nhưng mô hình đơn giản như LR hoàn toàn khả quan. Bệnh nhân PD có thể sử dụng công nghệ đeo không xâm lấn để theo dõi sự thay đổi hàng ngày về mức độ nghiêm trọng trong sinh hoạt . Ngoài ra, việc phát hiện run chính xác,bằng các thiết bị đeo được còn có ý nghĩa giúp sự chăm sóc kịp thời, hiệu quả hơn là những lần khám bệnh định kỳ. Trong tương lai chúng tôi đặt mục tiêu phát triển một hệ thống trực tuyến có thể phát hiện run tay trong thời gian thực với các thiết bị đeo được và điện thoại thông minh, đồng thời tiến hành nghiên cứu thí điểm để kiểm tra độ bền và độ chính xác của hệ thống trong các môi trường khác nhau.

Bài báo của chúng tôi chọn các mô hình học máy có giám sát vì bộ dữ liệu đã gắn nhãn các sự kiện run hoạt động từ các hoạt động dựa trên các đánh giá trong bộ dữ liệu. Nghiên cứu trong

tương lai có thể tập trung vào các mô hình học tập và học sâu không giám sát. Những mô hình này có khả năng nâng cao hiệu suất phát hiện run hoạt động.

4. Kết luận

Bài báo của chúng tôi tập trung vào việc phát hiện PD trong môi trường lâm sàng, bao gồm cả người khỏe mạnh và người có triệu chứng, bằng cách sử dụng cảm biến gia tốc kế và vận tốc góc. Chúng tôi đã trích xuất các đặc trưng thủ công dựa trên kiến thức miền và chọn các đặc trưng bằng thuật toán LASSO. Chúng tôi đã đánh giá các đặc trưng của mình trên bốn mô hình học tập có giám sát. Hiệu quả của các mô hình có hơn 93% kết quả xác thực chéo với các tham số tối ưu điểm F-1 và hơn 89,3% điểm F-1 với mô hình không tối ưu các tham số, điều này cho thấy các thuật toán phân loại khác nhau hoạt động hiệu quả và với bộ tín hiệu đặc trưng của mà chúng tôi đã lựa chọn.

Tài liệu tham khảo

[1] Ahmed Nasimuddin, Bhattacharyya Chirayata, and Ghose Avik. 2021. A Novel Non-Parametric Approach Of Tremor Detection Using Wrist-Based Photoplethysmograph. In 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 1150–1154.

[2] Anouti Ahmad and Koller William C. 1995. Tremor disorders. Diagnosis and management. Western journal of medicine 162, 6 (1995), 510. [PubMed: 7618310].

[3] Braga Diogo, Madureira Ana M, Coelho Luis, and Ajith Reuel. 2019. Automatic detection of Parkinson's disease based on acoustic analysis of speech. Engineering Applications of Artificial Intelligence 77 (2019), 148–158.

[4]Chen Shih-Yuan and Lin Chi-Lun. 2022. Subtle Motion Detection Using Wi-Fi for Hand Rest Tremor in Parkinson's Disease. In 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). IEEE, 1774–1777.

[5]Gigante, A.F.; Pellicciari, R.; Iliceto, G.; Liuzzi, D.; Mancino, P.V.; Custodero, G.E.; Guido, M.; Li vrea, P.; Defazio, G. Rest tremor in Parkinson's disease: Body distribution and time of appear ance. J. Neurol. Sci. 2017, 375, 215–219, doi:10.1016/j.jns.2016.12.057.

[6]Ibrahim Anas, Zhou Yue, Jenkins Mary E, Trejos Ana Luisa, and Naish Michael D. 2020. The design of a Parkinson's tremor predictor and estimator using a hybrid convolutional multilayer perceptron neural network. In 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). IEEE, 5996–6000.

[7]Javor Andrija, Ransmayr Gerhard, Struhal Walter, and Riedl René. 2016. Parkinson patients' initial trust in avatars: theory and evidence. PloS one 11, 11 (2016), e0165998. [PubMed: 27820864].

[8]Krack Paul, Benazzouz Abdelhamid, Pollak Pierre, Limousin Patricia, Piallat Brigitte, Hoffmann Dominique, Xie Jing, and Benabid Alim-Louis. 1998. Treatment of tremor in Parkinson's disease by subthalamic nucleus stimulation. Movement disorders: official journal of the Movement Disorder Society 13, 6 (1998), 907–914. [PubMed: 9827614].

[9]Marzieh Keshtkarjahromi , Danielle S Abraham , Ann L Gruber-Baldini , Katrina Schrader , Stephen G Reich , Joseph M Savitt , Rainer Von Coelln , Lisa M Shulman. Confirming Parkinson Disease Diagnosis: Patterns of Diagnostic Changes by Movement Disorder Specialists 2022 May 9;2022:5535826. doi: 10.1155/2022/5535826

[10]Moro-Velazquez Laureano, Gomez-Garcia Jorge A, Arias-Londoño Julian D, Dehak Najim, and Godino-Llorente Juan I. 2021. Advances in Parkinson's disease detection and assessment using voice and speech: A review of the articulatory and phonatory aspects. Biomedical Signal Processing and Control 66 (2021), 102418.

[11]Nalini M, Gayathiri R, Srimathi R, Vidyathmikaa R, and Jenifer S. 2022. Detection of Parkinson's Disease Using Voice Changes and Hand-tremor. In 2022 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT). IEEE, 1–4.

[12]Politis Marios, Wu Kit, Molloy Sophie, Bain Peter G., Chaudhuri K Ray, and Piccini Paola. 2010. Parkinson's disease symptoms: the patient's perspective. Movement Disorders 25, 11 (2010), 1646–1651. [PubMed: 20629164]

[13]Rajaraman V, Jack D, Adamovich SV, Hening W, Sage Jacob, and Poizner H. 2000. A novel quantitative method for 3D measurement of Parkinsonian tremor. Clinical neurophysiology 111, 2 (2000), 338–343. [PubMed: 10680570]

[14]Rini Eka Mistiko and Haq Endi Sailul. 2021. Detection Hand Tremor Through Each Finger Movement Based On Arduino For Parkinson's Patients. In 2021 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE). IEEE, 225–230.

[15]Varghese, J., Brenner, A., Plagwitz, L., van Alen, C., Fujarski, M., & Warnecke, T. (2024). PADS-Parkinsons Disease Smartwatch dataset (version1.0.0). *PhysioNet*. https://doi.org/10.13026/m0w9-zx22

[16] Sun Minglong, Watson Amanda, and Zhou Gang. 2020. Wearable computing of Freezing of Gait in Parkinson's disease: A survey. Smart Health 18 (2020), 100143.

[17] Swallow Lee and Siores Elias. 2009. Tremor suppression using smart textile fibre systems. Journal of Fiber Bioengineering and Informatics 1, 4 (2009), 261–266.

[18]Tong Lina, He Jiaji, and Peng Liang. 2021. CNN-based PD hand tremor detection using inertial sensors. IEEE Sensors Letters 5, 7 (2021), 1–4. [PubMed: 36789370]

[19]Luis Sigcha , Luigi Borzì , Federica Amato , ... Deep learning and wearable sensors for the diagnosis and monitoring of Parkinson's disease: A systematic review Expert Systems with Applications Volume 229, Part A, 1 November 2023, 120541 https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120541

[20]Alexandros Papadopoulos, Dimitrios Iakovakis, Lisa Klingelhoefer... Unobtrusive detection of Parkinson's disease from multi-modal and in-the-wild sensor data using deep learning techniques. Scientific Reports | (2020) 10:21370 | https://doi.org/10.1038/s41598-020-78418-8

[21]Ming long Sun, Woosub Jung, Kenneth Koltermann, Gang Zhou, Amanda Watson, Ginamari Blackwell, Noah Helm, Leslie Cloud, and Ingrid Pretzer Aboff. 2023. Parkinson's Disease Action Tremor Detection with Supervised Leaning Models. June 21 23, 2023, https: //doi.org/10.1145/3580252.3586977

Detecting Tremor Symptoms in Parkinson's Disease Using Supervised Machine Learning Models

Abstract: *Parkinson's disease (PD) patients exhibit various symptoms, such as freezing of gait (FoG), tremors, speech difficulties, and balance problems, across different disease stages. Many PD detection studies focus on limited datasets with restricted sample sizes and subject diversity. This paper introduces a PD detection method utilizing a clinically acquired dataset comprising patients (PD), healthy controls (HC), and a symptomatic group (DD). We selected handcrafted time-domain and frequency-domain features. These selected features were input into several supervised machine learning models, including Logistic Regression (LR), K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM), and Convolutional Neural Network (CNN), for PD detection. Our feature-based models achieved over 93% F1-score in five-fold cross-validation and 89% F1-score in non-optimized parameter evaluation. Specifically, Logistic Regression (LR) performed best in five-fold cross-validation with over 96% F1-score. SVM also demonstrated good performance in non-optimized parameter evaluation with over 89% F1-score.*

Keywords: Parkinson's Disease, Action Tremor Detection, Wearable Device, Supervised_learning.❑

Nghiên cứu phương pháp nâng cao độ chính xác tham số chuyển động của ô tô trên cơ sở dữ liệu GPS

Trịnh Anh Tài, Nguyễn Hữu Nam, Trần Xuân Trung[1]

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: xuantrungtran85@gmail.com

Tóm tắt: Bài báo trình bày phương pháp xác định và nâng cao độ chính xác các tham số động học như: gia tốc pháp tuyến, tiếp tuyến, vận tốc của ô tô dựa trên việc phân tích, xử lý các dữ liệu GPS. Phương pháp này giúp khắc phục các nhược điểm của quỹ đạo GPS như: sai số vị trí cao, tốc độ lấy mẫu thấp. Các dữ liệu thu được có thể sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho các phép tính hoặc model mô phỏng dùng cho các bài toán tối ưu trong các lĩnh vực khác như: robot, theo dõi, vẽ bản đồ ...

Từ khóa: *GPS; dữ liệu; quỹ đạo; phân tích.*

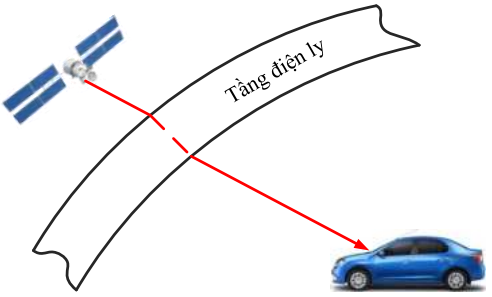
1. Đặt vấn đề

Ngày nay, sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghiệp ô tô đã dẫn đến nhu cầu ngày càng cao về các giải pháp tối ưu hóa hoạt động và đảm bảo an toàn cho phương tiện. Một trong những yếu tố quan trọng nhất để quản lý và điều khiển xe là xác định chính xác các tham số chuyển động, bao gồm vị trí, vận tốc, gia tốc, hướng di chuyển, và quỹ đạo.Việc xác định những tham số này không chỉ giúp cải thiện khả năng điều hướng mà còn hỗ trợ trong việc giảm thiểu rủi ro tai nạn và tối ưu hóa tiêu thụ nhiên liệu.

Hệ thống định vị toàn cầu (GPS) đã trở thành một công cụ quan trọng trong việc cung cấp thông tin vị trí cho các phương tiện. Với khả năng hoạt động dựa trên tín hiệu vệ tinh, GPS cho phép xác định vị trí của ô tô với độ chính xác cao, từ đó tính toán được các tham số chuyển động khác. Tuy nhiên, khi phân tích quỹ đạo chuyển động được xây dựng từ dữ liệu GPS, nhận thấy có các dữ liệu có thể chứa sai số đáng kể do nhiễu, và không phản ánh đúng bản chất của chuyển động. Những dữ liệu như thế này sẽ ảnh hưởng đến việc phân tích và xác định giá trị các tham số động học của đối tượng chuyển động tại thời điểm lấy mẫu. Do đó, các dữ liệu thu được từ thiết bị GPS cần phải được phân tích và xử lý dựa trên một số thuật toán để loại bỏ nhiễu do máy thu GPS tạo ra.

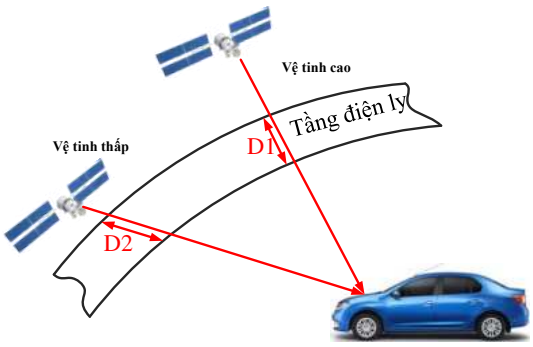
2. Sai số của GPS

Việc định vị bằng các hệ thống định vị toàn cầu về thực chất được xây dựng trên phép giao hội khoảng cách từ các vệ tinh có tọa độ đã biết. Khoảng cách từ các vệ tinh đến các điểm quan sát được tính theo thời gian lan truyền sóng vô tuyến trong không gian. Như vậy, kết quả xác định thời gian lan truyền phụ thuộc vào độ chính xác phép đo thời gian của các đồng hồ trên vệ tinh và trong máy thu; còn tốc độ của sóng phụ thuộc vào điều kiện của môi trường lan truyền. Ngoài ra, độ chính xác của vị trí còn phụ thuộc vào sai số tọa độ vệ tinh và một số nguồn ảnh hưởng khác. Trong thực tế, có rất nhiều các yếu tố tác động đến kết quả đo khoảng cách từ máy thu đến vệ tinh từ đó gây nên sai số của GPS [1].



Hình 1. Độ trễ tầng điện ly

Một trong những nguyên nhân cơ bản dẫn đến sai số của hệ thống GPS là khi sóng vô tuyến truyền qua tầng điện ly. Tầng điện ly là một lớp trong khí quyển Trái đất chứa các hạt mang điện (ion). Khi tín hiệu GPS đi qua tầng này, nó sẽ bị chậm lại và đường truyền bị cong do tác động của các ion. Sự thay đổi này dẫn đến sai số trong việc xác định vị trí, đặc biệt là về khoảng cách. Dưới tác động của bức xạ mặt trời, các electron và ion tự do được hình thành trong các lớp của tầng điện ly, làm giảm tốc độ lan truyền của sóng vô tuyến khi truyền qua nó. Hiệu ứng này giống như sự khúc xạ của chùm ánh sáng truyền qua thủy tinh (Hình 1). Sự giảm tốc phụ thuộc vào nồng độ của các electron. Giá trị của độ trễ tầng điện ly phụ thuộc vào vị trí địa lý, nhiệt độ, áp suất, độ ẩm không khí, bức xạ mặt trời, địa từ và đặc biệt là thời gian trong ngày và mùa trong năm. Ví dụ, vào ban đêm ảnh hưởng của tầng điện ly rất thấp, thời gian trễ có thể là 10 ns (3m). Vào ban ngày, mặt trời làm tăng tác động của tầng điện ly và làm chậm tín hiệu, thời gian trễ có thể lên đến 50 ns [3]. Để khắc phục những hạn chế trên, có một số cách như: sử dụng máy thu GPS đa tần số có khả năng đo tín hiệu trên nhiều tần số khác nhau giúp loại bỏ một phần sai số; sử dụng các mô hình toán học để mô tả sự biến đổi của tầng điện ly và bù trừ sai số; sử dụng các hệ thống tăng cường như SBAS (Satellite-Based Augmentation System) để cải thiện độ chính xác của tín hiệu.



Hình 2. Ảnh hưởng của vị trí vệ tinh đến mức độ trễ của tín hiệu

Giá trị độ trễ của tín hiệu từ vệ tinh ở vị trí thấp có thể tăng lên vài lần so với trường hợp vệ tinh ở điểm cực do khoảng cách truyền tín hiệu qua khí quyển tăng lên (Hình 2). Đối với các vệ tinh nằm ở điểm cực, độ trễ của tín hiệu tầng đối lưu có thể là 7 ns (2m) và lên đến 83 ns (25m) đối với vệ tinh nằm ở vị trí tạo với mặt ngang góc nhỏ hơn 50 độ.

Ngoài tầng điện ly thì tầng đối lưu cũng ảnh hưởng đến độ chính xác của hệ thống GPS. Tầng đối lưu là lớp khí quyển gần mặt đất nhất. Mặc dù không đáng kể bằng tầng điện ly, nhưng các yếu tố khí tượng trong tầng đối lưu vẫn có thể làm biến đổi đường truyền và tốc độ

của tín hiệu GPS, dẫn đến sai số trong quá trình định vị. Tầng đối lưu có nhiệt độ và độ ẩm không đồng đều, gây ra hiện tượng khúc xạ khí quyển. Tín hiệu GPS khi đi qua các lớp không khí có mật độ khác nhau sẽ bị bẻ cong, làm thay đổi đường truyền thực tế và dẫn đến sai số về khoảng cách. Độ ẩm cao trong không khí làm tăng khả năng hấp thụ tín hiệu GPS, đặc biệt là ở các tần số cao. Điều này có thể làm giảm cường độ tín hiệu và gây ra nhiễu, ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả định vị. Áp suất khí quyển thay đổi cũng ảnh hưởng đến tốc độ truyền của tín hiệu GPS. Để giảm thiểu những sai số này có thể áp dụng các mô hình toán học bù trừ sai số, sử dụng hệ thống tăng cường. Ngoài ra thì nên thực hiện đo GPS trong điều kiện thời tiết tốt, ít mây, ít mưa; ăng ten chất lượng cao có khả năng thu tín hiệu tốt hơn, giảm thiểu nhiễu và tăng độ chính xác của kết quả đo.

Trong điều kiện thực, ngoài tín hiệu vô tuyến từ vệ tinh, còn có các sóng vô tuyến phản xạ từ các vật thể cục bộ (tòa nhà, mặt đất và mặt nước, cây cối…) đi vào ăng-ten của máy thu. Hiện tượng này được gọi là hiện tượng đa đường. Hình 3 cho thấy hiện tượng phản xạ lại tín hiệu vô tuyến trong môi trường đô thị.



Hình 3. Hiện tượng phản xạ tín hiệu vô tuyến

Trong môi trường đô thị, xung quanh là các tòa nhà cao tầng, sai số có thể đạt từ 50 m trở lên. Để giảm sai số, có thể nâng ăng-ten của máy thu lên độ cao tối đa có thể hoặc sử dụng tín hiệu có độ chính xác cao của ăng-ten GPS đặc biệt (Hình 4), có tấm chắn bảo vệ tích hợp bên trong để ngăn việc nhận tín hiệu phản xạ.



Hình 4. Ăng-ten Choke-Ring

Như vậy, có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác như: số lượng vệ tinh càng nhiều thì có thể tăng thêm độ chính xác; sự che khuất do các tòa nhà, cây cối, đồi núi hoặc cấu trúc khác; loại ăng-ten và công nghệ thu; dịch vụ kiểm soát đất liền; điều kiện thời tiết…Tổng giá trị sai số của GPS bằng tổng tất cả các sai số từ các nguồn khác nhau như đã trình bày ở trên.

Sai số của thiết bị thu GPS dân dụng là khoảng 1,5-10 m. Trong Bảng 1 chỉ ra các yếu tố gây sai số và giá trị của chúng.

Bảng 1. Tập hợp các yếu tố gây sai số và giá trị của chúng [4]

Các yếu tố gây sai số	GPS (m)
Sự không ổn định của đồng hồ của vệ tinh	2
Ảnh hưởng của tầng điện ly	5
Ảnh hưởng của tầng đối lưu	0,5
Phản xạ	1
Lỗi của bộ thu	1
Các nguyên nhân khác	2

3. Phân tích quỹ đạo chuyển động GPS

3.1. Thu thập và phân tích dữ liệu GPS

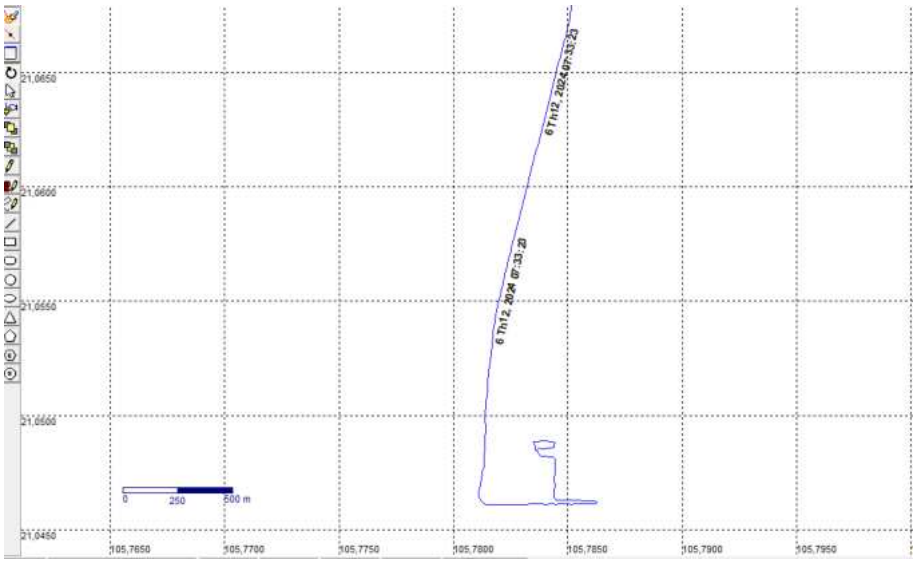
Hiện nay, trong lĩnh vực dịch vụ vận chuyển, để giải quyết bài toán quản lý tốc độ vận hành của xe, thời gian đóng và mở cửa, tình trạng hoạt động…, các nhà quản lý đã đưa ra giải pháp đơn giản, là lắp bộ định vị GPS trên mỗi phương tiện. Tuy nhiên, việc xác định lượng tiêu thụ nhiên liệu, thì chỉ có thể định lượng một cách tương đối nhờ số chỉ vạch xăng, nhờ kinh nghiệm... Nhưng, nếu các dữ liệu GPS thu được, được thực hiện bước xử lý trung gian, sẽ xác định được công suất tiêu thụ tức thời trong mọi thời điểm của xe khi đang chuyển động trên đường, và lượng nhiên liệu tiêu thụ toàn tuyến tương ứng. Từ đó, có thể đưa ra phương pháp tối ưu hóa cung đường vận chuyển, cách thức lái xe…Hiện nay trên thị trường có rất nhiều thiết bị thu thập dữ liệu GPS với độ chính xác cao, như: Máy định vị GPS cầm tay Garmin GPSMAP 64s, Garmin GPSMAP 79S, GPS Garmin Montana 700, GPS tiện dụng eTrex Touch 25J… Ngoài ra, các smartphone hiện đại cũng đã được hỗ trợ tích hợp GPS, người dùng có thể tự lập trình hoặc dễ dàng tải các phần mềm thu thập dữ liệu GPS trên các kho ứng dụng để sử dụng.

```
Datum,WGS84,WGS84,0,0,0,0,0
TP,D,21.08139751,105.78920089,12/06/2024,07:33:33,1
TP,D,21.08119282,105.78910357,12/06/2024,07:34:59,0
TP,D,21.08114278,105.78900123,12/06/2024,07:35:08,0
TP,D,21.08115053,105.78889612,12/06/2024,07:35:12,0
TP,D,21.0811709,105.78879897,12/06/2024,07:35:16,0
TP,D,21.08121822,105.78868113,12/06/2024,07:35:22,0
TP,D,21.08125417,105.7885854,12/06/2024,07:35:25,0
TP,D,21.08128322,105.78849035,12/06/2024,07:35:27,0
TP,D,21.08129282,105.78838457,12/06/2024,07:35:29,0
TP,D,21.08125916,105.78827603,12/06/2024,07:35:31,0
TP,D,21.08117798,105.7881928,12/06/2024,07:35:33,0
TP,D,21.08109706,105.78814276,12/06/2024,07:35:38,0
TP,D,21.08098784,105.78812364,12/06/2024,07:35:41,0
TP,D,21.08089757,105.7881296,12/06/2024,07:35:43,0
TP,D,21.0807969,105.78814703,12/06/2024,07:35:45,0
```

Hình 4. Một số giá trị GPS được thu thập bằng phần mềm GPS

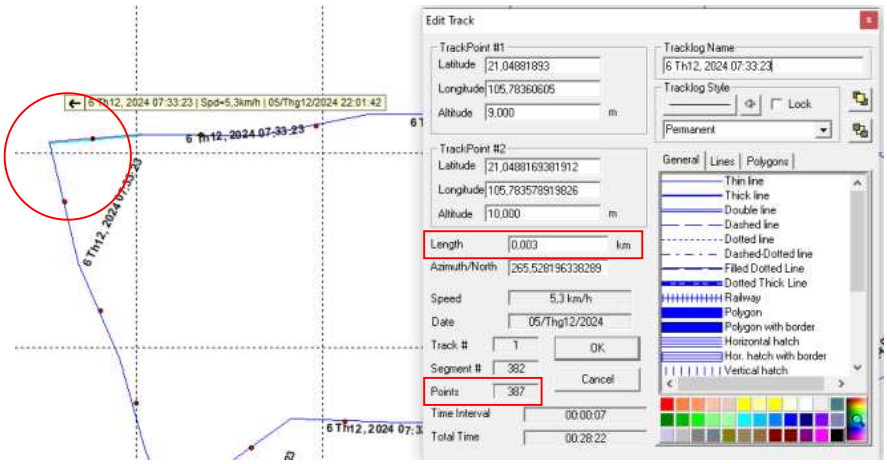
Trong nghiên cứu ban đầu này, để tiết kiệm chi phí, nhóm tác giả sử phần mềm GPS "GeoTracker" có trên Google Play để thu thập các dữ liệu của đối tượng chuyển động. Các dữ liệu này được ghi lại đều đặn sau một khoảng thời gian ngắn, được tính bằng giây, với các giá trị: thời gian, vĩ độ, kinh độ. Giá trị vĩ độ và kinh độ có đơn vị đo là độ và được lấy chính xác

tám chữ số sau dấu phẩy, thời gian có định dạng hh: mm: ss, độ cao so với mực nước biển được tính bằng đơn vị mét. Hình 4 và Hình 5 lần lượt trình bày một số giá trị GPS thu được và hình dạng quỹ đạo chuyển động tương ứng với các giá trị GPS đó.



Hình 5. Quỹ đạo chuyển động tương ứng với các giá trị GPS

Khi phân tích quỹ đạo chuyển động được xây dựng từ những dữ liệu GPS thu được, nhận thấy, trên quỹ đạo chuyển động đó có các dữ liệu (tọa độ của một điểm nào đó) không phản ánh đúng bản chất của chuyển động - điểm "hỗn loạn" (Hình 6). Những điểm như thế này sẽ ảnh hưởng đến việc phân tích và xác định giá trị của vận tốc, gia tốc của đối tượng chuyển động tại thời điểm lấy mẫu. Do đó, cần xây dựng bộ lọc để xác định và sau đó là loại bỏ những điểm có tính chất như trên. Bộ lọc được viết bằng ngôn ngữ C++ trong môi trường Microsoft Visual Studio.



Hình 6. Điểm "hỗn loạn" trên quỹ đạo chuyển động

3.2. Xây dựng bộ lọc các điểm "hỗn loạn"

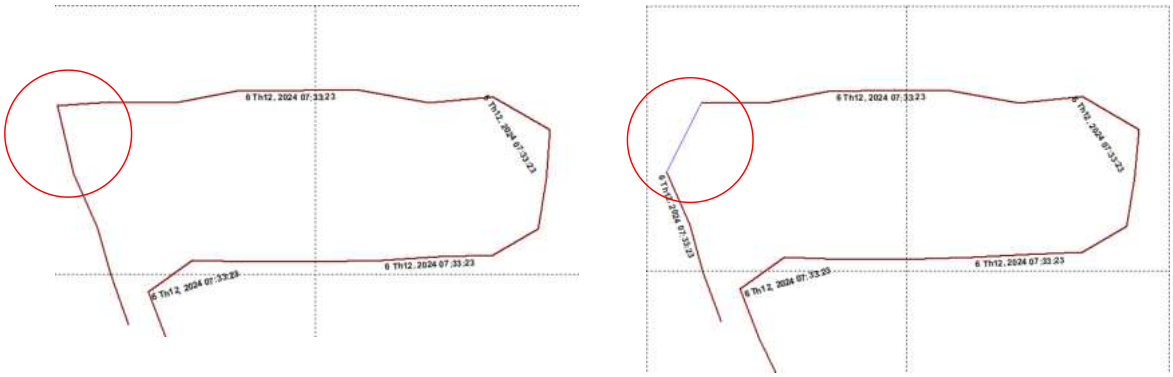
Phân tích cho thấy rằng khi đối tượng nghiên cứu di chuyển bình thường, khoảng cách giữa hai đểm liền kề lân cận theo hướng chuyển động của xe được tính theo công thức (1) luôn lớn hơn 3m (tương đương với vận tốc bằng 10,8 km/h, và khoảng cách này có thể sẽ lớn

hơn, phụ thuộc vào vận tốc chuyển động của đối tượng). Trong trường hợp, khoảng cách này nhỏ hơn 3m và tọa độ kinh độ hoặc vĩ độ của hai điểm lân cận phía trước và phía sau có sự thay đổi "bất thường" về giá trị (Ví dụ, khi đối tượng chuyển động tiến, thì điểm (n+1) phải nằm phía sau tọa độ (n). Dó vậy, nếu điểm (n+1) nằm ở vị trí phía trước điểm (n), ta gọi những điểm (n+1) là những điểm chứa các thông tin lỗi do sai số của hệ thống GPS). Phân tích chỉ cho rằng, đây là những điểm "hỗn loạn". Bộ lọc được viết trên Microsoft Visual Studio sẽ thực hiện việc loại bỏ các điểm đó và không được ghi vào mảng cơ sở dữ liệu quỹ đạo. Hình 7 trình bày kết quả trước (hình trái) và sau (hình phải) khi thực hiện bộ lọc.

Khoảng cách giữa hai điểm lân cận được tính bởi công thức:

$$l = R \cdot \text{acos}[\sin(\varphi_A) \cdot \sin(\varphi_B) + \cos(\varphi_A) \cdot \cos(\varphi_B) \cdot \cos(\lambda_A - \lambda_B)], \quad (1)$$

trong đó φ_A và φ_B — vĩ độ; λ_A, λ_B — kinh độ; l — khoảng cách giữa hai điểm, được đo bằng mét; R = 6371 km — bán kính trung bình của trái đất.



Hình 7. Kết quả lọc bỏ điểm "hỗn loạn"

Bộ lọc này có nhược điểm, là chỉ đúng đối với đối tượng chuyển động với một vận tốc lớn hơn 10km/h. Trong trường hợp, ví dụ: xe ô tô di chuyển trên đường bị tắc với vận tốc 5-10km/h, thì bộ lọc này sẽ không có tác dụng, do các điểm liền kề lân cận nhau sẽ bị loại bỏ hết.

3.3. Công thức tính gia tốc của vật chuyển động

Giả sử đối tượng nghiên cứu chuyển động từ điểm 0 đến điểm 1 với vận tốc ban đầu là v_0 (dạng tổng quát là v_n) và vận tốc tại điểm 1 là v_1 (dạng tổng quát là v_{n+1}) (Hình 8). Đối với bất kỳ tập hợp các điểm tham chiếu theo thời gian, giá trị gia tốc cần thiết để đối tượng nghiên cứu đi từ điểm tham chiếu này đến điểm tham chiếu liền kề tiếp theo có thể được tính bởi công thức:

$$a = \frac{2}{(\Delta t)^2} \cdot [(x_1 - x_0) - v_0 \cdot \Delta t] \quad (2)$$

Hoặc công thức tổng quát cho các phương x, y và z là:

$$\begin{bmatrix} a_x[n] \\ a_y[n] \\ a_z[n] \end{bmatrix} = \frac{2}{(\Delta t)^2} \cdot \left(\begin{bmatrix} x[n+1] \\ y[n+1] \\ z[n+1] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x[n] \\ y[n] \\ z[n] \end{bmatrix} - \Delta t. \begin{bmatrix} v_x[n] \\ v_y[n] \\ v_z[n] \end{bmatrix} \right), \quad (3)$$

trong đó $a_i[n]$- gia tốc của đối tượng nghiên cứu khi chuyển động từ điểm n đến điểm n+1 theo phương x, y và z; $\Delta t = t[n+1] - t[n]$ và $t[n]$, $t[n+1]$ - thời gian tại điểm n và n+1; $x[n+1]$ - tọa độ của đối tượng nghiên cứu tại điểm n và n+1 theo phương x; $v_i[n]$ - vận tốc ban đầu tại điểm n;

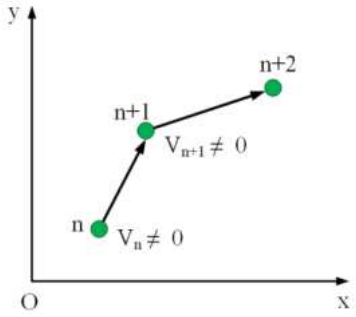
Trên thực tế, không chỉ có mỗi trường hợp đối tượng nghiên cứu chỉ chuyển động, mà nó còn dừng lại rồi lại di chuyển tiếp. Những thời điểm thay đổi trạng thái như vậy sẽ có giá trị vận tốc và gia tốc tương ứng. Trong phần tiếp theo, ta sẽ nghiên cứu một số trường hợp như vậy và đưa ra công thức tính cho gia tốc.

Trường hợp 1: $v_n \neq 0$ (m/s), $v_{n+1}=0$ (m/s) (hoặc $v_n = 0$ (m/s), $v_{n+1} \neq 0$ (m/s)).

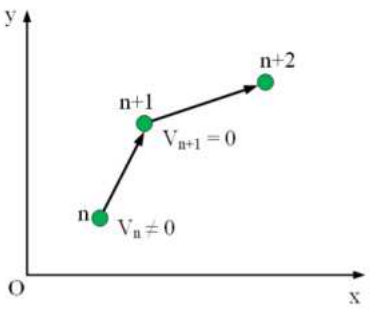
Trong trường hợp này, có thể phân tích như sau: tại vị trí điểm n, vật có vận tốc $v_n \neq 0$ và di chuyển trong một khoảng thời gian T nào đó để khi đến điểm n+1 vật có vận tốc $v_{n+1}=0$ (Hình 9), khi đó gia tốc của vật sẽ được tính theo công thức (4) hoặc tại vị trí điểm n+1 vật bắt buộc có vận tốc bằng 0 và không quan tâm thời gian T vật đi từ điểm n đến điểm n+1 là bao nhiêu, khi đó gia tốc của vật sẽ được tính theo công thức (5).

$$a_j = \frac{0 - v_n}{T} \tag{4}$$

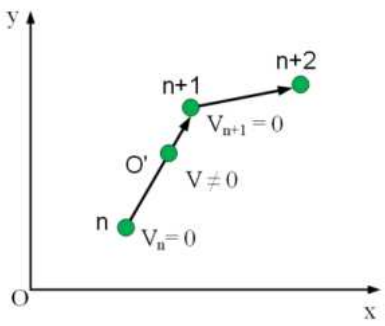
$$a_j = \frac{0 - v_n^2}{2\Delta x} \tag{5}$$



Hình 8. Vật rời điểm có vận tốc và đến điểm tiếp theo cũng có vận tốc



Hình 9. Vật rời điểm có vận tốc và đến điểm tiếp theo không có vận tốc



Hình 10. Vật rời điểm không vận tốc và đến điểm tiếp theo không vận tốc

Cả hai công thức trên đều cho ra được gia tốc của vật tại một thời điểm bất kỳ ứng với trạng thái tương ứng của chúng. Tuy nhiên, như đã trình bày ở trên, phần mềm GPS cho ra dữ liệu sau một khoảng thời gian ngắn nào đó (Δt), do đó T=Δts, còn vận tốc v_n được xác định ở phép tính [n-1] phía trước. Tất cả các phép tính sẽ được phần mềm lập trình Microsoft Visual tự động tính các giá trị của gia tốc và vận tốc theo thời gian ứng với các thời điểm khác nhau của xe.

Trường hợp 2: $v_n = 0$ (m/s), $v_{n+1} = 0$ (m/s).

Trường hợp xấu nhất là khi vật rời khỏi điểm n với tốc độ $v_n = 0$ (m/s), và đến điểm n+1 cũng với vận tốc $v_{n+1}=0$ (m/s) (Hình 10). Điều này có thể được giải thích như sau: vật rời vị trí điểm n với vận tốc là $v_n = 0$ (m/s), ngay sau đó tăng tốc và đạt vận tốc $v \neq 0$ (m/s) tại điểm

giữa là O', sau đó giảm tốc độ để đi đến điểm n+1 và tại điểm n+1 nó có vận tốc là v_{n+1}=0 (m/s).

Những trường hợp trên được giải quyết bằng cách tăng tần suất lấy mẫu từ bộ thu GPS lên gấp đôi, điều này giúp thu được nhiều dữ liệu hơn và việc mô phỏng, xây dựng quỹ đạo chuyển động sẽ chính xác hơn.

3.4. Xử lý gia tốc bằng thuật toán xấp xỉ

Giả sử đối tượng nghiên cứu chuyển động giữa các điểm mút (điểm tham chiếu) với gia tốc không đổi, ví dụ: từ điểm 2 đến điểm 3 (Hình 11). Các thông tin về đối tượng trong khoảng giữa hai điểm này là không xác định. Bên cạnh đó, bản thân các điểm tham chiếu này cũng có thể không phải là vị trí chính xác của đối tượng nghiên cứu tại các thời điểm cụ thể, bởi, các vị trí này chứa các thông tin lỗi do sai số của hệ thống GPS. Do đó, không cần thiết phải xác định chính xác các điểm đó trong phép tính xấp xỉ giá trị gia tốc như là một hàm phụ thuộc vào biến số là thời gian [6]. Quỹ đạo chuyển động được mô tả bởi các công thức sau [7]:

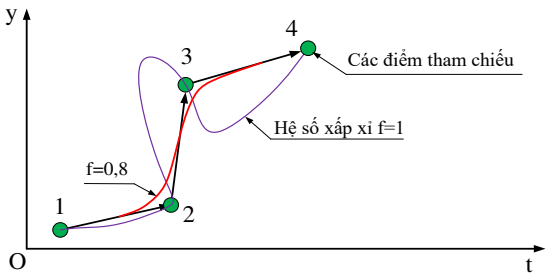
$$\left.\begin{aligned}\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix} &= \int\begin{bmatrix}v_x\\v_y\\v_z\end{bmatrix}\mathrm{d}t;\\ \begin{bmatrix}v_x\\v_y\\v_z\end{bmatrix} &= \int\begin{bmatrix}a_x\\a_y\\a_z\end{bmatrix}\mathrm{d}t,\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

trong đó x, y và z - các tọa độ của đối tượng nghiên cứu; v_x, v_y và v_z - vận tốc theo các hướng x, y và z; a_x, a_y và a_z - gia tốc theo các hướng x, y và z.

Đối với bất kỳ tập hợp các điểm tham chiếu theo thời gian, giá trị gia tốc cần thiết để đối tượng nghiên cứu đi từ điểm tham chiếu này đến điểm tham chiếu liền kề tiếp theo có tính đến hệ số xấp xỉ f được tính bởi công thức sau:

$$\begin{bmatrix}a_x[n]\\a_y[n]\\a_z[n]\end{bmatrix} = f\frac{2}{(\Delta t)^2}.\left(\begin{bmatrix}x[n+1]\\y[n+1]\\z[n+1]\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}x[n]\\y[n]\\z[n]\end{bmatrix} - \Delta t.\begin{bmatrix}v_x[n]\\v_y[n]\\v_z[n]\end{bmatrix}\right) \tag{7}$$

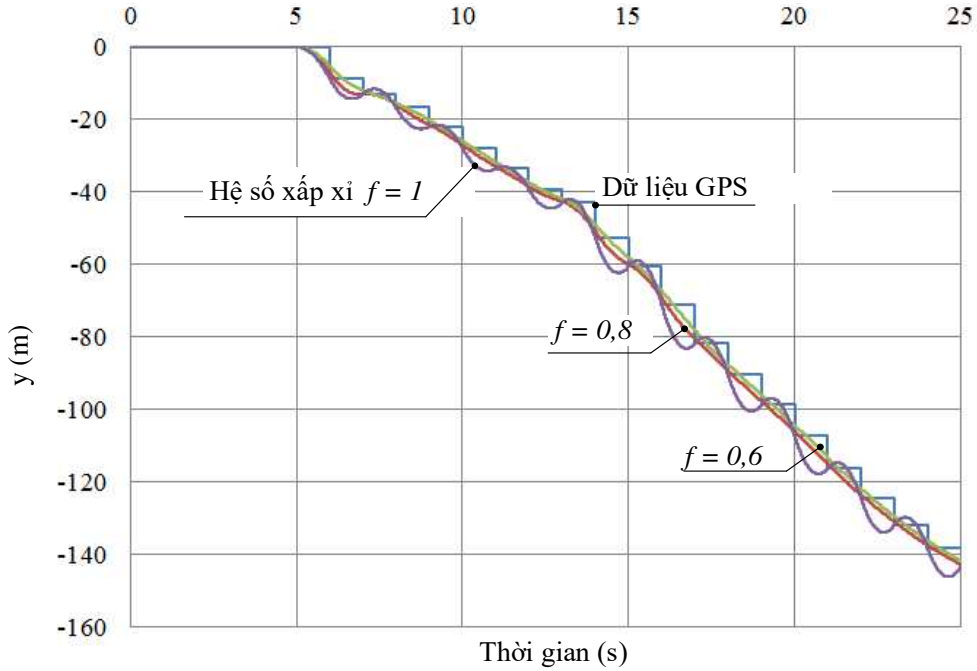
trong đó $a_i[n]$ - gia tốc của đối tượng nghiên cứu khi chuyển động từ điểm n đến điểm n+1 theo phương x, y và z; $\Delta t = t[n+1] - t[n]$ và $t[n]$, $t[n+1]$ - thời gian tại điểm n và n+1; $x[n]$, $x[n+1]$ - tọa độ của đối tượng nghiên cứu tại điểm n và n+1 theo phương x; $v_i[n]$ - vận tốc ban đầu tại điểm n; và f - hệ số xấp xỉ, có thể thay đổi từ 0 đến 1.



Hình 11. Ví dụ về quỹ đạo bốn điểm với các hệ số f khác nhau

Hệ số xấp xỉ xác định mức độ bám theo các điểm tham chiếu của quỹ đạo chuyển động mới được tạo thành bởi công thức (7). Nếu hệ số bằng 1, quỹ đạo sẽ đi qua các điểm tham chiếu. Nếu hệ số nhỏ hơn 1, nó sẽ nằm gần các điểm tham chiếu. Ví dụ về quỹ đạo cho bốn điểm tham chiếu với các hệ số xấp xỉ khác nhau được trình bày trong Hình 11.

Trên hình 12 biểu diễn một phần của quỹ đạo chuyển động và các quỹ đạo gần đúng của nó với các hệ số xấp xỉ khác nhau. Dễ dàng nhận thấy, quỹ đạo chuyển động của đối tượng nghiên cứu với hệ số xấp xỉ bằng 1 có độ dao động lớn, ứng với trường hợp khi đối tượng nghiên cứu giảm tốc và dừng, gia tốc của xe sẽ thay đổi và bằng giá trị âm, và sau đó tiến đến giá trị 0. Khi hệ số bằng 0,6, quỹ đạo tương đối trơn nhưng có xu hướng đi lệch ra xa các điểm tham chiếu một khoảng lớn hơn sai số của bộ thu GPS. Kết quả tốt nhất thu được với hệ số xấp xỉ bằng 0,8 khi đó quỹ đạo không có độ dao động và bám theo các điểm tham chiếu.



Hình 12. Kết quả của quá trình xử lý một phần tuyến đường

4. Kết luận

Với sự phát triển vượt bậc của công nghệ định vị toàn cầu (GPS), việc ứng dụng GPS trong nghiên cứu và phân tích các tham số động học của ô tô đã trở nên phổ biến và mang lại nhiều lợi ích thiết thực. GPS không chỉ hỗ trợ xác định vị trí mà còn cung cấp các thông tin về vận tốc, gia tốc và quỹ đạo di chuyển của phương tiện với độ chính xác cao. Các thông tin này

sẽ trở thành các dữ liệu đầu vào quan trọng trong bài toán phân tích, xử lý, hiệu chỉnh để tính toán , nâng cao độ chính xác các tham số động học của ô tô, góp phần tối ưu hóa hiệu suất vận hành, tiết kiệm nhiên liệu tiêu thụ và nâng cao độ an toàn.

Tài liệu tham khảo

1. К. Одуан, Б. Гино, Ю. С. Домина, В.М. Татаренкова, М. Б. Кауфмана. *Измерение времени. Основы GPS* / – Москва: Техносфера, 2002. – 400 с.

2. Алямкин Д. И., Анучин А. С., Козаченко В. Ф., Лашкевич М. М., Остриров В. Н. *Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта* // Электротехника журнал 2015. № 1, С. 5–8.

3. К. Одуан, Б. Гино, Ю. С. Домина, В.М. Татаренкова, М. Б. Кауфмана. *Измерение времени. Основы GPS* – Москва: Техносфера, 2002. – 400 с.

4. М.Р. Богданов. *Применение GPS/ГЛОНАСС*: Учебное пособие /–Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 136 с.

5. Egor Kulik, Xuan Trung Tran, Alecksey Anuchin. *Estimation of the Re-quirements for Hybrid Electric Powertrain Based on Analysis of Vehicle Trajec-tory Using GPS and Accelerometer Data*, International Workshop on Electric Drives (IWED2018)

6. Egor Kulik, Xuan Trung Tran, Alecksey Anuchin, Yuriy Vagapov. *GPS-track data processing for the optimization of the powertrain for hybrid electric vehicles* - 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), p.5, 2017, (DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124845).

7. Trần Xuân Trung, Nguyễn Hữu Nam, Phùng Văn Bình, Vũ Hải Hà. *Phương pháp tối ưu hóa các thông số của ô tô dựa trên phân tích quỹ đạo chuyển động*. Tạp chí Khoa học và công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội - 12/2021.

Research on methods to improve the accuracy of vehicle motion parameters based on GPS data

Abstract: *The paper presents a method for determining and improving the accuracy of kinematic parameters such as normal acceleration, tangential acceleration, and vehicle velocity based on the analysis and processing of GPS data. This method helps overcome the disadvantages of GPS orbits such as high position error and low sampling rate. The obtained data can be used as input data for calculations or simulation models for optimization problems in other fields such as robotics, tracking, mapping...*

Keywords: GPS; data; trajectory; analysis.

Phát hiện rung nhĩ trong tín hiệu điện tim bằng phương pháp học máy kết hợp cửa sổ trượt sử dụng entropy xấp xỉ

Đỗ Ngọc Thương *(Học viện kỹ thuật quân sự;*, **Trần Ngọc Quang** *(Học viện kỹ thuật quân sự)*, **Phạm Văn Thuận** *(Học viện kỹ thuật quân sự)*

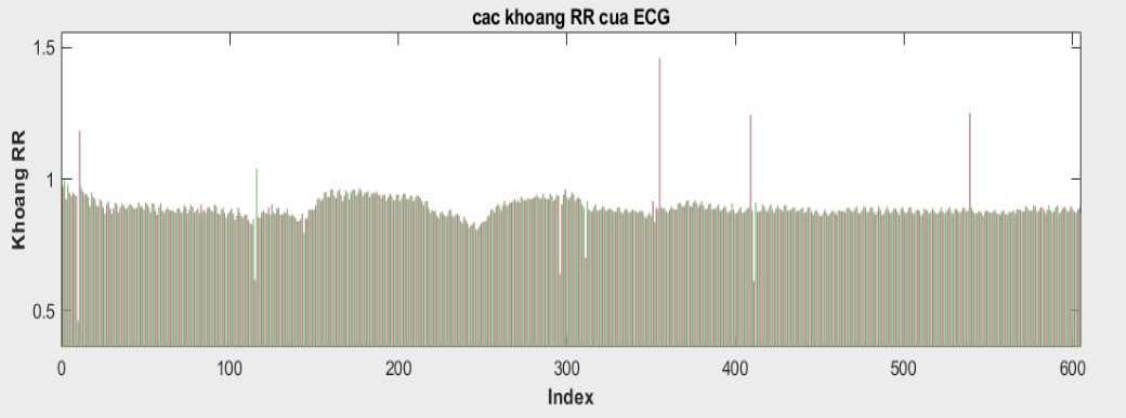
Email: bigdragon2k92@gmail.com)

Tóm tắt: Bài báo này đưa ra cách tiếp cận entropy nghiên cứu biến thiên nhịp tim. Phân tích và đánh giá sự thay đổi entropy xấp xỉ của chuỗi các khoảng RR trong tín hiệu điện tim ở các trường hợp khác nhau. Đề xuất phương pháp cửa sổ trượt entropy xấp xỉ và học máy để phát hiện rung nhĩ. Phương pháp đề xuất đã đạt độ chính xác trên 94% trên bộ cơ sở dữ liệu (CSDL) rung nhĩ. Bài báo đưa ra việc cải thiện hiệu quả phân loại rung nhĩ thông qua sử dụng cửa sổ trượt và các đặc trưng phi tuyến tính như entropy xấp xỉ, số mũ Hurst và độ lệch chuẩn. Trong bài báo sẽ sử dụng một số bản ghi điện tim của bộ cơ sở dữ liệu MIT-BIH Atrial Fibrillation Database với số mẫu được lấy như trong Bảng 1. MIT-BIH Atrial Fibrillation Database được phát triển để hỗ trợ nghiên cứu về rung nhĩ, một loại rối loạn nhịp tim phổ biến. Bộ cơ sở dữ liệu này được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về phát hiện và phân loại rung nhĩ từ tín hiệu điện tim (ECG).

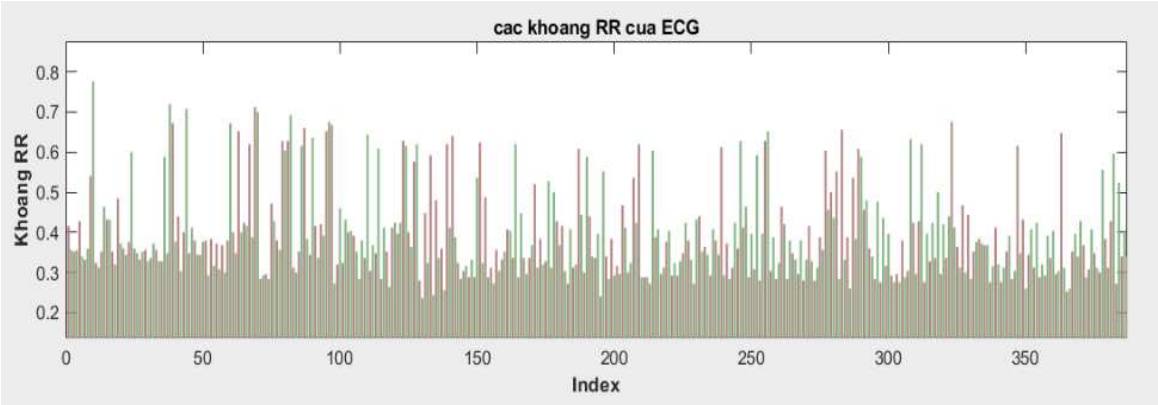
Từ khóa: *Entropy xấp xỉ; khoảng RR.*

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, trong số những vấn đề quan trọng của các nghiên cứu về tim mạch đòi hỏi các giải pháp thực tế đó là phát hiện các loạn nhịp tim phức tạp. Một trong những dấu hiệu của chúng là sự thay đổi không theo trật tự (hỗn loạn) các khoảng thời gian giữa các nhịp tim trên điện tâm đồ ECG. Trong các căn bệnh liên quan tới tim mạch thì các chứng rối loạn nhịp tim chiếm tỉ lệ lớn, trong đó sự thay đổi bất thường độ dài các chu trình tim được gọi là rung nhĩ, chúng có cấu trúc rất phức tạp và là căn bệnh nguy hiểm. Rung nhĩ là một loại rối loạn nhịp nhanh trên thất với hoạt động điện hỗn loạn của tâm nhĩ với tần số xung 350-700 lần mỗi phút, rối loạn này làm mất khả năng co bóp phối hợp của tim. Trên tín hiệu điện tim (ECG) rung nhĩ xuất hiện dưới dạng các phức hợp thất xuất hiện hỗn loạn, trong khoảng giữa các phức hợp này có các sóng hoạt động tự phát của nhĩ [1-3].



Hình 1. Minh họa các khoảng RR của 1 đoạn tín hiệu bình thường của bản ghi 04048



Hình 2. Minh họa các khoảng RR của 1 đoạn tín hiệu rung nhĩ của bản ghi 04048

Vị trí các đỉnh R có sẵn trong bộ CSDL sử dụng và lưu dưới file dạng .qrs. Cụ thể là số thứ tự các mẫu là đỉnh R trong tín hiệu. Trên Hình 1,2 là minh họa RR của bản ghi bình thường và bản ghi có rung nhĩ.

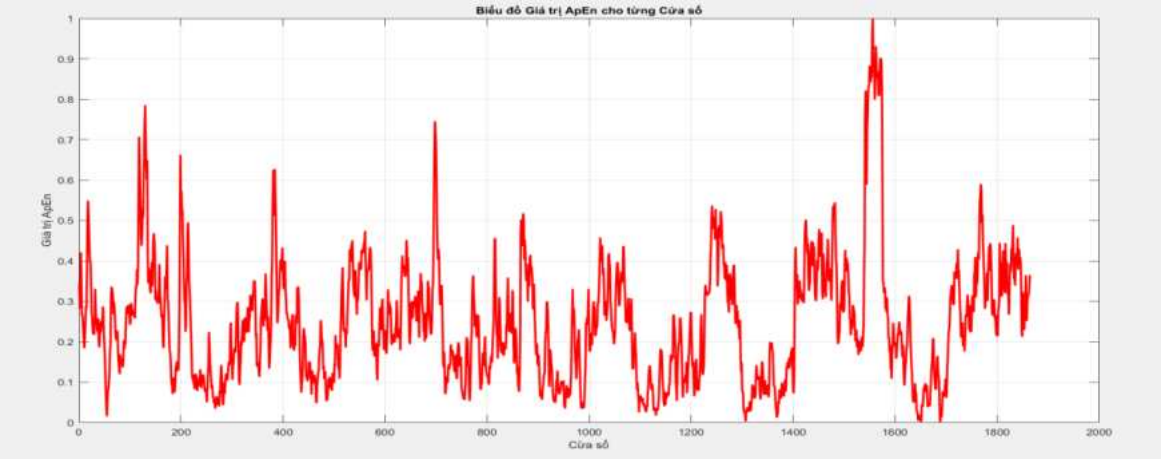
2. Phương pháp

Các thuật toán hiện tại để nhận dạng rung nhĩ có thể chia thành ba nhóm chính. Nhóm đầu tiên bao gồm các thuật toán dựa trên việc phát hiện sự không đều trong chuỗi các khoảng RR. Các thuật toán này bao gồm: thuật toán Moody và Mark [4], sử dụng mô hình chuỗi Markov để phát hiện sự không đều này; thuật toán Logan và Healey [5], sử dụng phân tích phân tán; thuật toán Linker [6], sử dụng kết hợp các cửa sổ thống kê; thuật toán Tatento và Glass [7], sử dụng mô hình Kolmogorov-Smirnov; và thuật toán Cerutti cùng cộng sự [8], sử dụng mô hình tự hồi quy. Nhóm thứ hai bao gồm các thuật toán dựa trên việc xác định sự vắng mặt của sóng P trên điện tâm đồ, đặc biệt là thuật toán của Slocum cùng cộng sự [6], sử dụng phân tích phổ của ECG. Nhóm thứ ba bao gồm các thuật toán kết hợp cả hai phương pháp đã mô tả ở trên, chẳng hạn như thuật toán của Schmidt cùng cộng sự [10], dựa trên sự kết hợp của chuỗi Markov và phân tích phổ; thuật toán của Babaeizadeh cùng cộng sự [11], kết hợp phát hiện sự không đều của khoảng RR với việc nghiên cứu vị trí và hình thái của sóng P; và thuật toán của Couceiro cùng cộng sự [12], sử dụng mạng nơron.

Trong bài báo này chúng tôi đề xuất một phương pháp mới phát hiện rung nhĩ thời gian thực dựa trên đánh giá entropy xấp xỉ chuỗi thời gian các khoảng RR. Phương pháp phân tích chuỗi thời gian dựa trên đánh giá entropy thuộc nhóm các phương pháp động lực phi tuyến. Những năm gần đây các phương pháp động lực phi tuyến được sử dụng rộng rãi trong phân tích tín hiệu y sinh. Đối với chuỗi thời gian không đồng đều, chẳng hạn như chuỗi các khoảng RR, các phương pháp entropy để xác định độ phức tạp của chuỗi bắt đầu được sử dụng và phát triển từ năm 1991, sau khi định nghĩa entropy xấp xỉ (Pincus, 1991). Entropy xấp xỉ (ApEn) là một đặc tính của "trật tự nội bộ" của chuỗi thời gian các khoảng RR (Gudkov, 2009; Acharya et. al., 2006). Về mặt toán học, entropy ApEn phản ánh xác suất phát hiện hai vectơ lân cận theo một chuỗi khác nhau khi di chuyển từ không gian có chiều m sang không gian có chiều m+1. Nói cách khác, giá trị ApEn càng cao thì càng chứa nhiều thay đổi không đồng đều.

Trong các công trình [13-20], entropy xấp xỉ ApEn được sử dụng như là chỉ số về mức độ trật tự của chuỗi thời gian các khoảng RR và được dùng cho bài toán phân loại nhịp tim.Khi xử lý dữ liệu trong thời gian thực, việc phân tích tín hiệu không nên thực hiện trên toàn bộ bản ghi

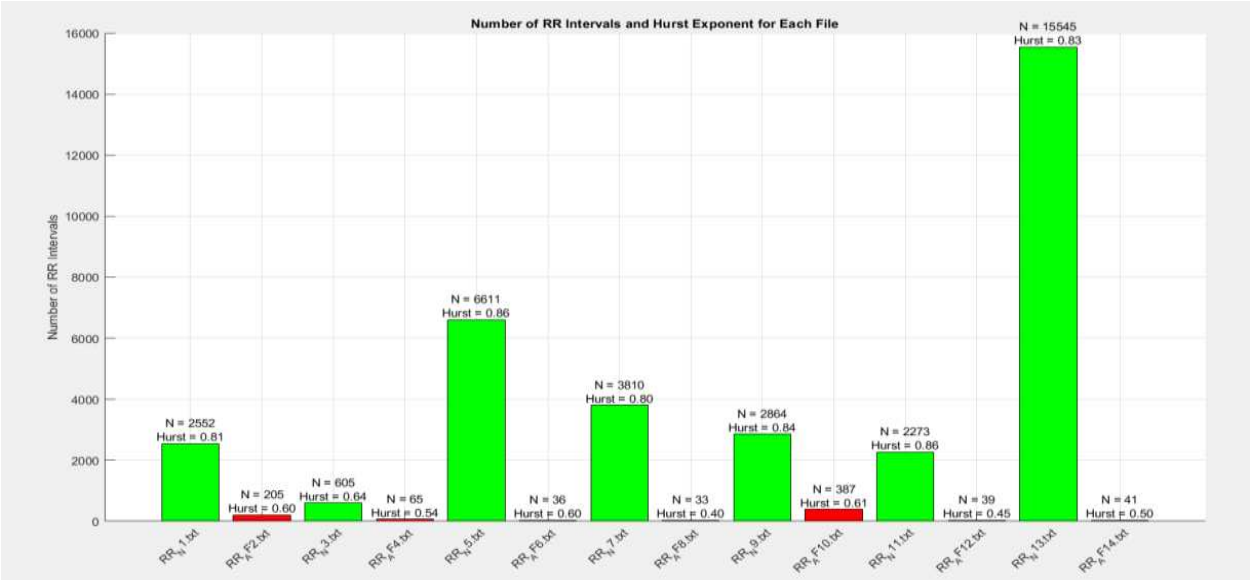
mà sử dụng các đoạn nhỏ được chọn theo trình tự. Điều này đòi hỏi thời gian trễ giữa thời điểm dữ liệu đến đầu vào của thuật toán và thời điểm kết quả xử lý phải càng ngắn càng tốt. Trong thuật toán được đề xuất, dữ liệu được xử lý theo từng đoạn gồm 80 khoảng RR với bước 20 giây [24]. Sử dụng thuật toán tính entropy xấp xỉ trong [15], ta có thể đánh thu được giá trị entropy xấp xỉ cho các phân đoạn RR bình thường và có rung nhĩ.



Hình 3. Biểu đồ một số các giá trị ApEn của bản ghi 04048

Trên Hình 3 là kết quả ApEn của các cửa sổ trượt trong bản ghi 04048, trên hình đang minh họa giá trị ApEn của 1864 của sổ.

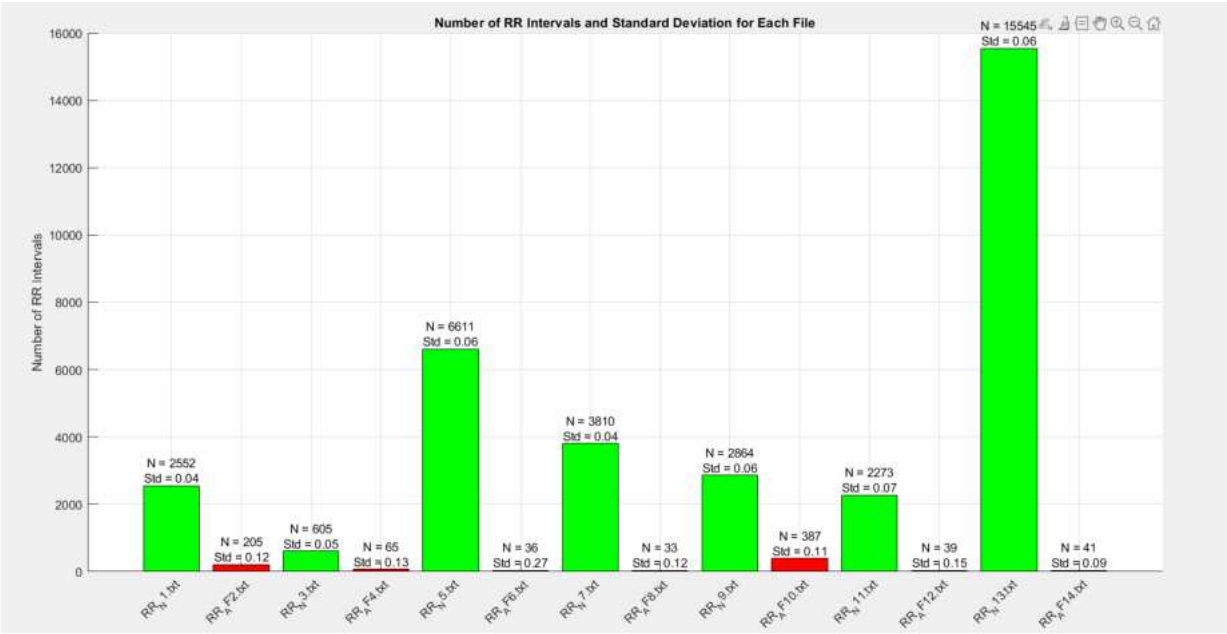
Các công trình nghiên cứu về biến thiên nhịp tim (HRV) đã chỉ ra rằng các phương pháp động lực phi tuyến cho phép tìm ra các quy luật trong chuỗi thời gian, vốn ban đầu có vẻ hoàn toàn ngẫu nhiên. Đồng thời, một số sai lệch trong cấu trúc chuỗi thời gian, quan trọng về mặt chẩn đoán, lại liên quan đến các tính chất phi tuyến tính của tín hiệu được phân tích. Mặt khác các phép đo HRV thông thường không thể phát hiện được các thay đổi nhỏ trong cấu trúc thời gian của sự điều hòa nhịp tim [21]. Để nâng cao khả năng phát hiện các thay đổi trong cấu trúc thời gian tín hiệu nhịp tim, một yếu tố góp phần nâng cao độ nhạy của phương pháp phát hiện rung nhĩ trong nghiên cứu này đề xuất đánh giá thêm số mũ Hurst (H) của chuỗi các khoảng RR. Nhịp tim thường có cấu trúc bất biến tỉ lệ, tức là cấu trúc của nó lặp lại ở các khoảng thời gian con Chỉ số Hurst là một đại lượng được sử dụng tích cực để đánh giá tính tự đồng dạng và các thuộc tính tương quan của chuỗi thời gian. Chỉ số Hurst cũng được dùng để xác định sự hiện diện có hay không sự phụ thuộc lũy thừa trong tín hiệu. Khi phân tích động lực học nhịp tim, chỉ số Hurst có thể được áp dụng để mô tả hành vi không ổn định của các giai đoạn trong biểu đồ nhịp tim [22]. Sử dụng phương pháp phân tích biên độ chuẩn hóa (phân tích R/S) và thuật toán tính chỉ số mũ Hurst trong [23] ta được các giá trị số mũ Hurst cho bản ghi RR 04048, minh họa trên hình dưới đây.



Hình 4. Số mũ Hurst của 1 số đoạn tín hiệu trong bản ghi 04048

Trên Hình 4 là giá trị số mũ Hurst của chuỗi các khoảng RR của bản ghi 04048 . Các cột màu xanh thể hiện đoạn tín hiệu bình thường, các cột màu đỏ thể hiện đoạn tín hiệu rung nhĩ. N: số các khoảng RR trong mỗi đoạn; Hurst: số mũ Hurst của mỗi đoạn.

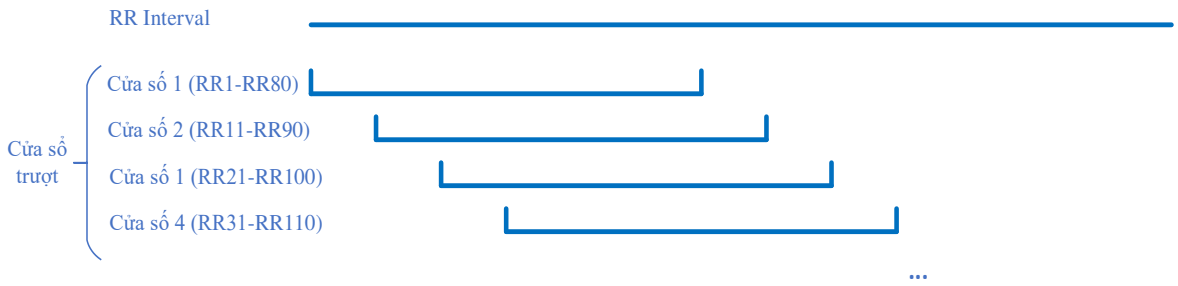
Một chỉ số thống kê khác cũng được sử dụng để đánh giá mức độ thay đổi của các khoảng thời gian nhịp tim và mức độ thường xuyên (tính điều hòa) của chúng đó là độ lệch chuẩn Sd. Chỉ số này là 1 tham số quan trọng của HRV phân tích trong miền thời gian, nó cho phép đánh giá mức độ tản mát giá dộ dài các khoảng RR xung quanh giá trị trung bình. Hình 5 minh họa độ lệch chuẩn các khoảng RR của các đoạn bình thường và rung nhĩ.



Hình 5. Kết quả độ lệch chuẩn của 1 số đoạn tín hiệu trong bản ghi 04048

Trên Hình 5 là giá trị độ lệch chuẩn Std chuỗi các khoảng RR của bản ghi 04048.. Các cột màu xanh thể hiện đoạn tín hiệu bình thường, các cột màu đỏ thể hiện đoạn tín hiệu rung nhĩ. N: số các khoảng RR trong mỗi đoạn; Hurst: số mũ Hurst của mỗi đoạn.

Cửa sổ trượt sử dụng để tính các đặc trưng được minh họa trên Hình 6



Hình 6. Mô hình cửa sổ trượt trích xuất đặc trưng.

Độ dài cửa sổ (Window size): Mỗi cửa sổ có độ dài là 80, tức là mỗi lần tính toán sẽ xem xét 80 khoảng RR liên tiếp trong chuỗi RR intervals. Bước trượt (Step size): Bước trượt của cửa sổ là 20, có nghĩa là sau mỗi lần tính toán, cửa sổ sẽ di chuyển thêm 20 phần tử RR để tính cho cửa sổ tiếp theo. Ví dụ, nếu cửa sổ đầu tiên là từ phần tử 1 đến 80, thì cửa sổ tiếp theo sẽ là từ phần tử 21 đến 100, và cứ tiếp tục như vậy cho đến khi hết chuỗi RR intervals. Số lượng cửa sổ phụ thuộc vào chiều dài của dữ liệu, kích thước cửa sổ, và bước trượt.

Quá trình gán nhãn cho các cửa sổ dựa trên cách đếm số lượng các khoảng RR nằm trong các khoảng **lẻ** và **chẵn** dựa trên danh sách các vị trí được lưu trong file vitri.txt. Chi tiết cách gán nhãn như sau:

Vị trí các khoảng RR: Danh sách vitri chứa các vị trí chia dữ liệu RR intervals thành các khoảng. Các khoảng lẻ (1, 3, 5, ...) được xem là tương ứng với các khoảng "bình thường", trong khi các khoảng chẵn (2, 4, 6, ...) được xem là tương ứng với các khoảng "rung nhĩ".

Đếm số lượng khoảng RR trong mỗi cửa sổ: Với mỗi cửa sổ trượt, mã code sẽ kiểm tra từng phần tử RR trong cửa sổ đó để xem phần tử này nằm trong khoảng lẻ hay chẵn, từ đó đếm số lượng RR trong từng khoảng lẻ và chẵn.

Gán nhãn:

Nếu *số lượng khoảng RR trong các khoảng lẻ* nhiều hơn các khoảng chẵn, cửa sổ đó được gán nhãn là 0 (bình thường).

Nếu *số lượng khoảng RR trong các khoảng chẵn* nhiều hơn, cửa sổ đó được gán nhãn là 1 (rung nhĩ).

Nếu số lượng bằng nhau, nhãn 0 sẽ được ưu tiên.

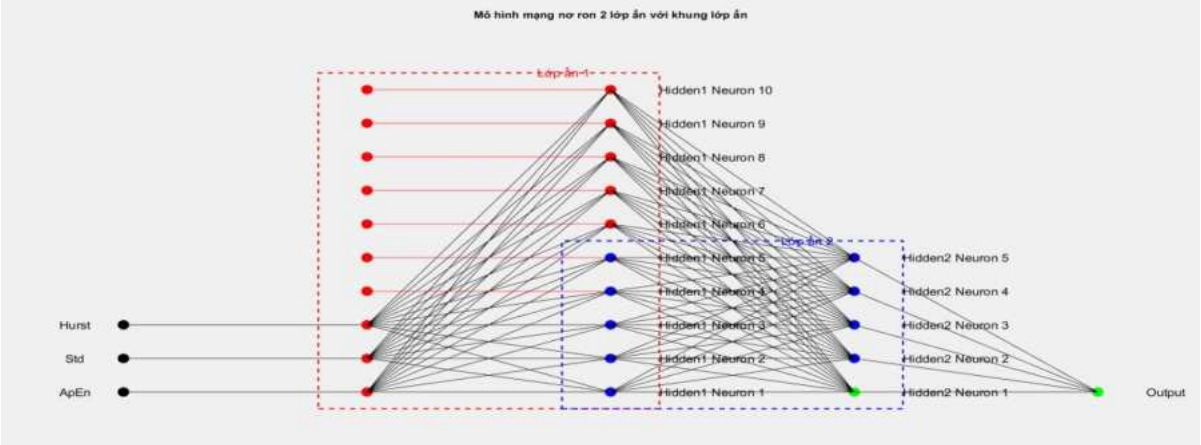
Bằng cách này, mỗi cửa sổ trượt sẽ được gán một nhãn 0 hoặc 1 dựa trên vị trí các khoảng RR và thuộc tính của các khoảng lẻ/chẵn trong danh sách vitri.

Các tham số entropy xấp xỉ ApEn, số mũ Hurst H và độ lệch chuẩn Std được đưa tới đầu vào noron để huấn luyện phát hiện.

3. Mô hình phát hiện và kết quả

Mô hình mạng nơ ron được chỉ ra trên Hình 7. Đây là mạng truyền thẳng (Feedforward Neural Network), dữ liệu đi theo một chiều từ đầu vào đến đầu ra mà không có sự hồi tiếp (feedback). Cụ thể, mạng nơ-ron được khởi tạo với một cấu trúc có các tầng ẩn với số lượng nơ-ron xác định. Mô hình mạng nơ-ron có cấu trúc gồm 2 lớp ẩn với 10 nơ-ron trong lớp đầu tiên và 5 nơ-ron trong lớp thứ hai. Việc chọn cấu trúc này phản ánh một số đặc điểm và ưu điểm quan trọng của mạng nơ-ron trong việc học và phân loại. Việc sử dụng nhiều lớp ẩn giúp mô hình có khả năng học và mô hình hóa các mối quan hệ phức tạp giữa các đặc trưng đầu vào (như ApEn, độ lệch chuẩn và Hurst exponent). Mặt khác mỗi lớp ẩn có thể học các đặc trưng khác nhau từ dữ

liệu. Các lớp ẩn cho phép mô hình nắm bắt các tương tác không tuyến tính giữa các đầu vào. Điều này rất quan trọng trong các bài toán phân loại, nơi mà mối quan hệ giữa các đặc trưng và nhãn không phải lúc nào cũng là tuyến tính. Việc thêm các lớp ẩn cho phép mô hình tổng quát hóa tốt hơn trên dữ liệu chưa thấy. Điều này có thể cải thiện hiệu suất phân loại khi áp dụng mô hình vào các tập dữ liệu khác.



Hình 7. Mô hình mạng nơ ron được sử dụng

Số lượng 10 nơ-ron trong lớp đầu tiên đảm bảo đủ để nắm bắt các đặc trưng phức tạp từ dữ liệu đầu vào. Lớp đầu tiên thường được xem như một bộ lọc cho các đặc trưng chính. Ngoài ra số nơ-ron này có khả năng phát hiện các đặc trưng cơ bản, giúp mạng bắt đầu từ những thông tin quan trọng nhất. Số lượng nơ-ron ít hơn trong lớp thứ hai (5 nơ-ron) giúp giảm thiểu độ phức tạp của mô hình, từ đó tránh tình trạng quá khớp (overfitting) trong khi vẫn duy trì khả năng học các mẫu từ dữ liệu. Lớp thứ hai thường tập trung vào việc tổng hợp các đặc trưng đã được học từ lớp đầu tiên và đưa ra dự đoán cuối cùng.

Trọng bài báo này sử dụng 2 mô hình phát hiện: mô hình không trọng số cho các dặc trưng đầu vào và mô hình có trọng số. Với mô hình không trọng số thì ảnh hưởng của các đặc trưng (Entropy xấp xỉ ApEn, số mũ Hurst H, độ lệch chuẩn Std) là như nhau. Trong mô hình có trọng số thì trọng số của entropy xấp xỉ là 0.8, trọng số của số mũ Hurst H là 0.1 và của độ lệch chuẩn là 0.1.

Trên Bảng 1 là kết quả chạy dữ liệu cho cả 2 mô hình. Các tham số bản ghi, thông số cửa sổ và chất lượng mô hình được chỉ ra cụ thể. Chỉ tiêu đánh giá chất lượng sẽ bao gồm độ chính xác, độ nhạy và độ đặc hiệu.

Độ chính xác (Accuracy): Đây là tỷ lệ số dự đoán đúng trên tổng số dự đoán. Chỉ số này phản ánh khả năng của mô hình trong việc phân loại chính xác các tín hiệu. Công thức tính độ chính xác được mô tả như sau:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Trong đó:

- TP (True Positive): Số tín hiệu rung nhĩ được dự đoán đúng.
- TN (True Negative): Số tín hiệu bình thường được dự đoán đúng.
- FP (False Positive): Số tín hiệu bình thường nhưng lại bị dự đoán là rung nhĩ.
- FN (False Negative): Số tín hiệu rung nhĩ nhưng lại bị dự đoán là bình thường.

Độ nhạy (Sensitivity): Còn được gọi là tỷ lệ phát hiện, độ nhạy đo lường khả năng của mô hình trong việc phát hiện đúng các tín hiệu rung nhĩ. Công thức tính độ nhạy là:

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}$$

Độ nhạy cao cho thấy mô hình có khả năng phát hiện tốt các trường hợp rung nhĩ, điều này rất quan trọng trong lâm sàng vì giúp giảm thiểu số lượng trường hợp bệnh nhân mắc bệnh mà không được phát hiện.

Độ đặc hiệu (Specificity): Độ đặc hiệu đo lường khả năng của mô hình trong việc xác định đúng các tín hiệu bình thường. Công thức tính độ đặc hiệu là:

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}$$

Chỉ số này cho thấy khả năng của mô hình trong việc tránh các cảnh báo sai (false positives) đối với tín hiệu bình thường.

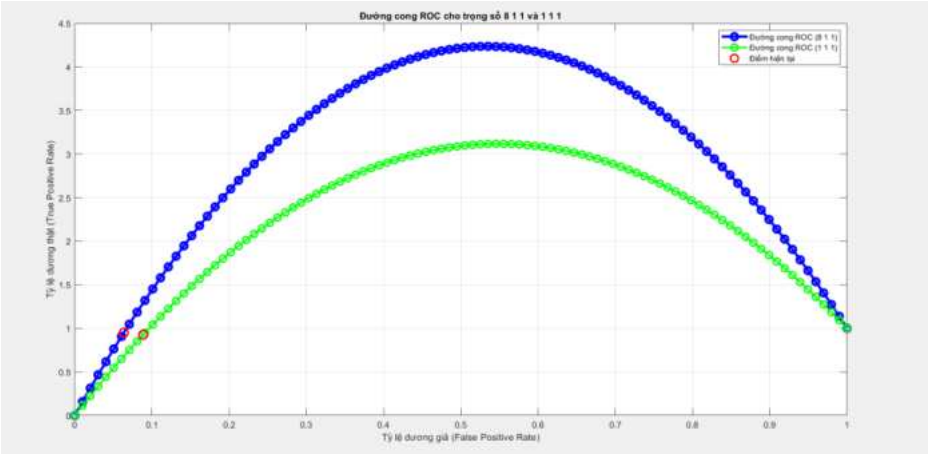
Ba chỉ số này cung cấp cái nhìn tổng quan về hiệu suất của mô hình phân loại và giúp các nhà nghiên cứu đánh giá độ tin cậy cũng như tính khả thi của mô hình trong ứng dụng thực tiễn.

Bảng 1. Kết quả chạy dữ liệu cho mô hình với 2 bộ trọng số

Bản ghi	Số mẫu đã lấy		Độ dài kiểm tra theo mẫu	Số cửa sổ	Cửa sổ bắt đầu kiểm tra	Kết quả trọng số 8 1 1 (%)			Kết quả không trọng số(%)		
	Từ	Đến				Độ chính xác	Độ nhạy	Độ đặc hiệu	Độ chính xác	Độ nhạy	Độ đặc hiệu
04015	0	1,500,000	1,500,000	835	87	99.66	92.00	100.00	99.20	88.00	99.59
04043	2,500,000	4,000,000	1,500,000	1,043	774	91.11	90.86	91.67	66.67	52.69	97.62
04048	300,000	4,300,000	4,000,000	1,864	1,252	99.51	100.00	99.48	99.67	100.00	99.65
04126	0	1,000,000	1,000,000	725	543	95.08	98.95	90.91	88.52	95.79	80.68
04746	1,000,000	7,600,000	6,600,000	3,725	2,533	99.75	100.00	92.50	99.66	100.00	90.00
04908	0	3,500,000	3,500,000	2,379	1,293	89.67	99.61	88.33	75.62	98.61	73.89
04936	0	8,000,000	8,000,000	4,520	4,172	91.12	90.73	93.62	91.12	90.40	95.74
05121	700,000	2,700,000	2,000,000	1,071	857	87.32	87.02	100.00	87.91	87.56	100.00
06453	7,000,000	7,800,000	800,000	315	189	95.28	100.00	94.96	77.95	100.00	76.47
08219	3,000,000	5,000,000	2,000,000	1,351	1,040	87.82	88.33	86.11	85.90	87.50	80.56
Tổng			**30,900,000**	**17,828**							
Trung bình						**94.08**	**95.09**	**93.63**	**90.53**	**92.73**	**91.13**

Kết quả phát hiện cho thấy chất lượng của mô hình có trọng số cao hơn đáng kể so với mô hình không trọng số. Điều này được lý giải như sau. Trong mô hình có trọng số, trọng số entropy được chọn bằng 0.8, nó cho thấy Approximate Entropy (ApEn) là một đặc trưng quan trọng trong việc đánh giá tính bất thường của chuỗi RR intervals. ApEn giúp xác định mức độ phức tạp và sự không chắc chắn của tín hiệu sinh học, vì vậy nó rất có giá trị trong việc phân loại các tình trạng như rung nhĩ (AF) và các tình trạng tim mạch khác. ApEn có khả năng phát hiện các mẫu bất thường trong dữ liệu tốt hơn so với các đặc trưng khác, do đó, đặc trưmg này được ưu tiên cao hơn trong việc ảnh hưởng đến quyết định của mô hình. Trọng số cao hơn cho ApEn cho phép mô hình nhấn mạnh vào những thông tin quan trọng này.

Vẽ đường cong ROC



Hình 8 . Đường cong ROC cho các mô hình phát hiện

Đường cong ROC của mô hình trọng số có độ nhạy cao hơn và tỷ lệ dương giả thấp hơn so với mô hình không trọng số , điều đó có nghĩa mô hình trọng số phân loại các trường hợp tốt hơn, ít nhầm lẫn hơn. Điều này thể hiện qua đường cong ROC của mô hình trọng số nằm cao hơn và sát với góc trên bên trái (lý tưởng). Điểm đỏ trên đồ thị đại diện cho mức hiệu suất hiện tại của mô hình. Một đường cong càng gần với góc trên bên trái biểu thị mô hình càng hiệu quả.

Bảng so sánh chất lượng các phương pháp được tổng hợp dưới đây với phương pháp trình bày trong bài báo được đặt tên là Mô hình QTT.

Bảng 2. So sánh chất lượng các phương pháp

Thuật toán	Chỉ số chất lượng			
	Độ dài cửa sổ	Độ nhạy (%)	Độ đặc hiệu (%)	Lỗi (%)
Moondy và Mark [6]	60	86.31	96.54	7.46
Logan n HeaII2y [7]	120	87.30	90.31	10.89
Linker [8]	10	97.64	85.55	9.61
Tatento và Glass [9]	50	91.20	96.08	5.32
Cerutti và cộng sự [10]	90	96.10	81.55	16.62
Slocum và cộng sự[11]	180	62.80	77.46	20.39
Schmidt và cộng sự [12]	60	89.20	94.58	7.57
Babaeizadeh và cộng sự [13]	40	87.27	95.47	7.80
Couceiro và cộng sự [14]	60	96.58	82.66	11.77
Mô hình QTT	**80**	**95.09**	**93.63**	**5.92**

Mô hình QTT thể hiện ưu điểm vượt trội so với các thuật toán khác khi có độ nhạy cao nhất (95.09%), đảm bảo khả năng phát hiện chính xác hơn. Đồng thời độ đặc hiệu đạt 93.63%, chỉ thấp hơn một số phương pháp khác nhưng vẫn ở mức rất cao, giúp giảm thiểu các trường hợp dương tính giả. Đặc biệt, tỷ lệ lỗi chỉ 5.92%, thấp nhất trong tất cả các thuật toán được so sánh, cho thấy mô hình này có độ chính xác tổng thể cao hơn đáng kể. Với độ dài cửa sổ là 80, phương pháp QTT cũng cân bằng tốt giữa các thuật toán sử dụng cửa sổ ngắn và dài, giúp tối ưu hiệu suất phân tích. Nhờ những ưu điểm này, mô hình QTT được đánh giá là phương pháp hiệu quả và đáng tin cậy.

4. Kết luận

Thuật toán phát hiện rung nhĩ được đề xuất đã cho kết quả tốt hơn so với các thuật toán khác hiện có. Cải thiện thêm có thể đạt được nhờ vào việc xác định chính xác hơn các giới hạn

của các giai đoạn rung nhĩ, cũng như bổ sung thuật toán bằng quy trình phân tích hoạt động của tâm nhĩ, đưa thêm các dấu hiệu đặc thù trên ECG khi rung nhĩ. Mô hình phát hiện dùng mạng nơ-ron có tính linh hoạt cao, nhờ khả năng thay đổi số lượng nơ-ron và lớp ẩn. Mô hình này có thể cải thiện độ chính xác phát hiện bằng cách kết hợp các đặc trưng khác nhau. Các khả năng chức năng của thuật toán có thể được mở rộng để nhận diện không chỉ rung nhĩ mà còn các rối loạn nhịp tim khác.

Tài liệu tham khảo

1. Hội Tim mạch học Việt nam (2022), Khuyến cáo chẩn đoán và xử trí rung nhĩ

2. Phạm Trần Linh, Vũ Huy Thành, Trần Song Giang, Phan Đình Phong, Một số nghiên cứu nổi bật về rối loạn nhịp tim năm 2023 , Tạp chí Tim mạch học Việt Nam: Số 107S(1) (2024)

3. Trịnh Bỉnh Dy. Sinh lý học, NXB Y học, Hà nội 2006

4. Moody G. B., Mark R. G. A new method for detecting atrial fibrillation using R-R intervals // Computers in Cardiology. 1983. № 10. P. 227–230.

5. Logan B., Healey J. Detection of Atrial Fibrillation for a Long Term Telemonitoring System // Computers in Cardiology. 2005. № 32. P. 619–622.

6. Linker D. T. Long-Term Monitoring for detection of Atrial Fibrillation. Seattle, US: Patent Application Publication, 2006. 498 p.

7. Tatento K., Glass L. Automatic detection of atrial fibrillation using the coefficient of variation and density histograms of RR and RR intervals // Medical & Biological Engineering & Computing. 2001. № 39. P. 664–671.

8. Analysis of the dynamics of RR interval series for the detection of atrial fibrillation episodes / S. Cerutti,L. T. Mainardi, A. Porta et al. // Computers in Cardiology. 1997. № 24. P. 77-80.

9. Slocum J., Sahakian A., Swiryn S. Diagnosis of Atrial Fibrillation from Surface Electrocardiograms Based on Computer-detected Atrial Activity // J. of Electrocardiology. 1992. № 25. P. 1–8.

10. Atrial Fibrillation / Detection R. Schmidt, M. Harris, D. Novac et al. Eindhoven, Netherlands: Patent CooperationTreaty, 2008. 731 p.

11. Improvements in atrial fibrillation detection for realtime monitoring / S. Babaeizadeh, R. Gregg, E. Helfenbein et al. // J. of Electrocardiology. 2009. № 42. P. 522–526.

12. Detection of Atrial Fibrillation using model-based ECG analysis / R. Couceiro, P. Carvalho, J. Henriques et al.// 19th International Conf. on Pattern Recognition, 2008.Tampa. P. 1–5.

13. Манило Л. А., Зозуля Е. П. Исследование возможности применения аппроксимированной энтропии для анализа биосигналов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Биотехнические системы в медицине и экологии. 2007. Вып. I. С. 3-9.

14.Манило Л. А., Немирно А. П. Аппроксимация энтропии Колмогорова при анализе хаотических процессов на конечных выборках // Математические методы распознавания образов ММРО-14: 14-я Всерос. конф. Владимирская обл., г. Суздаль. 21 26 сект. 2008) г.: сб. докл. – М.: МАКС Пресс, 2009. С. 405 407.

15.Манило Л. А. Распознавание фибрилляции предсердий в кардиологических системах диагностики и наблюдения // Биотехносфера. 2009, № 2. С. 41 45.

16.Nonlinear biomedical signal processing / ed. by Metin Akay. Vol. 2. Dynamic analysis and modelling. - New York: IEEE, 2001. - 341 p.

17.Манило Л. А., Зозуля Е. П. Исследование возможности применения аппроксимированной энтропии для анализа биосигналов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Биотехнические системы в медицине и экологии. 2007. Вып. I. С. 3-9.

18.Манило Л. А., Немирно А. П. Аппроксимация энтропии Колмогорова при анализе хаотических процессов на конечных выборках // Математические методы распознавания образов ММРО-14: 14-я Всерос. конф. Владимирская обл., г. Суздаль. 21 26 сект. 2008) г.: сб. докл. - М.: МАКС Пресс, 2009. С. 405 407.

19.Манило J1. А. Автоматический анализ электрокардиосигнала в задачах распознавания нарушений сердечного ритма // Биотехнические системы в медицине и биологии / Под общ. ред. проф. Е. П. Попечителева. -СПб.: Политехника, 2002. - С. 6168

20.Старченкова К.С., Манило Л.А., «Оценка энтропии ритмограмм для разных видов сердечных аритмий» Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. БИОМЕДСИСТЕМЫ - 2019, сборник трудов конференции. Издательство «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань, 2019, стр. 206-209.

21. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методическиерекомендации). // Вестник аритмологии, № 24, 2001. с. 65-87.

22. Антипов О.И., Мачихин В.А., Никушин Р.В. Корреляционный метод анализа электроэнцефалограммы // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий коммуникации» ПТиТТ-2016. 22-24 ноября. Самара. ПГУТИ

23. К.С. Старченкова Показатель Хёрста в анализе ритмограмм сердечного ритма [Текст]/ К.С. Старченкова// АО «Издательство «Политехника». Биотехносфера. - 2019. - №6. - С.37-40

24 *Моторина С. В., Калиниченко А. Н., Немирко А. П.* Выбор метода кластеризации для алгоритма выявления мерцательной аритмии // Биоиехносфера . 2015. № 4 (40). С.2-5.

Research on the Constant Fraction Discrimination (CFD) detection algorithm in determining object distance using laser technique

Abstract: This paper presents an entropy-based approach to studying heart rate variability. It analyzes and evaluates the changes in approximate entropy of RR interval sequences in electrocardiogram signals under different conditions. A sliding window method combined with approximate entropy and machine learning is proposed to detect atrial fibrillation. The proposed method achieved an accuracy of over 94% on the atrial fibrillation database. The paper highlights the improvement in atrial fibrillation classification effectiveness through the use of sliding windows and nonlinear features such as approximate entropy, Hurst exponent, and standard deviation. The study utilizes several electrocardiogram recordings from the MIT-BIH Atrial Fibrillation Database, with sample counts detailed in Table 1. The MIT-BIH Atrial Fibrillation Database was developed to support research on atrial fibrillation, a common type of cardiac arrhythmia. This database is widely used in studies on atrial fibrillation detection and classification from electrocardiogram (ECG) signals.

Keywords: *Approximate entropy; RR interval.*

Xây dựng bộ điều khiển dựa trên chế độ trượt để ổn định dòng điện cho động cơ bước lai

Nguyễn Việt Anh[1]*, Lê Minh Kiên[1], Trần Văn Nhân[2]

[1]Viện tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Khoa Tên lửa-Pháo tàu, Học viện Hải quân

**Email: vanhptmta@gmail.com, Số điện thoại: 0354705655*

Tóm tắt

Bài báo trình bày/đề xuất thuật toán điều khiển dòng điện dựa trên phương pháp điều khiển chế độ trượt để cải thiện chất lượng dòng điện trong hai cuộn dây pha của động cơ bước lai. Bộ điều khiển dòng điện đơn giản, hiệu quả, tin cậy và bền vững với tham số của động cơ. Chất lượng điều khiển bám dòng điện được chứng minh và xác thực thông qua các kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink.

Từ khoá: *Động cơ bước lai, điều khiển chế độ trượt.*

1. Đặt vấn đề

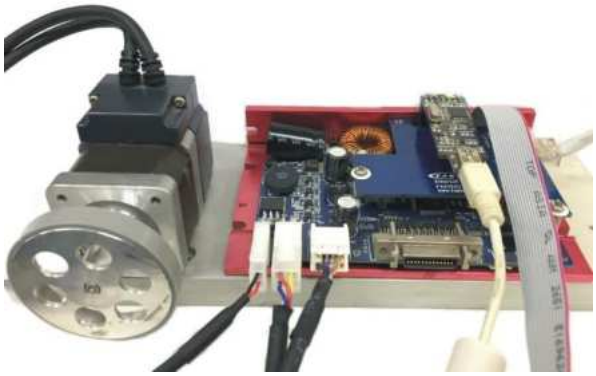
Động cơ bước lai là thiết bị truyền động được sử dụng trong nhiều ứng dụng yêu cầu chuyển động từng bước của rô to. Một ứng dụng phổ biến có thể dễ dàng tìm thấy trong các ngành công nghiệp rô bốt vì những động cơ này cung cấp khả năng kiểm soát tốt hơn và mượt mà hơn đối với vị trí và tốc độ; đồng thời chúng có đặc điểm là chi phí thấp và kích thước nhỏ. Động cơ bước lai hoạt động rất tin cậy, không tốn kém chi phí bảo trì bởi chúng không sử dụng chổi than như động cơ một chiều. Điều khiển vòng hở động cơ bước làm hạ giá thành sản phẩm, nhưng cũng làm cho hệ thống dễ bị ảnh hưởng của nhiễu và kết quả là làm giảm hiệu suất làm việc của hệ thống. Nếu không điều khiển phù hợp, những ảnh hưởng không mong muốn như dao động có thể xảy ra trong thiết bị và gây ra mất đồng bộ. Do đó mà một số luật điều khiển vòng kín đã được nghiên cứu và phát triển trong suốt thời gian qua nhằm tối ưu hoá thiết bị cho hiệu suất tốt hơn. Đã có rất nhiều tài liệu nghiên cứu về vấn đề này và nhiều tài liệu trong số đó sử dụng kỹ thuật tuyến tính hoá [1], [2] khai thác tính chất phẳng của động cơ bước lai, nhiễu loạn kỳ dị…Khác với các mô hình tuyến tính chúng có các chiến lược điều khiển vạn năng, mô hình phi tuyến không sở hữu tính chất này liên quan đến các trạng thái cân bằng [3] và tính ổn định. Mỗi mô hình phi tuyến có đặc tính ổn định riêng của chúng và việc xấp xỉ tuyến tính các mô hình phi tuyến không phải lúc nào cũng phù hợp.

Phương pháp điều khiển dựa trên chế độ trượt đã được chứng minh là có hiệu quả cao trong lĩnh vực máy điện [4]. Bộ điều khiển dựa trên phương pháp này là một dạng chỉnh sửa cơ bản của bộ điều khiển on-off, nó phụ thuộc vào trạng thái phản hồi. Bộ điều khiển này có xu hướng là thay đổi cấu trúc của hệ thống và do đó nó còn có tên gọi khác là hệ thống điều khiển có cấu trúc thay đổi. Hệ thống này bao gồm các cấu trúc độc lập khác nhau cùng với một thuật toán chuyển mạch logic và phản ứng tổng thể của hệ thống khác bất cứ cấu trúc độc lập nào của nó. Thuật toán điều khiển dựa trên chế độ trượt là kỹ thuật điều khiển với nhiều đặc điểm nổi bật như có độ chính xác cao, tính bền vững, dễ dàng chỉnh định và thực hiện. Tuy nhiên, hiện tượng chattering, gây nên bởi các thành phần được sử dụng để thực thi bộ điều khiển cũng như động cơ được sử dụng trong mô hình hoá là nhược điểm lớn nhất của bộ điều khiển này, đặc điểm này làm giảm độ chính xác của bộ điều khiển, gây ra tổn thất nhiệt

lớn trong các thiết bị chuyển mạch điện tử, làm giảm tuổi thọ của các bộ phận cơ khí trong hệ thống. Đồng thời nó cũng kích thích các tần số động học không được mô hình hoá làm suy giảm hiệu suất của hệ thống, và thậm chí dẫn đến mất ổn định hệ thống nếu không được quan tâm phù hợp.

2. Nội dung

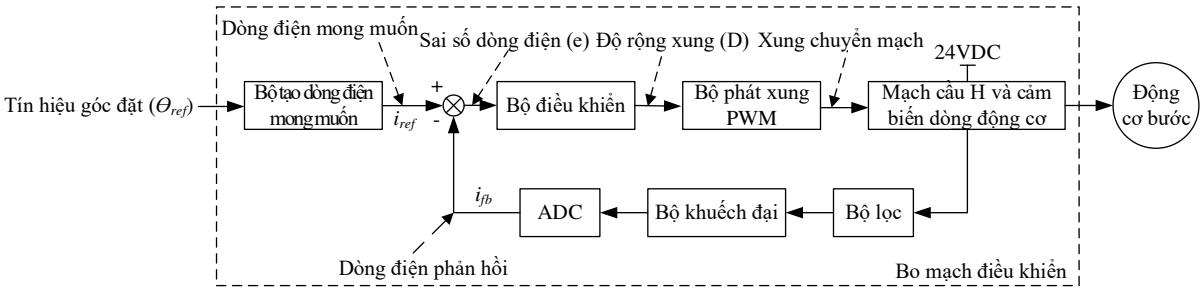
Trong bài báo này chúng tôi xây dựng mô hình và bộ điều khiển cho động cơ bước lai thực tế bao gồm: động cơ bước lai EzM-24L và bo mạch điều khiển động cơ tương ứng sử dụng TMS320F2812DSP. Hình ảnh thực tế của mô hình được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Mô hình động cơ và bo mạch điều khiển động cơ sử dụng TMS320F2812 DSP

2.1. Vòng điều khiển dòng điện động cơ bước lai

Hình 2 mô tả sơ đồ khối vòng điều khiển dòng điện động cơ bước lai trên mô hình thực tế.



Hình 2. Sơ đồi khối vòng điều chỉnh dòng điện

Bộ điều khiển dòng nhận tín hiệu sai lệch e (sai khác giữa dòng điện mong muốn i_{ref} và dòng điện phản hồi i_{fb}), thực hiện các thuật toán điều khiển để tạo ra giá trị độ rộng xung (Duty cycle) và đưa tới Bộ phát xung PWM để tạo ra các xung chuyển mạch với độ rộng xung thay đổi, đầu ra của Bộ phát xung sau đó được đưa tới các đầu vào của mạch cầu H để lái động cơ. Hai điện trở shunt được tích hợp trên Mạch cầu H để gián tiếp thu thập thông tin dòng điện trong hai pha của động cơ bước lai. Các tín hiệu này được đưa qua Bộ lọc để loại bỏ các hài bậc cao, tiếp đó được đưa tới Bộ khuyếch đại để đạt được biên độ mong muốn, sau cùng tín hiệu được đưa tới Bộ ADC của vi điều khiển.

Bảng 1 mô tả thông số của động cơ bước lai được sử dụng cho bài báo này.

Bảng 1: Tham số của động cơ EzM-24L

Tham số	Giá trị
Điện áp cung cấp (V_d)	24 V
Dòng điện lớn nhất ($I_{\max}$)	0.85 A

Điện trở cuộn dây (R_s)	5.45 Ω
Điện cảm cuộn dây L_s	9.3078 mH

2.2. Mô hình toán học động cơ bước lai

Mô hình toán học phần điện của động cơ bước lai được mô tả bởi hệ phương trình (1) như dưới đây.

$$\begin{cases} L_s \dfrac{di_a(t)}{dt} = v_a(t) - R_s i_a(t) + K_m \omega(t) \sin(N_r \theta(t)) \\ L_s \dfrac{di_b(t)}{dt} = v_b(t) - R_s i_b(t) - K_m \omega(t) \cos(N_r \theta(t)) \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: $v_a(t), v_b(t)$ là điện áp trên các cuộn dây của động cơ (V); $i_a(t), i_b(t)$ là dòng điện trên các cuộn dây (A); $\theta(t)$ là góc quay của trục động cơ (rad); $\omega(t)$ là vận tốc góc trục động cơ; R_s, L_s lần lượt là điện trở (Ω) và điện cảm (H) của các cuộn dây; K_m là hằng số mô men của động cơ.

Để đơn giản trong phân tích và thiết kế, bài báo này bỏ qua thành phần suất điện động cảm ứng trong hai cuộn dây của động cơ ($e_a(t) = -K_m \omega(t) \sin(N_r \theta(t))$ và $e_b(t) = K_m \omega(t) \cos(N_r \theta(t))$), do đó hệ phương trình (1) được viết lại như hệ phương trình (2):

$$\begin{cases} L_s \dfrac{di_a(t)}{dt} = v_a(t) - R_s i_a(t) \\ L_s \dfrac{di_b(t)}{dt} = v_b(t) - R_s i_b(t) \end{cases} \quad (2)$$

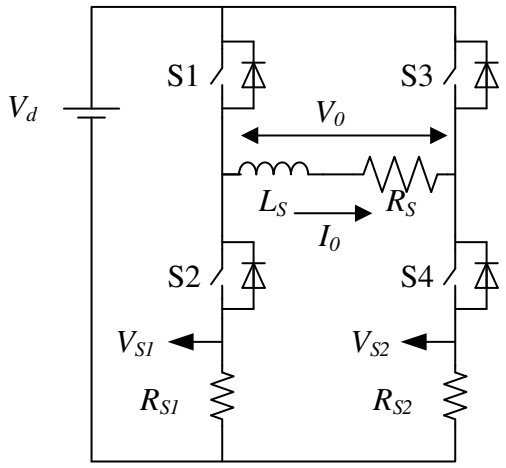
Từ (2), hàm số truyền của động cơ với đầu vào điện áp và đầu ra dòng điện được xác định như dưới đây:

$$\frac{I_{a,b}}{V_{a,b}} = G_s = \frac{(1/R_s)}{(L_s/R_s)s + 1} \quad (3)$$

Mô hình toán của hai pha (Pha A và Pha B) của động cơ là giống nhau nên quá trình thiết kế bộ điều khiển dòng là tương đồng. Do đó, mô hình (3) được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển cho cả hai cuộn dây của động cơ.

2.3. Mạch cầu H và thiết bị phản hồi dòng điện

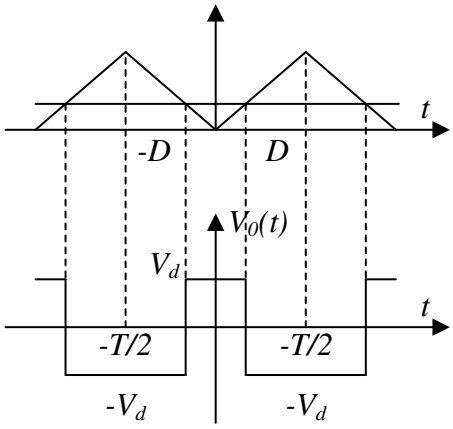
Mạch cầu H đóng vai trò mạch lái dòng trong hai pha của động cơ và được mô tả ở Hình 3.



Hình 3. Mạch cầu H

Mạch cầu H bao gồm bốn van bán dẫn sử dụng MOSFETs và hai điện trở shunt (R_{S1} và R_{S2}, đóng vai trò là gián tiếp đo dòng điện của mỗi pha). Từ sơ đồ mạch cầu H trên Hình 3, ta thấy rằng dòng điện chạy qua các cuộn dây của động cơ cũng chính là dòng điện chạy qua các điện trở R_{S1} và R_{S2}. Các giá trị điện áp V_{S1} và V_{S2} trên hai điện trở R_{S1} và R_{S2} tương ứng mang thông tin về dòng điện trên các pha bởi mối quan hệ $V_S = I_o R_S$. Các điện áp này được lọc, khuếch đại, và lấy mẫu để tạo ra các các giá trị số mô tả giá trị của các dòng điện phản hồi.

Hình 4 thể hiện độ rộng xung và điện áp cấp vào các cuộn dây pha của động cơ tương ứng:



Hình 4. Độ rộng xung và điện áp trên cuộn dây của động cơ

Trong bộ điều khiển dòng, chúng tôi sử dụng tần số PWM cố định là $40\ kHz\ (T = 25uS)$ và điện áp một chiều cấp cho mạch cầu H là $V_d = 24V$. Biểu thức điện áp trên các cuộn dây của động cơ được biểu diễn như sau:

$$V_0(t) = \begin{cases} -V_d,\ khi \quad -T/2 \le t < -D \\ V_d,\ khi -D \le t < D \\ -V_d,\ khi\ D \le t < -T/2 \end{cases} \tag{4}$$

Điện áp $V_0(t)$ trên cuộn dây pha của động cơ là hàm có chu kì, do đó biến đổi Fourier của điện áp $V_0(t)$ như sau [9]:

$$V_0(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \tag{5}$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} V_0(t)dt = \frac{2V_d(4D-T)}{T} \\ a_n &= \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} V_0(t)\cos(\frac{2\pi nt}{T})dt \\ b_n &= \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} V_0(t)\sin(\frac{2\pi nt}{T})dt \end{aligned} \tag{6}$$

Từ (5) và (6) ta có điện áp pha $V_0(t)$ bao gồm thành phần một chiều và các thành phần hài bậc cao, với tần số của hài bậc nhất là $F = 1/T = 40\,kHz$. Với $R_s = 5.45\Omega$ và $L_s = 9.3078\,mH$ thay vào biểu thức (3) ta có:

$$\frac{I_0}{V_0} = G_s = \frac{(1/R_s)}{(L_s/R_s)s+1} = \frac{1/5.45}{0.001707s+1} \tag{7}$$

Mô hình cuộn dây của động cơ là bộ lọc thông thấp có dải thông là 585.82 Hz << 40 kHz; do đó chỉ có thành phần một chiều ảnh hưởng tới dòng điện trong cuộn dây của động cơ. Giá trị của thành phần một chiều được xác định như sau:

$$V_0(t) = \frac{a_0}{2} = \frac{2V_d(4D-T)}{2T} = (24\times 4\times 40000)D - 24 \tag{8}$$

Với D là số đếm trong bộ Timer/Counter và mang thông tin liên quan đến độ rộng xung trong vi điều khiển do đó hệ số chuyển đổi D từ số nguyên sang đơn vị thời gian được tính toán như sau:

$$K_C = \frac{T}{2\times 1480} = \frac{12.5\times 10^{-6}}{1480} \tag{9}$$

Lựa chọn giá trị đếm của bộ Timer/Counter là 1480 tương ứng với giá trị $T/2$ nhằm tạo ra giá trị xung PWM có tần số là $40kHz$ do xung clock cấp cho mô đun PWM bên trong vi điều khiển TMS320F2812 có thể tạo ra xung clock là 8 nano giây.

Từ (8) và (9) ta có:

$$V_0 = \frac{48}{1480}D - 24 \Rightarrow V_0 = \begin{cases} V_d = 24, \ khi\, D = D_{\max} = 1480 \\ -V_d = -24, \ khi\, D = D_{\min} = 0 \end{cases} \tag{10}$$

Đặt $K_{scale} = 48/1480$ là hệ số tỉ lệ giữa điện áp đầu ra của mạch công suất và độ rộng xung D.

Từ (3) và (10) ta có mối liên hệ giữa điện áp và dòng điện trên các cuộn dây của động cơ bước như sau:

$$\frac{I_0}{V_0} = \frac{1/5.45}{0.001707s+1} = \frac{I_0}{(48/1480)D-24}$$
$$\rightarrow I_0 \approx \frac{0.0059D-4.403}{0.001707s+1} \quad (11)$$

Do hằng số không ảnh hưởng tới tính ổn định của hệ thống nên dòng điện pha của cuộn dây có thể được biểu diễn như sau:

$$I_0 = \frac{0.0059D}{0.001707s+1} \quad (12)$$

Chọn bộ lọc trong bộ với tần số cắt 30 kHz, hàm truyền bộ lọc có dạng:

$$G_{FILTER} = \frac{1}{T_{FILTER}s+1} = \frac{1}{1/(2\pi\times 30000)s+1} \approx \frac{1}{0.00000530516s+1} \quad (13)$$

Bộ ADC được sử dụng có độ phân giải 12bit, với dòng điện định mức của động cơ là 0.85 (A) suy ra hệ số chuyển đổi của bộ ADC là $K_{ADC} = 2047/0.85$. Dòng điện phản hồi có dạng:

$$I_{fb} = \frac{0.0059D}{0.001707s+1} \times \frac{2047}{0.85} \times \frac{1}{0.00000530516s+1}$$
$$I_{fb} = \frac{14.2D}{9\times 10^{-9}s^2+0.00171s+1} \quad (14)$$

2.4. Bộ điều khiển dòng

2.4.1. Bộ điều khiển PI

Thuật toán điều khiển PI được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển dòng điện trong các ứng dụng thực tế vì dễ dàng áp dụng và điều chỉnh. Các tham số của bộ điều khiển PI được lựa chọn thông qua công cụ SISOTool của MATLAB và có giá trị: $K_P = 10$ và $K_I = 500$ (tương ứng với chỉ tiêu chất lượng: thời gian quá độ $T_{qd} \le 75\mu s$ và độ quá điều chỉnh $\delta \le 20\%$). Hàm số truyền của điều khiển PI nhận được:

$$G_{PI} = \frac{(s+500)10}{s} \quad (15)$$

2.4.2. Bộ điều khiển dựa trên chế độ trượt

Bộ điều khiển trượt được sử dụng rộng rãi trong thời gian gần đây đặc biệt trong các ứng dụng điều khiển động cơ với vòng điều khiển vận tốc và dòng điện [6], [7] và trong điều khiển không sử dụng cảm biến vị trí [8].

Trong quá trình hoạt động thực tế, các tham số của động cơ (giá trị điện trở R_s và giá trị điện cảm L_s) luôn thay đổi. Giả sử $R = R_s + \Delta R_s$ và $L = L_s + \Delta L_s$ trong đó R_s, L_s là các giá trị danh định của động cơ; ΔR_s, ΔL_s là các tham số thay đổi của R và L. Do hai cuộn dây trong động cơ là như nhau, nên hệ phương trình (2) được viết lại thành phương trình (16) đại diện cho quá trình vật lý diễn ra trong hai cuộn dây của động cơ.

$$(L_s + \Delta L_s) p i_{fb} = v_s - (R_s + \Delta R_s) i_{fb} \tag{16}$$

Trong đó: p là toán tử đạo hàm

v_s là điện áp trên hai đầu cuộn dây pha của động cơ.

Để thực hiện tổng hợp luật điều khiển dựa trên chế độ trượt cho vòng dòng điện, đặt sai số bám $e = i_{ref} - i_{fb}$ trong đó i_{ref} là giá trị dòng điện mong muốn, i_{fb} là giá trị dòng điện phản hồi của hệ. Mục tiêu của bộ điều khiển là đưa sai số này tiến về 0.

Lựa chọn mặt trượt có dạng:

$$\sigma = e + c\int e \tag{17}$$

Trong đó c là số dương. Nếu tồn tại luật điều khiển, thì chế độ trượt sẽ đạt được trong thời gian hữu hạn. Chọn luật điều khiển sao cho mặt trượt thoả mãn điều kiện trượt:

$$\dot{\sigma}\sigma < 0 \tag{18}$$

Khi điều kiện trượt được đảm bảo thì mặt trượt σ_s sẽ tiến về không trong thời gian hữu hạn và được duy trì. Để thoả mãn điều kiện trượt (18), điện áp điều khiển v_s được biểu diễn như sau:

$$v_s = L_s[p i_{ref} + \frac{R_s}{L_s} i_{fb} + ce + \eta \,\mathrm{sgn}(\sigma)] \tag{19}$$

Trong đó: $\eta > \frac{1}{L_s}(|\Delta R_s||i_{fb}| + |\Delta L_s||p i_{fb}|)$

Chứng minh:

Từ biểu thức mặt trượt ta có biểu thức đạo hàm mặt trượt:

$$\dot{\sigma} = \dot{e} + ce = p i_{ref} - p i_{fb} + ce \tag{20}$$

Từ biểu thức (16) ta có:

$$p i_{fb} = \frac{1}{L_s} v_s - \frac{R_s}{L_s} i_{fb} - \frac{\Delta R_s}{L_s} i_{fb} - \frac{\Delta L_s}{L_s} p i_{fb} \tag{21}$$

Thay (21) vào (20) ta có:

$$\dot{\sigma} = pi_{ref} - \frac{1}{L_s} v_s + \frac{R_s}{L_s} i_{fb} + \frac{\Delta R_s}{L_s} i_{fb} + \frac{\Delta L_s}{L_s} pi_{fb} + ce \tag{22}$$

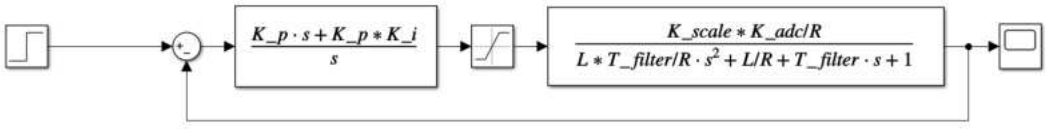
Với tín hiệu v_s trong biểu thức (19) thay vào biểu thức (22) và nhân với σ ta có:

$$\begin{aligned} \sigma\dot{\sigma} &= \sigma\left[\frac{\Delta R_s}{L_s} i_{fb} + \frac{\Delta L_s}{L_s} pi_{fb} - \eta \,\mathrm{sgn}(\sigma)\right] \\ &< -\eta|\sigma| + \left(\frac{|\Delta R_s|}{L_s}|i_{fb}| + \frac{|\Delta L_s|}{L_s}|pi_{fb}|\right) \end{aligned} \tag{23}$$

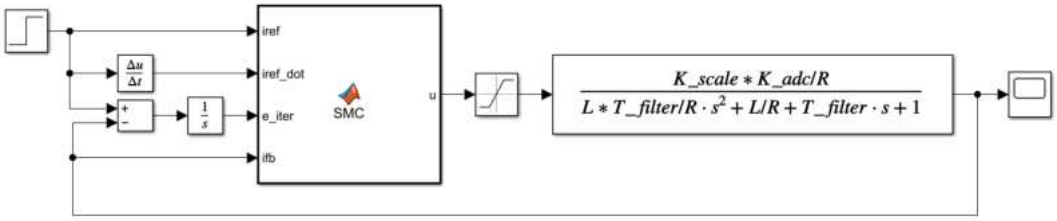
Theo điều kiện trượt (18) ta có giá trị v_s trong biểu thức (19) thoả mãn điều kiện để mặt trượt tiến về 0 trong thời gian hữu hạn.

3. Kết quả mô phỏng

Phần này trình bày kết quả mô phỏng để đánh giá chất lượng các bộ điều khiển dòng (bộ điều khiển PI và bộ điều khiển dựa trên chế độ trượt đề xuất) trên phần mềm MATLAB/Simulink trong hai trường hợp: 1) Tham số mô hình không thay đổi và 2) Tham số mô hình (giá trị điện cảm và điện trở của cuộn dây) thay đổi. Sơ đồ mô phỏng hệ thống với các bộ điều khiển được thể hiện trên Hình 5 và Hình 6. Trong sơ đồ mô phỏng các bộ điều khiển chúng tôi sử dụng phản hồi âm đơn vị vì trong phần 2.3 các bước tính toán đã đưa ra biểu thức của dòng điện phản hồi và giá trị D (liên quan đến độ rộng xung) (14) là các đại lượng không thứ nguyên. Do đó, trong trường hợp chỉ xét điều khiển vòng kín dòng điện thì các sơ đồ mô phỏng đưa về dạng phản hồi âm đơn vị là hoàn toàn phù hợp.



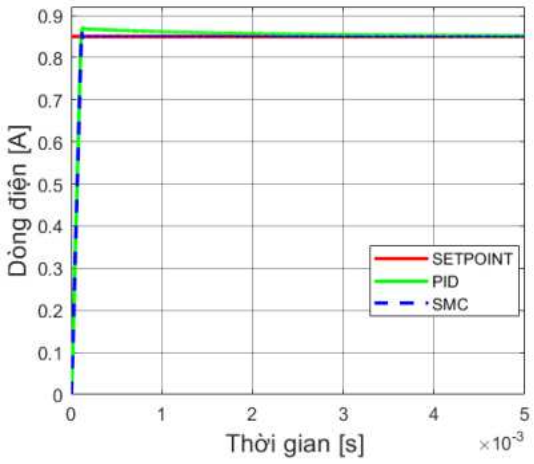
Hình 5. Sơ đồ khối mô phỏng vòng điều chỉnh dòng điện sử dụng PID



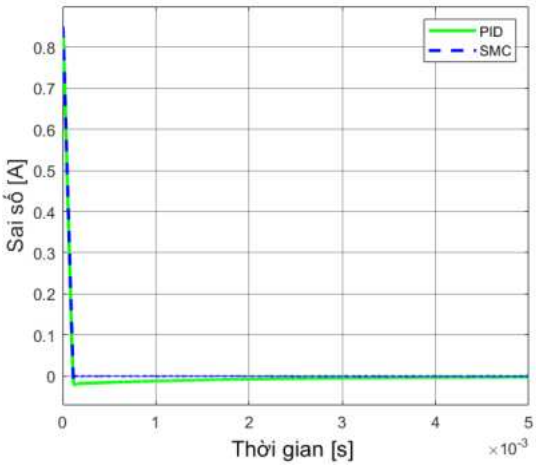
Hình 6. Sơ đồ mô phỏng vòng điều chỉnh dòng điện sử dụng bộ điều khiển trượt

3.1. Trường hợp tham số mô hình không thay đổi

Hình 7 và Hình 8 lần lượt trình bày kết quả mô phỏng vòng điều chỉnh dòng điện với bộ điều khiển PI truyền thống và bộ điều khiển dựa trên chế độ trượt đề xuất.



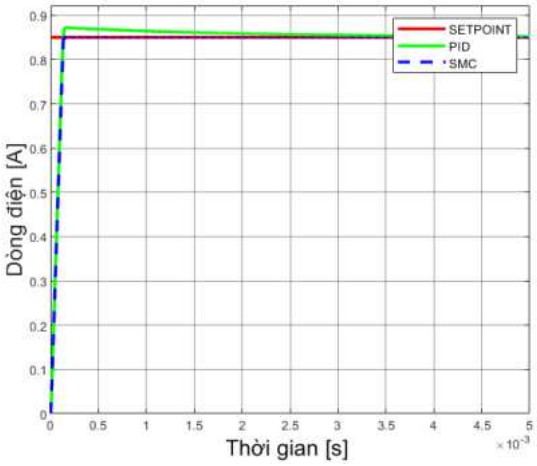
Hình 7. Chất lượng dòng điện đối với các bộ điều khiển



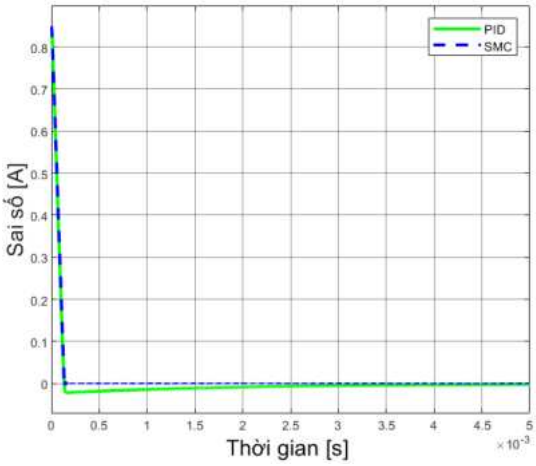
Hình 8. Sai số dòng điện

Từ kết quả mô phỏng ta thấy: cả hai bộ điều khiển đều đáp ứng tốt, tín hiệu phản hồi bám sát tín hiệu đầu vào; cả hai bộ điều khiển đều có thời gian tăng như nhau. Bộ điều khiển PI có vọt lố (2.5%) và thời gian xác lập lâu hơn so với bộ điều khiển trượt. Bộ điều khiển trượt có độ vọt lố nhỏ hơn (1.4%), thời gian xác lập nhanh hơn. Tuy nhiên có nhiều dao động với biên độ nhỏ, tần số lớn.

3.2. Trường hợp tham số mô hình thay đổi (giá trị điện trở tăng (10%) và giá trị điện cảm cuộn dây tăng (100%) so với giá trị danh định)



Hình 9. Chất lượng dòng điện đối với các bộ điều khiển



Hình 10. Sai số dòng điện

Từ kết quả mô phỏng ta thấy cả hai bộ điều khiển đáp ứng tốt, trong điều kiện tham số thay đổi (giá trị điện trở và điện cảm của cuộn dây tăng lên). Thời gian tăng của cả hai bộ điều khiển có tăng lên, làm giảm dải tốc độ của hệ thống. Đối với bộ điều khiển PI độ vọt lố tăng (4%) điều này có thể dẫn tới giật cục động cơ, làm ảnh hưởng tới các bộ phận cơ khí của hệ thống, thời gian xác lập của hệ thống cũng tăng lên đáng kể thu hẹp dải tốc độ của động cơ. Bộ điều khiển trượt, độ vọt lố gần như không thay đổi, thời gian xác lập nhanh hơn rõ ràng so với bộ điều kiển PI. Tuy nhiên, các dao động với biên độ nhỏ tần số cao vẫn tồn tại.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp điều khiển dòng điện động cơ bước lai dựa trên bộ điều khiển trượt. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển trượt có độ ổn định cao hơn đối với nhiễu so với bộ điều khiển PI (trong bài báo này đó là sự thay đổi của tham số động cơ). Tuy nhiên, bộ điều khiển trượt lại tạo ra các dao động với biên độ nhỏ nhưng với tần số lớn, điều này ảnh hưởng rất lớn đến tuổi thọ của các thiết bị. Các dao động với tần số cao này là do hàm $sign$ trong tính hiệu điều khiển – nhược điểm này có thể khắc phục bằng cách thay thế hàm $sign$ bằng các hàm khác có đặc tính mềm hơn; ngoài ra việc chọn hệ số η trong tín hiệu điều khiển cũng cần xem xét cụ thể hơn bằng cách sử dụng các bộ ước lượng tham số mô hình để xác định biên của các thay đổi, từ đó nâng cao chất lượng của bộ điều khiển trượt.

Tài liệu tham khảo

[1] M. Bodson, J. Chiasson, R. Novotnak and R. Rekowski 1993, High performance non linear feedback control of a permanent magnet stepper motor, IEEE transactions on Control Systems Technology, 5-14,.

[2] M. Zribi and J. Chiassoni 2000, Position control of a pm stepper motor by exact linearization, IEEE transactions on Automatic Control, 1-9,

[3] J. E. Slotine and W. Li 1991, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall.

[4] F. Nollet, T. Floquet and W. Perruquetti 2008, Observer-based second order sliding mode control laws for stepper motors, Control Engineering Practice, 16(4), 429-443.

[5] Hoang Ngoc Tran, Kien Le Minh, and Jae Wook Jeon 2019, Adaptive Current Controller Based on Neural Network and Double Phase Compensator for a Stepper Motor, IEEE transactions on Control Systems Technology, 34(8), 8092-.8103.

[6] S.-H. Chang, P.-Y. Chen, Y.-H. Ting, and S.-W. Hung 2010, Robust current control-based sliding mode control with simple uncertainties estimation in permanent magnet synchronous motor drive systems, IET Electric Power Appl., 4(6), 441–450.

[7] Y. Wang, Y. Feng, X. Zhang, and J. Liang 2020, A new reaching law for antidisturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system, IEEE Trans. Power Electron., 35(4), 4117–4126

[8] H. Kim, J. Son, and J. Lee 2011, A high-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM, IEEE Trans. Ind. Electron., 58(9), 4069–4077.

[9] Ngoc Quy Le and Jae Wook Jeon 2007, An Open-loop Stepper Motor Driver Based on FPGA, International Conference on Control, Automation and Systems, 1322-1326

Simple current controller for hybrid stepper motor based on sliding mode control

Abstract: *This paper presents a solution to enhance the robustness for current controller in hybrid stepper motor based on sliding mode control instead of the traditional PI controller. The effectiveness of the controller is demonstrated through simulations conducted in the MATLAB/Simulink application. The simulation results confirm the controller's capability to significantly eliminate uncertaincy factor in system, particularly, the variation of the motor's parameter in this case.*

Keywords: Hybrid stepper motor, sliding mode control.

Nghiên cứu phương pháp cải thiện đặc tính mô men Động cơ từ trở chuyển mạch

Nguyễn Văn Giáp[1], Phạm Tuấn Thành[1], Lương Thị Thanh Hà[1]

[1]Học viện kỹ thuật Quân sự

*Email: Vangiap267@gmail.com, Sđt: 0987276221

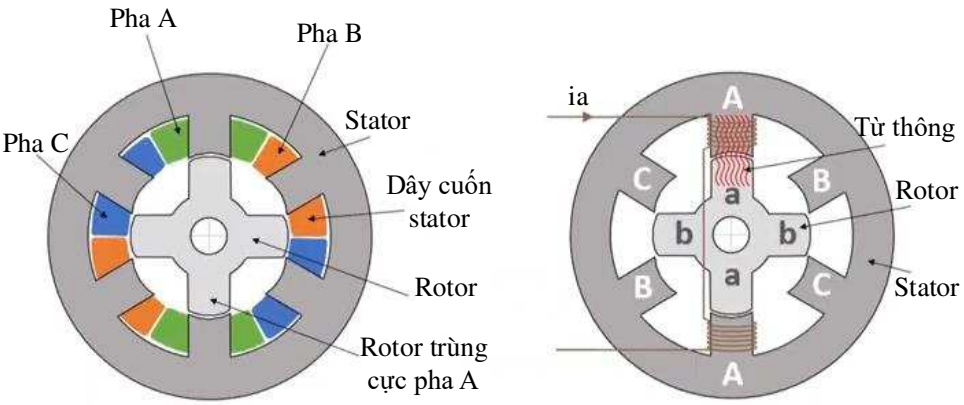
Tóm tắt: Động cơ từ trở chuyển mạch là động cơ có nhiều ưu điểm nổi bật, với kết cấu đơn giản, chi phí chế tạo thấp do rotor không có dây quấn và nam châm vĩnh cửu. Do đó động cơ từ trở ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp, đặc biệt với xu thế tiết kiệm năng lượng và sự phát triển mạnh mẽ của các phương tiện với động cơ điện như hiện nay. Bài báo đưa ra giải pháp cải thiện mô men động cơ từ trở bằng phương pháp khảo sát sự ảnh hưởng của các cung cực từ của động cơ kết hợp với phương pháp tối ưu mạch từ; Ứng dụng phần mềm Ansys maxwell để đánh giá kết quả.

Từ khóa: *động cơ từ trở; SRM; mô men SRM; mô phỏng Ansys Maxwell*

1. Giới thiệu

Động cơ từ trở chuyển mạch (Switched Reluctance Motor - SRM) là động cơ có nhiều ưu điểm nổi bật, với kết cấu đơn giản, chi phí chế tạo thấp, độ bền cao, hoạt động ở vùng tốc độ lớn. Rotor không có nam châm vĩnh cửu, không có cuộn dây nên nhiệt độ cho phép của rotor cao hơn các loại động cơ khác. Hiện nay, với sự phát triển nhanh chóng về tính năng điều khiển của các linh kiện điện tử, việc điều khiển SRM trở nên thuận lợi hơn, từ đó phát huy được các ưu điểm vượt trội của SRM. Tuy nhiên nó cũng có nhược điểm là độ nhấp nhô mô men lớn, độ rung và tiếng ồn lớn [1][2][3].

Do nhấp nhô mô men lớn dẫn đến rung động và tiếng ồn lớn, vì vậy các nhà nghiên cứu đã tập trung nghiên cứu đưa ra các giải pháp cải thiện đặc tính mô men làm tăng mô men trung bình và giảm nhấp nhô mô men cho SRM. Bài báo đưa ra giải pháp khảo sát sự ảnh hưởng của các cung cực từ của động cơ kết hợp với phương pháp tối ưu mạch từ để cải thiện đặc tính mô men của động cơ.



Hình 1. Động cơ từ trở chuyển mạch 6/4

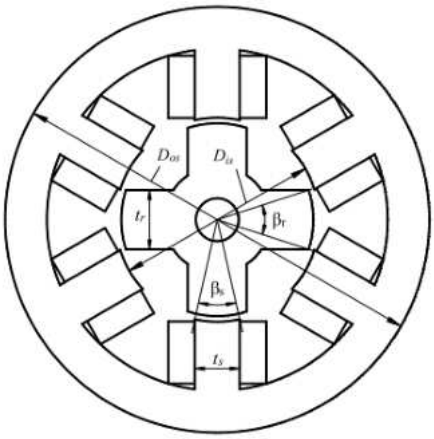
2. Phương pháp cải thiện chất lượng mô men SRM

2.1. Giới hạn của các cung cực từ (góc cực)

Góc cực stator β_s và rotor β_r (mô tả trên Hình 2) được định nghĩa theo bề rộng mặt cực stator t_s và bề rộng mặt cực rotor t_r như sau [2]:

$$\beta_s = 2\arcsin\frac{t_s}{D_{is}}; \quad \beta_r = 2\arcsin\frac{t_r}{D_{is}} \tag{1}$$

Trong đó D_{is} là đường kính trong của stator.



Hình 2. Hình vẽ mô tả góc cực stator, rotor

Để đảm bảo yêu cầu về đặc tính khởi động thì góc cực rotor và stator cần được tính toán lựa chọn trong giới hạn sau [1][2][3].

$$\min(\beta_s, \beta_r) \geq \frac{2\pi}{m.N_r} \tag{2}$$

Trong đó: m là số pha của động cơ; N_r là số cực rotor

Để mô men không triệt tiêu tại mọi vị trí quay của rotor thì góc cực stator β_s còn phải thỏa mãn điều kiện [1][2][3].

$$\beta_s < \frac{2\pi}{N_r} - \beta_r \tag{3}$$

Sau khi có góc cực stator, góc cực rotor β_r thường được chọn lớn hơn góc cực stator để tránh tạo mô men âm [1][2][3].

$$\beta_s \leq \beta_r \tag{4}$$

2.2. Phương pháp cải thiện chất lượng mô men SRM

Phương trình mô men điện từ của SRM:

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \tag{5}$$

Trong đó: T_e là mô men điện từ; i là dòng điện tức thời; L là điện cảm theo vị trí rotor; θ là vị trí góc rotor.

Mô men của SRM sinh ra phụ thuộc vào sự biến thiên của điện cảm theo vị trí góc rotor, điện cảm phụ thuộc vào cả dòng điện và vị trí góc rotor. Để có thể tính toán được mô men trung bình và phân tích nhấp nhô mômen trong SRM thì cần phải tính toán điện cảm cực đại tại vị trí đồng trục, điện cảm cực tiểu tại vị trí lệch trục, phân tích đặc tính điện cảm theo vị trí góc quay của rotor. Điện cảm L của SRM luôn biến thiên theo vị trí góc rotor có dạng tuần hoàn với chu kỳ là một bước cực rotor $2\pi/N_r$. Để có thể xác định được biên độ các sóng hài điện cảm thì cần biểu diễn điện cảm L dưới dạng chuỗi Fourier như sau [2].

$$L(\theta) = \frac{L_0}{2} + \sum_{n=1}^{N} \left[L_n \cos\left(nN_r\theta + \frac{n.2\pi}{3} \right) \right] \tag{6}$$

Trong đó: $L_0 = \frac{L_{max}.N_r.\beta_r}{\pi} + \frac{L_{min}.(2\pi - N_r.\beta_r)}{\pi}$

$$L_n = (-1)^n \frac{2(L_{max} - L_{min})}{n^2 \pi N_r \beta_s}\left[\cos\left(nN_r \frac{\beta_r - \beta_s}{2}\right) - \cos\left(nN_r \frac{\beta_r + \beta_s}{2} + \frac{n.4\pi}{3}\right)\right]$$

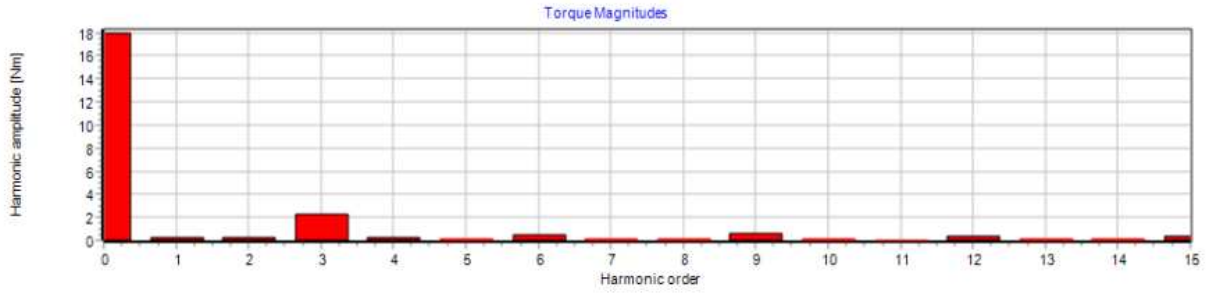
Từ đó ta tính được:

$$\frac{dL}{d\theta} = -\sum_{n=1}^{N}\left\{(-1)^n \frac{2(L_{max} - L_{min})}{n\pi\beta_s}\left[\cos\left(nN_r \frac{\beta_r - \beta_s}{2}\right) - \cos\left(nN_r \frac{\beta_r + \beta_s}{2} + \frac{n.4\pi}{3}\right)\right].\sin\left(n.N_r.\theta + \frac{n.2\pi}{3}\right)\right\} (7)$$

Suy ra:

$$T_e = -\frac{1}{2} i^2 \sum_{n=1}^{N}\left\{(-1)^n \frac{2(L_{max} - L_{min})}{n\pi\beta_s}\left[\cos\left(nN_r \frac{\beta_r - \beta_s}{2}\right) - \cos\left(nN_r \frac{\beta_r + \beta_s}{2} + \frac{n.4\pi}{3}\right)\right].\sin\left(n.N_r.\theta + \frac{n.2\pi}{3}\right)\right\} (8)$$

Tài liệu [2] đã chỉ ra mô men chính của SRM là sóng bậc nhất sinh ra là chủ yếu, còn các sóng hài bậc cao chỉ là các thành phần mô men phụ và nó gây nên nhấp nhô cho mô men của SRM.



Hình 3. Biên độ sóng hài mô men theo chuỗi Fourier [2].

Khi đó biểu thức của mô men sẽ là:

$$T_e = i^2.\frac{(L_{max} - L_{min})}{\pi\beta_s}\left[\cos\left(N_r \frac{\beta_r - \beta_s}{2}\right) - \cos\left(N_r \frac{\beta_r + \beta_s}{2} + \frac{4\pi}{3}\right)\right].\sin\left(N_r.\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (9)$$

Trong đó: L_{max}, L_{min} là giá trị điện cảm tại vị trí đồng trục và lệch trục hoàn toàn; N_r số cực rotor; β_r, β_s là giá trị cung cực rotor và stator; θ là góc quay của rotor.

Mô men điện từ T_e của động cơ từ trở được xác định bởi mối quan hệ phi tuyến phức tạp giữa các thông số cấu trúc β_s, β_r và góc quay rotor θ. Nhận thấy hàm T_e là một hàm lồi liên tục và khả vi, do đó để tối ưu hóa giá trị mô men T_e, việc áp dụng phương pháp gradient là một giải pháp hiệu quả.

Phương pháp gradient dựa trên nguyên tắc tính toán hướng thay đổi nhanh nhất của hàm mục tiêu T_e theo các biến đầu vào. Bằng cách liên tục cập nhật các giá trị của β_s, β_r,và θ theo hướng gradient, ta có thể tìm được các giá trị tối ưu hóa để đạt cực trị (trong trường hợp này là giá trị cực đại của T_e).

Với điều kiện biên từ phần giới hạn của các cung cực từ [1][2][3], ta có:

$$\begin{cases} \frac{2\pi}{m.N_r} \le \beta_s \le \beta_r \\ \beta_s + \beta_r < \frac{2\pi}{N_r} \end{cases} \quad (*)$$

Để tìm cực trị của T_e, tính đạo hàm riêng của T_e theo các biến ta được:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T_e}{\partial \beta_r} = i^2 \dfrac{L_{max}-L_{min}}{\pi\beta_s}\left[-\dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)+\dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right)\right]\sin\left(N_r\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right) \\ \dfrac{\partial T_e}{\partial \beta_s} = i^2 \dfrac{L_{max}-L_{min}}{\pi\beta_s}\left[\dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)+\dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right)\right]\sin\left(N_r\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right) \\ \qquad -i^2.\dfrac{(L_{max}-L_{min})}{\pi\beta_s^2}\left[\cos\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)-\cos\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right)\right].\sin\left(N_r.\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right) \\ \dfrac{\partial T_e}{\partial \theta} = i^2 N_r \dfrac{L_{max}-L_{min}}{\pi\beta_s}\left[\cos\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)-\cos\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right)\right]\cos\left(N_r\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dfrac{\partial T_e}{\partial \beta_r}=0 \quad \Rightarrow \begin{cases} -\dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)+\dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right)=0 & (10) \\ \sin\left(N_r\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right)=0 & (11) \end{cases} \\ \dfrac{\partial T_e}{\partial \beta_s}=0 \quad \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)+\dfrac{N_r}{2}\sin\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right)= & (12) \\ \quad =\dfrac{1}{\beta_s}\cos\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)-\cos\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \\ \dfrac{\partial T_e}{\partial \theta}=0 \quad \Rightarrow \begin{cases} \cos\left(N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)-\cos\left(N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}\right)=0 & (13) \\ \cos\left(N_r\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right)=0 & (14) \end{cases} \end{cases}$$

Giải phương trình (10) ta có:

$$\sin\left(N_r\frac{\beta_r-\beta_s}{2}\right)-\sin\left(N_r\frac{\beta_r+\beta_s}{2}+\frac{4\pi}{3}\right)=0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}=N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}+\dfrac{4\pi}{3}-2\pi \\ N_r\dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}=\pi-N_r\dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}-\dfrac{4\pi}{3}+2\pi \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_r=\beta_s=\dfrac{2\pi}{3N_r} \\ \beta_r=\beta_s=\dfrac{5\pi}{3N_r}(\text{loại}) \end{cases}$$

Thay $\beta_r=\beta_s=\dfrac{2\pi}{3N_r}$ vào phương trình (12) và (13) ta thấy đều thỏa mãn. Vậy khi $\beta_r=\beta_s=\dfrac{2\pi}{3N_r}$ thỏa mãn hệ phương trình trên với mọi θ và thỏa mãn điều kiện (*).

Như vậy với $\beta_r=\beta_s=\dfrac{2\pi}{3N_r}$ thì T_e đạt cực trị.

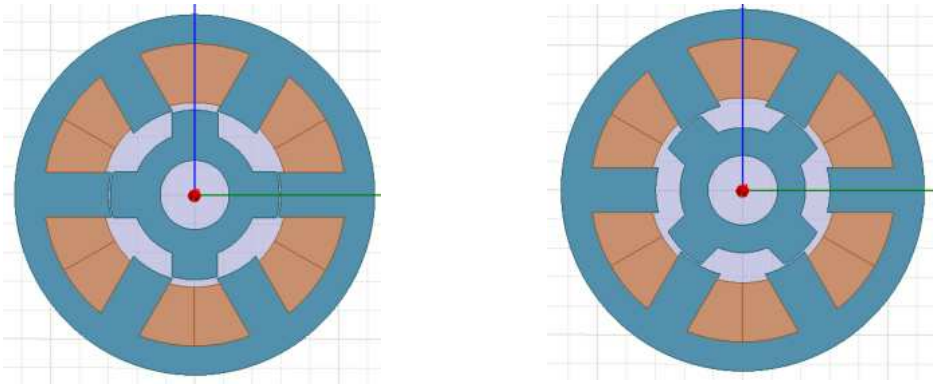
Ta thấy Phương pháp gradient tìm được hướng tối ưu nhanh chóng ngay cả với các hàm phi tuyến phức tạp như T_e. Bằng cách áp dụng phương pháp gradient, chúng ta có thể phân tích ảnh hưởng của các biến số và tối ưu hóa các thông số thiết kế để đạt được mô men cao nhất cho động cơ từ trở và các ứng dụng khác trong thực tế.

3. Mô phỏng đánh giá kết quả trên Ansys Maxwell

3.1. Mô hình và thông số động cơ trên phần mềm Ansys Maxwell

Ansys Maxwell là một phần mềm phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis - FEA) chuyên dụng cho việc mô phỏng các trường điện từ và phân tích hiệu suất của các thiết bị điện từ. Đây là một công cụ mạnh mẽ được sử dụng trong thiết kế và tối ưu hóa các thiết bị như động cơ, máy biến áp, cảm biến, cuộn dây và các hệ thống khác liên quan đến điện từ.

Các thiết kế và kết quả dưới đây dùng trên phần phềm Ansys Maxwell 2015 và Áp dụng với SRM 6/4 có $\beta_r = \beta_s = \frac{2\pi}{3N_r} = 30^o$



a) b)

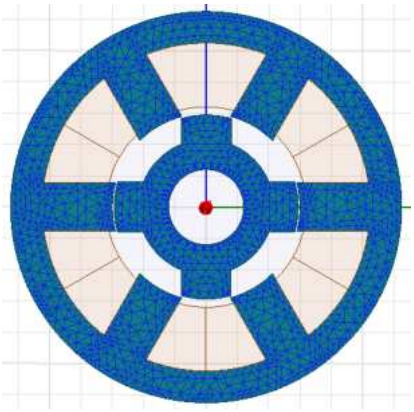
Hình 4. Mô hình 2D của SRM 6/4 trên Ansys Maxwell

a) SRM 6/4 có pha A trùng cực hoàn toàn; b) SRM 6/4 các pha lệch cực hoàn toàn

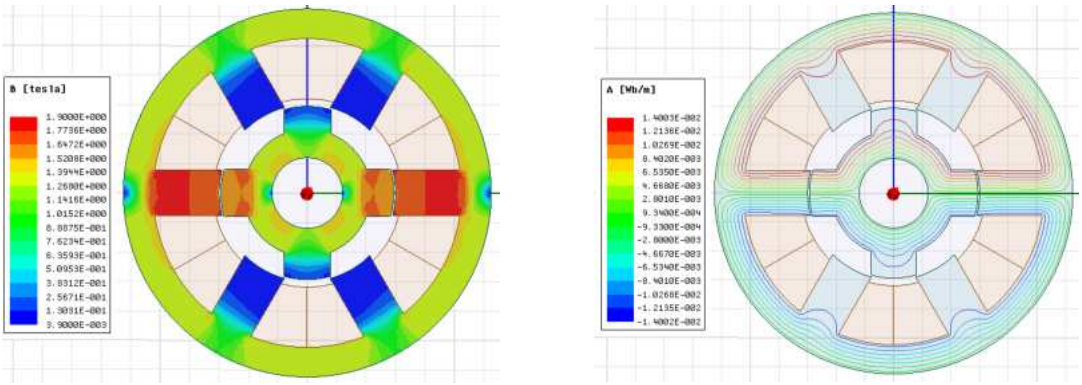
Bảng 1: Thông số SRM 6/4 mô phỏng trên Ansys Maxwell

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Công suất	0,75	KW
Tốc độ	1500	Vòng/phút
Điện áp	564	VDC
Số cực stato/rotor	6/4	
Đường kính ngoài stato	125	mm
Đường kính trong stato	60	mm
Đường kính ngoài rotor	59	mm
Đường kính trục	20	mm
Khe hở không khí	0,5	mm
Chiều dài động cơ	70	mm

3.2. Các kết quả đạt được trên Ansys Maxwell



Hình 5. Phương pháp chia lưới phần tử hữu hạn trên Ansys Maxwell

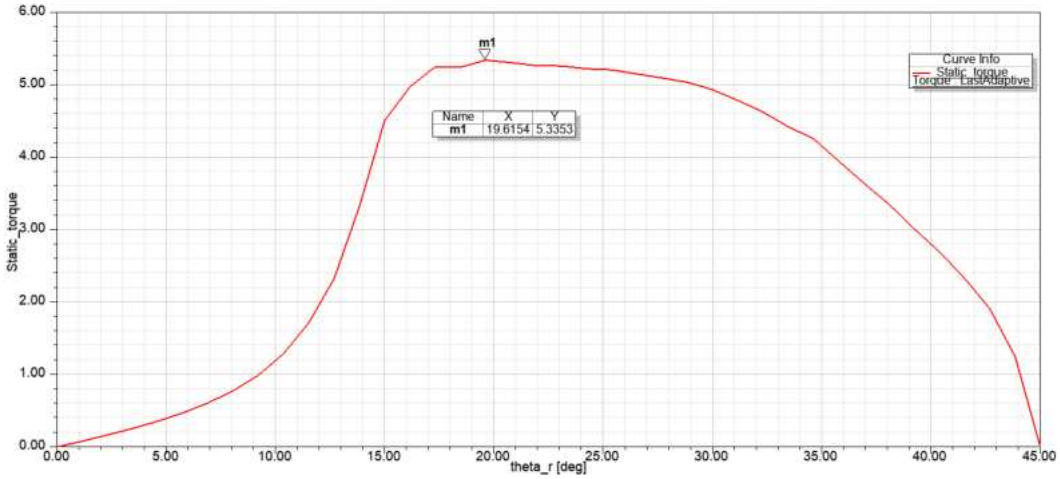


a) b)

Hình 6. Phân bố từ trường trong trường hợp trùng cực

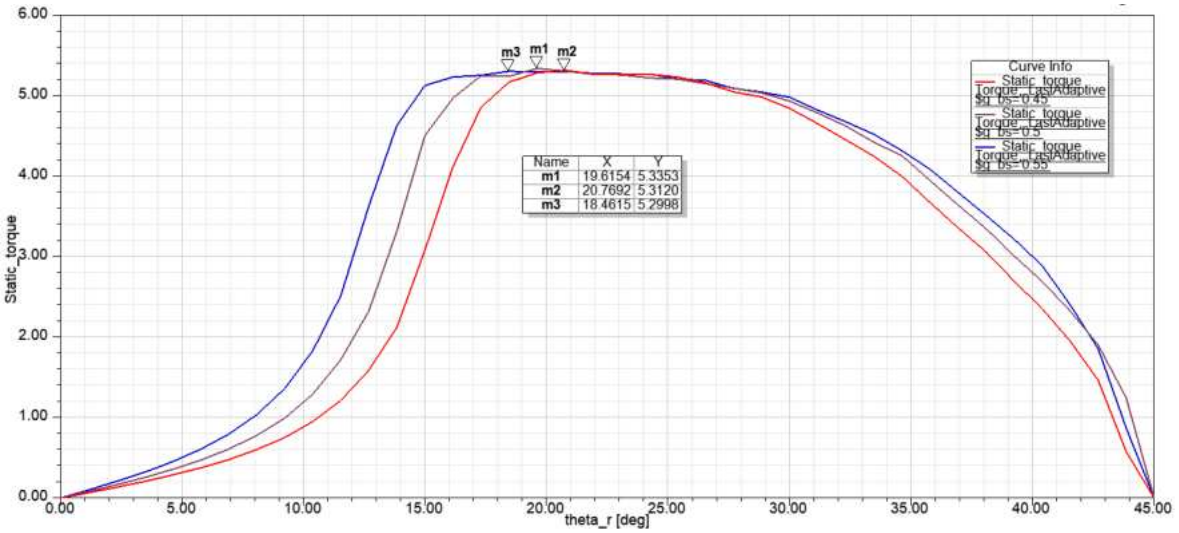
a) Phân bố mật độ từ trường; b) Đường thông lượng từ thông

Khảo sát các trường hợp của các cung cực từ bằng phương pháp phân tích hữu hạn trên Ansys Maxwell ta được mô men tĩnh của SRM tại trường hợp $\beta_r = \beta_s = 30^o$ như sau:



Hình 7. Đường đặc tính mô men tính tại vị trí $\beta_r = \beta_s = 30^o$

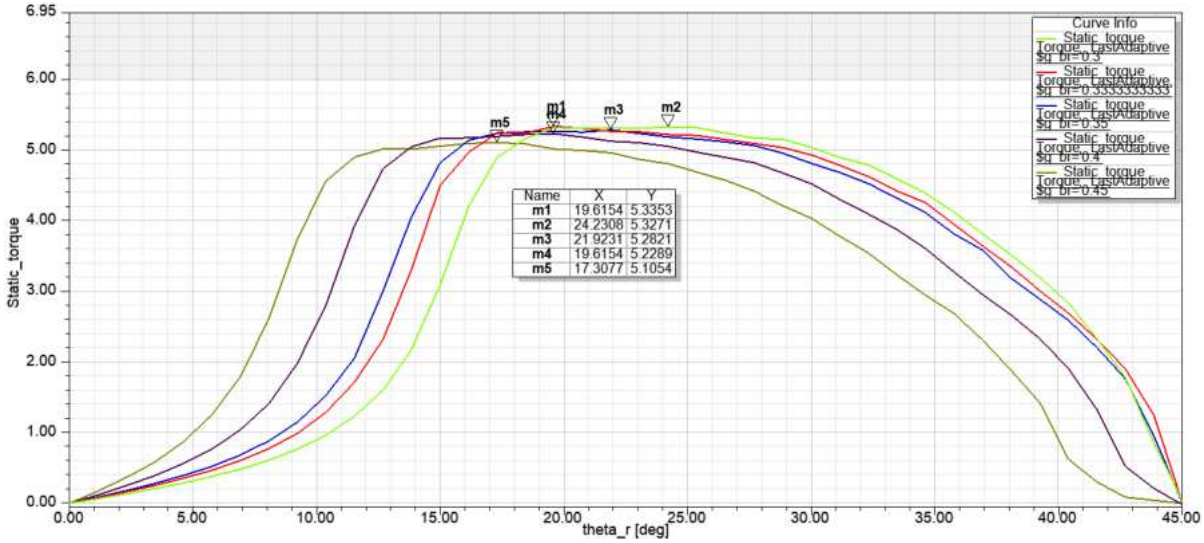
Mô men tĩnh của SRM tại trường hợp $\beta_r = 30^o$ và β_s tăng, $\beta_s = 27^o$; $\beta_s = 30^o$; $\beta_s = 33^o$ ta được kết quả như sau:



Hình 8. Đường đặc tính mô men tĩnh tại vị trí $\beta_r = 30^o$ và β_s tăng, $\beta_r = 27^o$; $\beta_s = 30^o$; $\beta_r = 33^o$

Từ Hình 8 ta thấy khi giữ nguyên β_r thay đổi β_s tăng dần thì giá trị cực đại vẫn đạt tại điểm $m1 = 5.3353$ có nghĩa là tại giá trị $\beta_r = \beta_s = 30^o$ thì mô men tĩnh vẫn đạt giá trị lớn nhất.

Mô men tĩnh của SRM tại trường hợp $\beta_s = 30^o$ và β_r tăng, $\beta_r = 27^o$; $\beta_r = 30^o$; $\beta_s = 31{,}5^o$; $\beta_r = 36^o$; $\beta_r = 40{,}5^o$ ta được kết quả như sau:



Hình 9. Đường đặc tính mô men tĩnh tại vị trí $\beta_s = 30^o$ và β_r tăng, $\beta_r = 27^o$; $\beta_s = 30^o$; $\beta_r = 31{,}5^o$; $\beta_r = 40{,}5^o$

Từ hình 8 ta thấy khi giữ nguyên β_s thay đổi β_r tăng dần thì giá trị cực đại vẫn đạt cực đại $max = 5.3353$ có nghĩa là tại giá trị $\beta_r = \beta_s = 30^o$ thì mô men tĩnh vẫn đạt giá trị lớn nhất. Tuy nhiên ta thấy rằng sự sụt giảm là không đáng kể và khi tăng β_r thì đường đặc tính mô men sẽ vọt đến điểm cực đại nhanh hơn, điều này có lợi cho quá trình khởi động động cơ. Vì khi khởi động cần mô men động cơ đạt cực đại nhanh để kéo rotor vào đồng bộ với từ trường quay của stator.

So sánh với kết quả nghiên cứu lý thuyết, ta thấy rằng khi thay đổi các giá trị của các cung cực từ β_r thì giá trị cực đại của mô men tĩnh vẫn đạt được tại giá trị $\beta_r = \beta_s = 30^o$. Như vậy kết quả mô phỏng đã đúng theo nghiên cứu lý thuyết đã chỉ ra.

4. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu đưa ra sự ảnh hưởng của các cung cực từ đến chất lượng mô men của SRM và đã chỉ ra được các giá trị của các cung cực từ mà mô men trung bình có giá trị cao nhất. Tuy nhiên chất lượng mô men còn ảnh hưởng bởi một số tham số khác mà tác giả chưa đưa ra ở đây. Đây cũng là kết quả nghiên cứu bước đầu để làm cơ sở cho các nhà nghiên cứu tham khảo và đưa ra các phương pháp để tối ưu mô men SRM.

Tài liệu tham khảo

[1]	R. Krishnan, (2001), Switched reluctance motor drives, Modeling, simulation, analysis, design, and applications, J. David Irwin, Auburn University.
[2]	Đinh Hải Lĩnh, (2022), "*Nghiên cứu kết cấu động cơ từ trở để cải thiện đặc tính mômen*", Luận án tiến sĩ kỹ thuật, ĐH Bách Khoa Hà Nội.
[3]	Phí Hoàng Nhã, Đào Quang Thủy, Phạm Hùng Phi, (2018), ''Quy trình thiết kế động cơ từ trở", ISSN 1859-1531 - *Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số 11(132).2018, Quyển 1.
[4]	Yong Kwon Choi, Hee Sung Yoon, and Chang Seop Koh (2007), ''*Pole-Shape Optimization of a Switched-Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction*", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 4, APRIL 2007
[5]	M. Šušota, P. Rafajdus, University of Žilina, (2010), ''*Design influence on torque ripple in Switched Reluctance Motor (SRM)*", Faculty of Electrical Engineering, Department of Power Electrical Systems Veľký diel, 010 26 Žilina, Slovakia.
[6]	Krzysztof Bieńkowski, Jan Szczypior, Bogdan Bucki, Adam Biernat, Adam Rogalski, ''*Influence of Geometrical Parameters of Switched Reluctance Motor on Electromagnetic Torque*", Institute of Electrical Machines, Warsaw University of Technology, Poland

Research on methods to improve torque characteristics of switched reluctance motors

Abstract: *Switched reluctance motor (SRM) is a motor with many outstanding advantages, with simple structure, low manufacturing cost because the rotor has no windings and permanent magnets. Therefore, SRM are increasingly widely used in industries, especially with the trend of saving energy and the strong development of vehicles with electric motors as today. The article proposes a solution to improve the torque of reluctance motors by examining the influence of the motor's magnetic poles combining it with the magnetic circuit optimization method; Applying Ansys maxwell software to evaluate the results.*

Key word: Switched reluctance motor; SRM; torque of SRM; Ansys Maxwell

Phát triển thuật toán tạo bộ dữ liệu ứng dụng trong hiệu chỉnh không đồng nhất ảnh hồng ngoại

Nguyễn Ngọc Anh[1], Doãn Văn Minh[1]

[1] Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển, HVKTQS

** Email: ngocanhmtak50@gmail.com*

Tóm tắt:

Ma trận cảm biến nhiệt (IRFPA) là thành phần quan trọng của camera hồng ngoại, nhưng do hạn chế về công nghệ, nên phản ứng đầu ra của các cảm biến trong IRFPA thường không đồng nhất ngay cả khi được cung cấp cùng một đầu vào tham chiếu. Ngoài ra, nhiệt độ hoạt động và nhiệt độ môi trường cũng ảnh hưởng đến hiệu suất và độ chính xác của từng đơn vị cảm biến, dẫn đến suy giảm chất lượng hình ảnh đầu ra. Để mô phỏng lại sự ảnh hưởng của các yếu tố môi trường, nhằm phục vụ cho nghiên cứu phát triển các thuật toán hiệu chỉnh, bài báo đề xuất một thuật toán tạo bộ dữ liệu gồm các ảnh tương tự như thu được từ IRFPA. Thông qua các thử nghiệm, thuật toán cho thấy hiệu quả trong việc mô phỏng sự không đồng nhất của ảnh hồng ngoại, tạo ra bộ dữ liệu sát thực tế để kiểm tra, đánh giá và phát triển các thuật toán hiệu chỉnh không đồng nhất (NUC).

Từ khóa: *Ma trận cảm biến nhiệt; hiệu chỉnh không đồng nhất.*

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, camera hồng ngoại ngày càng được sử dụng rộng rãi và đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực như y tế, công nghiệp, quốc phòng, an ninh và một số lĩnh vực khác. Thành phần chính của camera gồm IRFPA, thấu kính và mạch tiền xử lý ảnh. IRFPA là một trong những thành phần quan trọng của camera hồng ngoại. Với xu hướng đơn giản về thiết bị, và nhỏ gọn thì Microbolometer FPA được ưa chuộng hơn do không sử dụng thiết bị làm lạnh. Tuy nhiên, do hạn chế về mặt công nghệ trong quá trình chế tạo, nên bức xạ đầu ra của các cảm biến trong IRFPA thường không đồng nhất ngay cả khi có cùng một đầu vào tham chiếu [7]. Bên cạnh đó, so với cảm biến nhiệt có làm mát, nhiệt độ hoạt động và nhiệt độ môi trường xung quanh trong cảm biến nhiệt không làm mát cũng ảnh hưởng đến hiệu suất và độ chính xác của từng đơn vị cảm biến trong IRFPA [4]. Sự không đồng nhất của các cảm biến trong IRFPA thường được biểu hiện dạng nhiễu mẫu cố định làm giảm chất lượng hình ảnh đầu ra [9]. Bài báo này tập trung nghiên cứu, đề xuất một thuật toán tạo bộ dữ liệu ứng dụng trong bài toán NUC ảnh hồng ngoại. Thuật toán tạo ra hình ảnh không đồng nhất mô phỏng lại sự ảnh hưởng của các yếu tố môi trường, tương tự như hình ảnh thu được từ IRFPA.

Như đã nói ở trên, nhiệt độ có ảnh hưởng đáng kể đến sự không đồng nhất trong ảnh hồng ngoại. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến sự không đồng nhất thường không tuyến tính do đặc tính phi tuyến của các cảm biến trong IRFPA [6]. Do đó, việc xử lý, hiệu chỉnh càng trở nên phức tạp hơn. Các nghiên cứu trước đây thường giả định rằng ảnh hưởng của nhiệt độ đến IRFPA là tuyến tính trong một dải nhiệt độ nhất định [8]. Các phương pháp này có thể đạt được hiệu suất tương đối tốt trong vùng tuyến tính của IRFPA. Nhưng thực tế, đặc tính đáp ứng của IRFPA luôn là phi tuyến, đặc biệt trong các trường hợp yêu cầu dải động đáp ứng lớn. Khi đó, hiệu suất của các thuật toán NUC dựa trên giả định tuyến tính giảm một cách rõ rệt. Một số nghiên cứu khác đã mô hình hoá đặc tính đáp ứng của IRFPA gần giống với hình dạng "chữ S", giúp cải thiện được chất lượng của các thuật toán NUC trong trường hợp yêu cầu dải

động rộng [11]. Tuy nhiên, các tham số của mô hình phi tuyến này cần phải hiệu chuẩn lại khi hệ thống đã hoạt động sau một thời gian để giảm sự lệch đường cong đặc tính của IRFPA.

Một số nghiên cứu gần đây đã sử dụng các mô hình học sâu vào trong các bài toán xử lý ảnh phức tạp, bao gồm cả việc NUC [3-5], và đã chứng minh được kết quả khả quan so với các phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, để có thể huấn luyện một mô hình học sâu cho bài toán NUC, chúng ta cần phải có đồng thời ảnh đầu vào (ảnh thô) và nhãn tương ứng của nó (ảnh thực). Việc thu thập dữ liệu cho quá trình huấn luyện có một số điểm hạn chế như:

- Khó khăn trong việc thu thập ảnh thực: Ảnh hồng ngoại thường được chụp trong các môi trường phức tạp, các yếu tố như nhiệt độ, độ ẩm và ánh sáng có thể tạo ra nhiễu. Đặc biệt, nhiệt độ có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng ảnh hồng ngoại. Để chụp được ảnh GT, cần phải sử dụng các thiết bị chất lượng cao và đã được hiệu chỉnh kỹ càng. Tuy nhiên, không phải lúc nào các thiết bị này cũng có sẵn, hoặc chi phí sử dụng chúng quá cao.
- Chất lượng dữ liệu thu thập phải tốt và số lượng dữ liệu phải lớn để mô hình có thể học được sự khác biệt giữa ảnh thực và ảnh không đồng nhất một cách hiệu quả. Khi dữ liệu quá ít, mô hình có thể không đạt được hiệu suất mong muốn, làm giảm khả năng tổng quát hoá của mô hình khi áp dụng vào trong điều kiện thực tế.

Trên cơ sở những phân tích trên, chúng tôi giới thiệu thuật toán tạo ra hình ảnh không đồng nhất có cường độ thay đổi được và tính chất tương tự với hình ảnh thu được từ IRFPA nhằm phục vụ cho nghiên cứu phát triển các thuật toán NUC. Từ kết quả thử nghiệm, thuật toán cho thấy hiệu quả trong việc mô phỏng sự không đồng nhất của ảnh hồng ngoại, tạo ra bộ dữ liệu sát thực tế để kiểm tra, đánh giá và phát triển các thuật toán NUC.

Phần tiếp theo của bài báo được trình bày như sau. Phần 2 trình bày về thuật toán tạo bộ dữ liệu gồm các hình ảnh không đồng nhất. Phần 3 trình bày các thí nghiệm được tiến hành để đánh giá chất lượng bộ dữ liệu. Phần cuối cùng là phần kết luận.

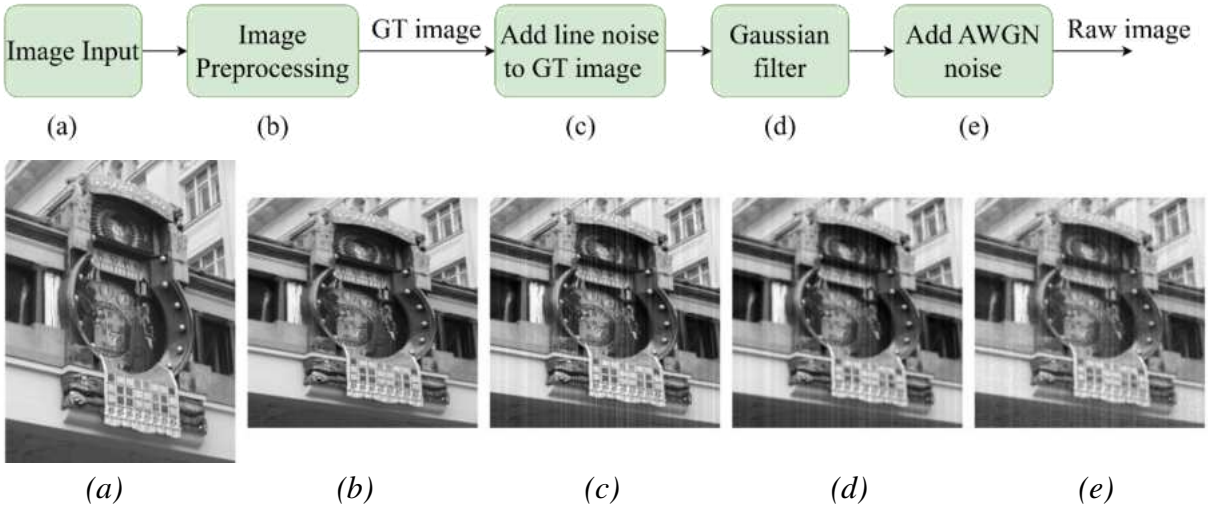
2. Thuật toán tạo bộ dữ liệu mô phỏng

Theo [3], Jung và cộng sự đã giới thiệu thuật toán tạo hình ảnh không đồng nhất ảnh hồng ngoại. Tuy nhiên, vẫn tồn tại hai điểm hạn chế như sau. Thứ nhất, thuật toán tạo hình ảnh không đồng nhất với cường độ cố định, không thể hiện được sự ảnh hưởng của các yếu tố môi trường. Thứ hai, hình ảnh tạo ra có độ sắc nét cao không phản ánh đúng hình ảnh hồng ngoại thực tế. Để khắc phục những điểm hạn chế trên, chúng tôi giới thiệu thuật toán tạo hình ảnh không đồng nhất mô phỏng lại sự ảnh hưởng của các yếu tố môi trường tương tự như thu từ IRFPA. Lưu đồ thuật toán được thể hiện như trong Hình 1.

Đầu tiên, ảnh đầu vào (a) là hình ảnh xám không có nhiễu với kích thước bất kỳ, được đưa vào khối tiền xử lý ảnh để đưa về cùng một kích thước (b). Tiếp theo, khối Add line noise to GT image có chức năng tạo ra nhiễu đường kẻ có cùng kích thước với hình ảnh gốc, tính chất tương tự như sự không đồng nhất trong hình ảnh hồng ngoại và được thêm vào hình ảnh gốc để tạo ra ảnh với nhiễu được thể hiện như trong hình (c). Hình ảnh với nhiễu đường kẻ (IWLN) được tạo ra như sau:

$$IWLN = \sum_{i=1}^{N} \left\{ GT[:, rand(cols)] + round\left(\frac{rand(1) \times 255}{\alpha} \right) \right\} \quad 1)$$

Ở đây: N là số lượng đường kẻ; GT là ảnh thực; cols là số lượng cột của hình ảnh GT; $rand(x)$ là hàm số trả về giá trị ngẫu nhiên từ 0 đến x và α là một tham số thể hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ tới sự không đồng nhất của ảnh hồng ngoại. Trong bài báo này, chúng tôi thực hiện thay đổi giá trị α trong quá trình tạo ra tập dữ liệu huấn luyện cho mô hình. Vì vậy, mô hình của chúng tôi đạt được hiệu suất tốt trong dải động rộng mà không cần phải hiệu chỉnh lại hệ thống trong quá trình hoạt động.



Hình 1. Thuật toán tạo hình ảnh không đồng nhất.

Sau đó, hình ảnh với nhiễu đường kẻ (c) được đưa vào khối Gaussian filter. Khối Gaussian filter có nhiệm vụ làm mờ hình ảnh sau khi đã thêm nhiễu đường kẻ, giúp làm mờ các thành phần nhiễu tần số cao để tạo ra hình ảnh có nhiễu đường kẻ mịn hơn nhưng vẫn giữ lại các đặc điểm quan trọng của hình ảnh (d). Hàm Gaussian được định nghĩa như sau:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad 2)$$

Ở đây: (x, y) là toạ độ của điểm ảnh; σ là độ lệch chuẩn, xác định mức độ làm mờ.

Cuối cùng, hình ảnh sau khi qua bộ lọc Gaussian được đưa vào khối Add AWGN noise. Khối này có chức năng thêm nhiễu Additive White Gaussian Noise (AWGN) vào hình ảnh đầu vào để mô phỏng các điều kiện nhiễu thực tế. Sau khi thêm vào nhiễu AWGN với cường độ 25dB ta nhận được ảnh đầu ra (e) là ảnh thô có tính chất tương tự như hình ảnh thu được từ IRFPA.

3. Kết quả và thảo luận

Trong phần này, chúng tôi sẽ mô tả chi tiết về quá trình huấn luyện mô hình trên bộ dữ liệu do chúng tôi tạo ra và nêu các chỉ tiêu đánh giá hiệu suất mô hình. Tiếp theo, các mô hình được đánh giá sau khi huấn luyện trên bộ dữ liệu mô phỏng. Cuối cùng, chúng tôi áp dụng các mô hình trên bộ dữ liệu thực tế do chúng tôi thu được từ IRFPA, từ đó đưa ra các kết luận về tính hiệu quả của thuật toán tạo bộ dữ liệu do chúng tôi đề xuất.

3.1. Huấn luyện mô hình

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng laptop cá nhân với cấu hình CPU Ryzen 7 7840H, 16 GB RAM và GPU NVIDIA Geforce RTX 4060 8GB. Mô hình đề xuất được xây dựng và thực hiện trên phiên bản Keras 2.10.0. Tập dữ liệu huấn luyện của chúng tôi gồm 5000 ảnh kích thước 256x256 pixel, hình ảnh thô được tạo ra từ ảnh sạch theo thuật toán như đã trình bày ở phần trên. Trong đó, 4000 ảnh sử dụng để huấn luyện mô hình (80%), 800 ảnh sử dụng để kiểm định trong quá trình huấn luyện mô hình (16%) và 200 ảnh được sử dụng để kiểm tra, đánh giá hiệu suất mô hình (4%).

3.2. Kết quả thực nghiệm

Để đánh giá hiệu quả của bộ dữ liệu, các mô hình CBDNet [1], DnCNN [5], LSC-CNN [4], RFSUNET [3] được chúng tôi sử dụng để huấn luyện trên bộ dữ liệu mô phỏng. Quá trình so sánh, đánh giá các mô hình được thực hiện trên hai bộ dữ liệu hình ảnh tĩnh Set12, BSD100 và trên tập dữ liệu gồm bốn video do chúng tôi thu lại từ camera hồng ngoại.

3.2.1. Đánh giá trên tập dữ liệu Set12 và BSD100

Để đánh giá hiệu suất của mô hình đề xuất trên tập dữ liệu Set12 và BSD100, các chỉ số Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) [3, 4], Structural Similarity Index Measure (SSIM) [3] và Mean Absolute Error (MAE) [3] được sử dụng trong quá trình so sánh, đánh giá.

a) Đánh giá trên tập dữ liệu Set12

Bộ dữ liệu Set12 được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu về xử lý ảnh, gồm 12 hình ảnh xám với độ phân giải cao và không có nhiễu. Hình 2 minh hoạ kết quả trực quan của các mô hình, hình ảnh được chúng tôi trích ra từ tập dữ liệu Set12. Có thể thấy rằng, mô hình LSC-CNN vẫn còn chứa nhiễu dư chưa loại bỏ hết, các mô hình CBDNet, DnCNN, RFSUNET cho kết quả NUC tốt hơn nhưng các chi tiết nhỏ cũng bị làm mờ đi.



GT Image
(PSNR, SSIM, MAE)



CBDNet
(**29.4367/0.8063/0.0230**)



DnCNN
(29.3827/0.8010/0.0231)



Noise Image



LSC-CNN
(28.9613/0.7828/0.0247)



RFSUNET
(29.1280/0.7923/0.0239)

Hình 2. Kết quả trực quan của việc NUC hình ảnh hồng ngoại trên tập dữ liệu Set12 và các chỉ số PSNR, SSIM, MAE tương ứng.

Kết quả các chỉ số PSNR, SSIM và MAE trung bình của các mô hình khác nhau trên tập dữ liệu Set12 được thể hiện trong Bảng I. Có thể thấy rằng các mô hình đều được hiệu suất hiệu chỉnh tốt. Trong đó, mô hình CBDNet cho kết quả hiệu chỉnh tốt hơn các mô hình còn lại ở cả ba chỉ số PSNR, SSIM và MAE với các số liệu đo được lần lượt là 30.2457, 0.8329 và 0.0209.

Chỉ số	CBDNet	DnCNN	LSC-CNN	RFSUnet
PSNR	**30.2457**	30.0478	29.4826	29.7694
SSIM	**0.8329**	0.8276	0.8126	0.8214
MAE	**0.0209**	0.0212	0.0229	0.0219

Bảng I. Kết quả trung bình của các chỉ số PSNR, SSIM, MAE trên tập dữ liệu Set12

b) Đánh giá trên tập dữ liệu BSD100

Bộ dữ liệu BSD100 (Berkeley Segmentation Dataset 100) là một tập hợp các hình ảnh tiêu chuẩn được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực xử lý ảnh và thị giác máy tính, bao gồm 100 hình ảnh tự nhiên có kích thước lớn, thường được sử dụng cho các nhiệm vụ như khử nhiễu ảnh, siêu phân giải. Từ kết quả ở Bảng II cho thấy, mô hình CBDNet có hiệu suất cao hơn các mô hình khác trên hai chỉ số đánh giá PSNR và SSIM. Đối với chỉ số MAE, mô hình RFSUNET đạt được giá trị hiệu chỉnh tốt hơn ba mô hình còn lại.

Chỉ số	CBDNet	DnCNN	LSC-CNN	RFSUnet
PSNR	**29.1001**	29.0616	28.6501	28.8376
SSIM	**0.7827**	0.7812	0.7639	0.7701
MAE	0.0255	0.0255	0.0271	**0.0254**

Bảng II. Kết quả trung bình của các chỉ số PSNR, SSIM, MAE trên tập dữ liệu BSD100

Cụ thể, như trong Hình 3, đối với hai hình ảnh được chúng tôi lấy trong tập dữ liệu BSD100, khi quan sát một cách tổng thể, cả bốn mô hình CBDNet, DnCNN, LSC-CNN, RFSUNET đều có hiệu quả tốt trong việc NUC.



GT Image
(PSNR, SSIM, MAE)



CBDNet
(29.3551/0.8451/0.0216)



DnCNN
(**29.4257/0.8461/0.0215**)



Noise Image | LSC-CNN (28.6506/0.8251/0.0239) | RFSUNET (28.8313/0.8328/0.0231)

Hình 3. Kết quả trực quan của việc NUC hình ảnh hồng ngoại trên tập dữ liệu BSD100 và các chỉ số PSNR, SSIM, MAE tương ứng.

3.2.2. Đánh giá trên dữ thiệu thực

Tiếp theo, chúng tôi sẽ đánh giá hiệu quả của các mô hình trên thực tế. Tập dữ liệu gồm bốn video do chúng tôi thu được từ IRFPA PICO640 Gen2 với những điều kiện khác nhau với số lượng khung hình lần lượt là 1000, 1200, 500 và 800. Chỉ số độ nhám *p* [2], Brenner, Sum Modulus Difference 2 (SMD2) và Tenengrad [10] được chúng tôi sử dụng để so sánh, đánh giá hiệu quả của mô hình trong trường hợp này. Giá trị trung bình của cả bốn chỉ số trên từng video được thể hiện chi tiết trong Bảng IV.

Video ID	Số lượng khung hình	Giá trị độ nhám trung bình			
		CBDNet	DnCNN	LSC-CNN	RFSUNET
1	1000	**0.00850**	0.00942	0.01165	0.0097
2	1200	**0.01824**	0.02077	0.02147	0.01967
3	500	0.01989	0.02205	0.02172	**0.01907**
4	800	**0.01231**	0.01429	0.01738	0.01291
Video ID	Số lượng khung hình	Giá trị Brenner trung bình			
		CBDNet	DnCNN	LSC-CNN	RFSUNET
1	1000	14.63671	15.48052	14.20339	**15.52736**
2	1200	95.64819	**100.97968**	88.1998	97.32496
3	500	113.99148	**120.01691**	105.252	115.24109
4	800	30.48202	31.35622	29.03354	**31.77900**
Video ID	Số lượng khung hình	Giá trị SMD2 trung bình			
		CBDNet	DnCNN	LSC-CNN	RFSUNET
1	1000	3.37437	3.55177	**5.22913**	3.51569
2	1200	8.63186	9.69170	**12.11040**	9.04700
3	500	9.73009	**10.92763**	10.48934	9.64930
4	800	4.85588	5.28911	**5.90672**	4.77744
Video ID	Số lượng khung hình	Giá trị Tenengrad trung bình			
		CBDNet	DnCNN	LSC-CNN	RFSUNET
1	1000	4.63395	4.42519	4.39164	**4.67552**
2	1200	9.24923	**9.61813**	8.55589	9.1684
3	500	8.42252	**8.88918**	7.51996	7.90378
4	800	4.26418	**4.66663**	3.95253	4.24251

Bảng IV. Kết quả trung bình của các chỉ số ρ, Brenner, SMD2, Tenengrad trên bốn video

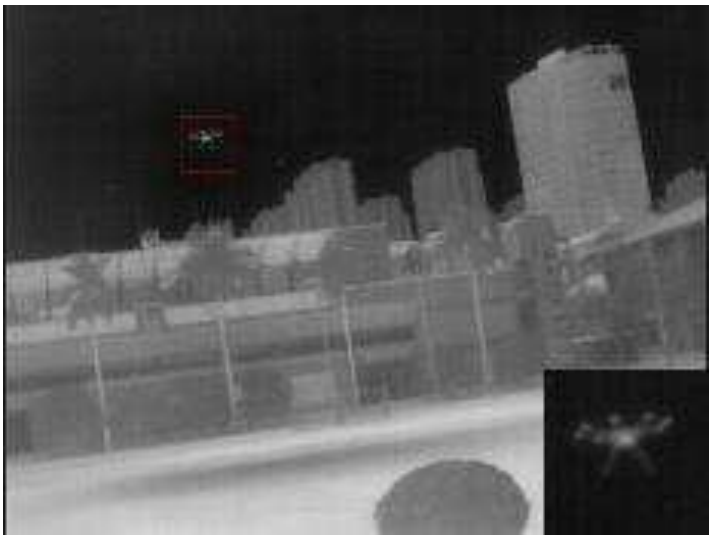
Từ kết quả trong bảng IV, đối với chỉ số độ nhám ρ, mô hình CBDNet đạt giá trị thấp nhất ở Video 1, 2 và 4 với các giá trị lần lượt là 0.00850, 0.01824 và 0.01231. Trong Video 3, mô hình RFSUNET đạt hiệu suất tốt hơn với giá trị 0.01907. Đối với chỉ số Brenner, mô hình DnCNN đạt giá trị trung bình tốt hơn trong Video 2 và Video 3, đặc biệt là ở Video 3 với giá trị là 120.01691. Mô hình RFSUNET thể hiện khả năng hiệu chỉnh tốt ở Video 1 và Video 4 với chỉ số Brenner trung bình là 15.52736 và 31.77900. Đối với chỉ số SMD2, LSC-CNN cho thấy hiệu suất tốt hơn trong ba trên bốn Video (1, 2, và 4) với giá trị lần lượt là 5.22913, 12.11040, và 5.90672. Ở Video 3, DnCNN dẫn đầu với giá trị SMD2 trung bình là 10.92763. Ở chỉ số Tenengrad trung bình, mô hình DnCNN tiếp tục thể hiện hiệu suất tốt hơn, đạt giá trị cao hơn trong ba Video 2, 3 và 4 (9.61813, 8.88918 và 4.66663). RFSUNET đạt được hiệu suất tốt hơn ở Video 1 với giá trị Tenengrad trung bình là 4.67552. Các kết quả trên đã chứng minh được sự hiệu quả trong việc NUC của các mô hình được huấn luyện bởi bộ dữ liệu mô phỏng do chúng tôi tạo ra.

Kết quả trực quan của các mô hình khác nhau đối với khung hình thứ 100 của Video 4 được thể hiện chi tiết trong Hình 4. Từ hình ảnh và các số liệu do chúng tôi tính toán đối với mỗi mô hình, rõ ràng các mô hình có khả năng NUC hiệu quả. Điều đó được thể hiện qua các chỉ số Brenner, SMD2, Tenengrad trên toàn bộ ảnh và trong vùng ảnh màu đỏ.

Qua các thử nghiệm trên, có thể thấy rằng thuật toán tạo bộ dữ liệu do chúng tôi đề xuất đã chứng tỏ được sự hiệu quả trong bài toán NUC. Thuật toán tạo tạo ra hình ảnh mô phỏng sát với thực tế thu được từ IRFPA. Ngoài ra, thuật toán có các tham số thay đổi để mô phỏng lại sự ảnh hưởng của các yếu tố môi trường, mà đặc biệt là sự ảnh hưởng của nhiệt độ đến chất lượng hình ảnh thô thu nhận được từ IRFPA.

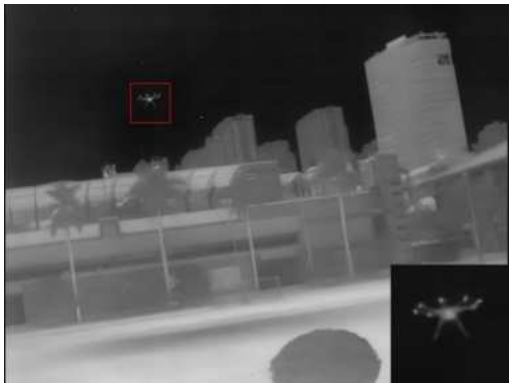
4. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã trình bày thuật toán tạo bộ dữ liệu ứng dụng trong tác vụ NUC ảnh hồng ngoại. Các kết quả thực nghiệm đã chứng minh tính hiệu quả của thuật toán, các mô hình được huấn luyện bởi tập dữ liệu mô phỏng do chúng tôi tạo ra đạt được hiệu suất tốt khi áp dụng vào thực tế. Những kết quả đạt được mở ra triển vọng cho việc phát triển các thuật toán NUC nhằm nâng cao chất lượng hình ảnh hồng ngoại.

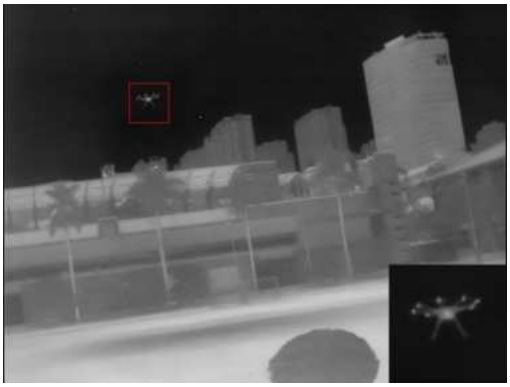


Raw Image

(ρ , Brenner, SMD2, Tenengrad)



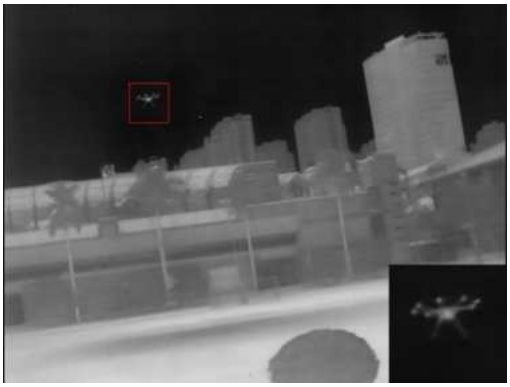
CBDNet
0.0135/37.6746/5.1891/5.5844
0.1159/**211.9432/47.95/16.8538**



DnCNN
0.0159/39.2737/6.1517/**6.3027**
0.1189/201.4276/46.9784/16.3177



LSC_CNN
0.0169/36.3957/**6.6628**/5.2329
0.1193/160.9044/30.5076/14.7824



RFSUNET
0.0142/**39.6873**/5.3421/5.5497
0.1119/185.2992/34.5128/15.4258

Hình 4. Kết quả trực quan của việc NUC hình ảnh hồng ngoại trên ảnh thực và các chỉ số p, Brenner, SMD2, Tenengrad tương ứng. Dòng trên là các chỉ số trên toàn bộ hình ảnh. Dòng dưới là các chỉ số trên vùng màu đỏ.

Tài liệu tham khảo

1. Guo, Shi, et al. (2019), Toward convolutional blind denoising of real photographs, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1712-1722.
2. Hayat, Majeed M, et al. (1999), Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays, *Applied optics*. 38(5), pp. 772-780.
3. Jung, Ho Min, Kim, Byeong Hak, and Kim, Min Young (2020), Residual forward-subtracted U-shaped network for dynamic and static image restoration, *IEEE Access*. 8, pp. 145401-145412.
4. Li, Timing, et al. (2021), Non-uniformity correction of infrared images based on improved CNN with long-short connections, *IEEE Photonics Journal*. 13(3), pp. 1-13.
5. Li, Yitong, Liu, Ning, and Xu, Ji (2021), Infrared scene-based non-uniformity correction based on deep learning model, *Optik*. 227, p. 165899.
6. Mooney, Jonathan M, et al. (1989), Responsivity nonuniformity limited performance of infrared staring cameras, *Optical Engineering*. 28(11), pp. 1151-1161.

7. Redlich, Rodolfo, et al. (2015), Embedded nonuniformity correction in infrared focal plane arrays using the Constant Range algorithm, *Infrared Physics & Technology*. 69, pp. 164-173.
8. Rong, Shenghui, et al. (2017), An improved non-uniformity correction algorithm and its hardware implementation on FPGA, *Infrared physics & technology*. 85, pp. 410-420.
9. Sheng-Hui, Rong, et al. (2016), Nonuniformity correction for an infrared focal plane array based on diamond search block matching, *JOSA A*. 33(5), pp. 938-946.
10. Yang, Yifan, et al. (2020), Deep networks with detail enhancement for infrared image super-resolution, *IEEE Access*. 8, pp. 158690-158701.
11. Zhou, Hui-xin, et al. (2010), Nonuniformity correction algorithm with nonlinear model for infrared focal plane arrays, *Infrared physics & technology*. 53(1), pp. 10-16.

Development of an Algorithm for Generating Datasets in the Non-Uniform Correction of Infrared Images

Abstract**:** *The infrared focal plane array (IRFPA) is a critical component of infrared cameras. However, due to technological limitations, the output response of sensors in the IRFPA is often non-uniform, even under the same reference input. Furthermore, both operating temperature and environmental temperature significantly influence the performance and accuracy of individual sensor units, resulting in a degradation of output image quality. To simulate the impact of environmental factors for the development of correction algorithms, this paper presents an algorithm designed to generate a dataset comprising images analogous to those captured by the IRFPA. Experimental results demonstrate the algorithm's effectiveness in simulating the non-uniformity of infrared images, enabling the generation of realistic datasets for testing, evaluation, and the development of non-uniformity correction (NUC) algorithms.*

Key words: Infrared Focal Plane Array, Non-uniformity Correction.

Tổng hợp bộ điều khiển thích nghi cho hệ truyền động điện thủy lực pháo AK230

Nguyễn Văn Bắc[1*], Nguyễn Ngọc Tuấn[1]

[1]Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: nguyenvanbacmta@gmail.com Tel:0377229063

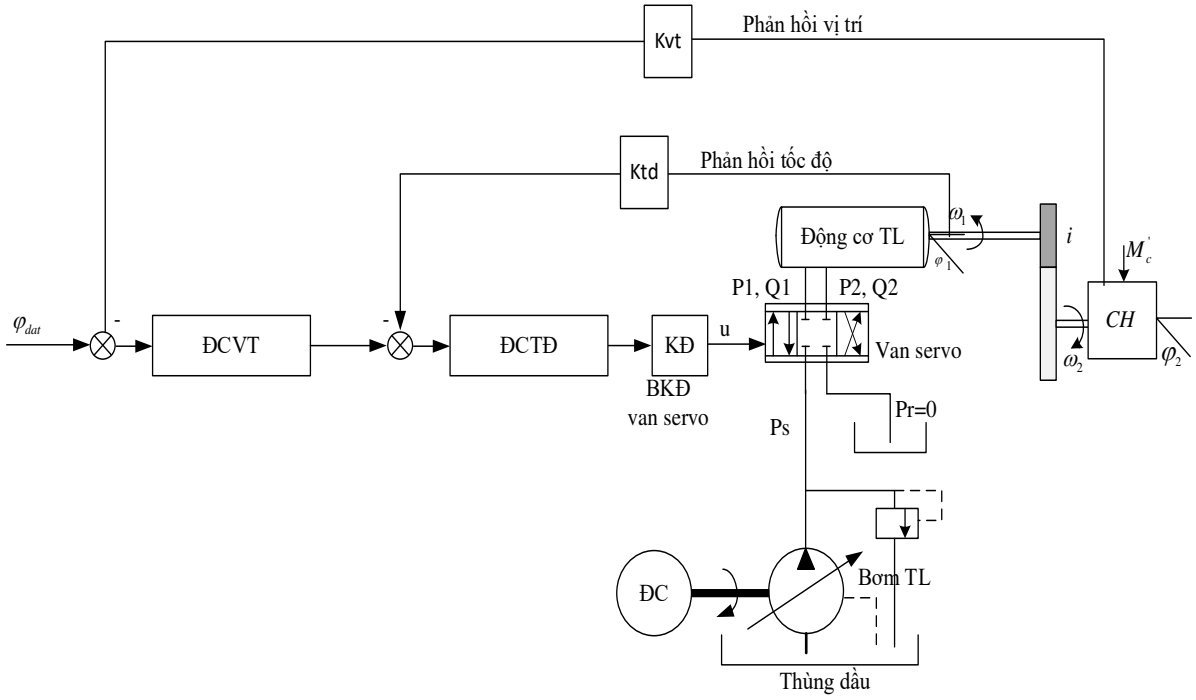
Tóm tắt:

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu và thiết kế bộ điều khiển thích nghi cho hệ truyền động điện thủy lực cho pháo AK-230 có xét đến sự thay đổi của tham số hệ thống. Nội dung chi tiết bài báo thể hiện quá trình xây dựng mô hình toán học tuyến tính cho hệ truyền động bám kênh hướng và tổng hợp bộ điều khiển thích nghi cho hệ truyền động điện thủy lực bám kênh hướng cho pháo AK-230 trên tàu Hải quân khi kể đến mô men quán tính bệ pháo bất định. Thuật toán tổng hợp được kiểm chứng mô phỏng trên Matlab-Simulink.

Từ khóa: *Hệ thống điện - thủy lực, hệ thống thích nghi…*

1. Đặt vấn đề

Pháo tàu AK-230 được trang bị cho tàu mặt nước để tiêu diệt mục tiêu trên không, trên biển, trên bờ [1]. Việc điều khiển pháo tới mục tiêu được thực hiện nhờ rađa điều khiển bắn hoặc bằng tay thông qua cột ngắm. Hệ truyền động pháo tàu hoạt động theo hai chế độ: Chế độ tự động và chế độ bán tự động. Tín hiệu mục tiêu từ rađa được truyền về máy tính trung tâm thực hiện giải bài toán bắn đón, trên cơ sở tín hiệu mang thông tin mục tiêu, các tín hiệu máy tính đường, la bàn hàng hải, tín hiệu từ hệ con quay hồi chuyển trên tàu. Tín hiệu tổng hợp đưa đến điều khiển hệ truyền động bám dưới dạng góc quay, thông qua hệ truyền động AK-230 điều khiển bệ pháo quay kênh tầm hướng bám theo mục tiêu, sẵn sàng phát hỏa tiêu diệt mục tiêu trong vùng sai số cho phép.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống truyền động điện thủy lực pháo AK-230 cải tiến

Các tổ hợp pháo AK-230 được trang bị trên các tàu hải quân thời gian dài, đến nay đã hơn 50 năm sử dụng. Hệ truyền đông pháo AK-230 được Liên Xô chế tạo dạng truyền động EMY-D với công nghệ cũ và lạc hậu có nhiều nhược điểm như hiệu suất năng lượng thấp, thường xuyên phải bảo dưỡng, trong điều kiện khí hậu, môi trường biển … dẫn đến những sự

cố và hỏng hóc đặc biệt các thiết bị điện của hệ truyền động. Nhu cầu cải tiến, hiện đại hóa hệ thống điều khiển, truyền động tổ hợp pháo AK-230 đang được nhiều nhà khoa học quan tâm. Viện Kỹ thuật Hải quân đã cải tiến thay thế hệ truyền động EMY-D bằng hệ thủy lực, với việc sử dụng bộ điều khiển PID thích nghi là bộ hiệu chỉnh trong hệ bám đã đáp ứng được chất lượng điều khiển của hệ thống khi các tham số của hệ thống thay đổi nhỏ, tuy nhiên chưa xem xét đến yếu tố momen quán tính bệ pháo có sự thay đổi. Vì vậy, yêu cầu xây dựng hệ truyền động điện thủy lực cho pháo AK-230 với ưu điểm như: công suất lớn và khả năng tải nặng**,** độ chính xác cao trong điều khiển, hoạt động ổn định trong điều kiện khắc nghiệt như nhiệt độ cao, độ ẩm, bụi bẩn, hoặc rung động mạnh, truyền động linh hoạt…kết hợp với bộ điều khiển thích nghi nhằm thay thế, khắc phục những hạn chế của hệ điện cơ đang sử dụng trên pháo AK-230 đồng thời xét đến yếu tố thay đổi của mô men quán tính. Đề xuất mô hình hệ truyền động bám điện thủy lực cho pháo AK-230 như Hình 1 [2].

Các thông số về sai lệch tầm và hướng được đưa tới đầu vào thiết bị đo lường của hệ truyền động bám. Các thông số này được đưa tới khối điều khiển, tại đây nó được kết hợp với các tín hiệu phản hồi để hiệu chỉnh góc điều khiển, sau đó nó được biến đổi thành tín hiệu điện và được khuếch đại. Tín hiệu sau khi đã được khuếch đại sẽ đưa tới cuộn dây nam châm điện thuộc bộ phận điều khiển (bộ khuếch đại thủy lực), dưới tác động của nam châm làm bộ phân phối thủy lực dịch chuyển. Tín hiệu đưa vào cuộn dây nam châm điện là tín hiệu một chiều giá trị phụ thuộc vào góc sai lệch, còn cực tính phụ thuộc vào chiều của góc sai lệch. Khi van phân phối hoạt động cấp dầu đến động cơ thủy lực. Bơm thủy lực được nối với động cơ điện bên ngoài, khi động cơ điện quay làm bơm thủy lực quay và cấp dầu cao áp đến mô tơ thủy lực, làm mô tơ thủy lực quay, thông qua hộp đổi tốc làm pháo quay về vị trí giảm góc sai lệch. Tốc độ quay và chiều quay của mô tơ thủy lực phụ thuộc vào giá trị và chiều của tín hiệu sai lệch. Nguyên lý hoạt động của hệ truyền động bám điện thủy lực pháo AK-230 ở kênh tầm và kênh hướng cơ bản là giống nhau nên ta thực hiện tổng hợp bộ điều khiển thích nghi cho kênh hướng hệ bám thủy lực bệ pháo AK-230.

Để đảm bảo và nâng cao chất lượng điều khiển của hệ thống khi có sự xuất hiện của các yếu tố bất định hoặc biến đổi không biết trước giải pháp của bài báo đưa ra là xây dựng bộ điều khiển thích nghi cho hệ truyền động bám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-230.

2. Mô hình hệ truyền động kênh hướng

Hệ truyền động điện - thủy lực được minh họa trong Hình 1. Hệ truyền động thủy lực được điều khiển bằng van servo. Thành phần mô men sinh ra do hoạt động của động cơ thủy lực được mô tả bằng phương trình sau [3], [4]:

$$J\ \dot{\omega}_1 = D_m P_L - B\omega_1 - f(t, \varphi_1, \omega_1) \qquad (1)$$

Trong đó ω_1 và J lần lượt biểu diễn độ dịch chuyển góc và khối lượng quán tính của động cơ thủy lực và tải quy đổi về trục động cơ; $P_L = P_1 - P_2$ là áp suất tải của bộ truyền động thủy lực, P_1 và P_2 là áp suất bên trong hai khoang của bộ truyền động; D_m là độ dịch chuyển radian của bộ truyền động; B là hệ số ma sát nhớt và $f(t, \varphi_1, \omega_1)$ biểu diễn các nhiễu loạn khác như ma sát phi tuyến tính chưa mô hình hóa cũng như nhiễu loạn bên ngoài.

Bỏ qua rò rỉ bên ngoài, động lực học áp suất dầu thủy lực có thể được viết như sau:

$$\dot{P}_L = \frac{2\beta_e}{V}(-D_m\omega_1 - q_L + Q_h) \qquad (2)$$

Trong đó $V = V_1 = V_2$ là các thể tích điều khiển của các buồng truyền động; β_e là mô đun khối dầu hiệu dụng; $q_L = C_L.P_L$ là tổng rò rỉ bên trong của bộ truyền động; Q_h là lưu lượng cung cấp cho động cơ thủy lực, liên quan đến độ dịch chuyển con trượt của van servo x_v [2], [5]:

$$Q_h = C_d b_c x_v \sqrt{\frac{1}{\rho}(p_s - sign(x_v)P_L)} \tag{3}$$

Trong đó: b_c là tiết diện mặt cắt dẫn dầu của van; C_d là hệ số lưu lượng; p_s là áp suất nguồn dầu thủy lực cung cấp; P_L là áp suất tải trọng;

Áp dụng khai triển Taylor ta tuyến tính hóa phương trình (3) ta được[5], [6]:

$$Q_h = Kq.x_v - Kp.P_L \tag{4}$$

Trong đó: $K_q = \frac{\partial Q_h}{\partial x_c} = C_d b_c \sqrt{\frac{1}{\rho}(p_S - sign(x_c)P_L)}$ - hệ số khuếch đại theo lưu lượng của bộ phân phối thủy lực; $K_P = \frac{\partial Q_h}{\partial P_L} = \frac{C_d b_c x_v \sqrt{1/\rho (p_S - sign(x_v)P_L)}}{2(p_S - sign(x_v)P_L)}$ - hệ số khuếch đại theo áp suất của bộ phân phối thủy lực.

Van servo được sử dụng ở đây, giả sử áp dụng cho van servo tỷ lệ thuận với vị trí của thanh trượt [2],[5]:

$$x_v = K_i.u \tag{5}$$

Trong đó: K_i là hằng số dương là điện áp đầu vào điều khiển; u là điện áp điều khiển van servo.

Tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển được đưa tới bộ khuếch đại sau đó cấp tới điều khiển van servo. Hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại là K_{bd}.

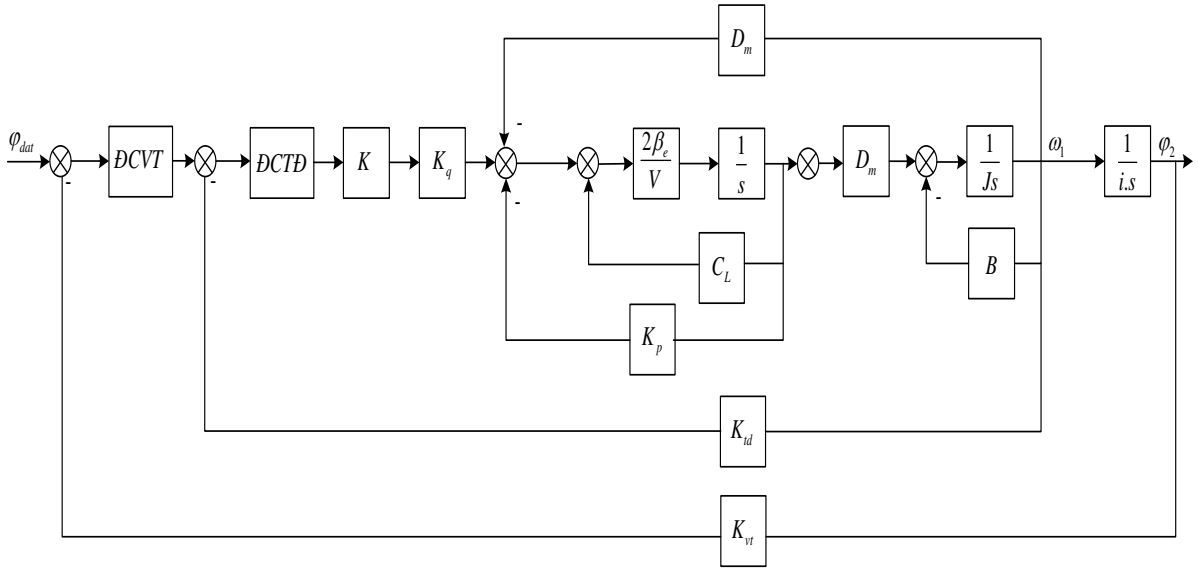
Động cơ thủy lực được liên kết với bệ pháo thông qua hệ thống bánh răng

Từ (1), (2), (4)và (5), ta có mô tả toán học của động cơ thủy lực điều khiển bằng van servo như sau:

$$\begin{cases} J_1\dot{\omega}_1 = D_m P_L - B\omega_1 - f(t, \varphi_1, \omega_1) \\ \dot{P}_L = \frac{2\beta_e}{V}(-D_m\omega_1 - C_L P_L + Q_h) \\ Q_h = Kq.x_v - Kp.P_L \\ x_v = K_{bd}K_i.u_{dk} \end{cases} \tag{6}$$

3. Xây dựng bộ điều khiển

Trong nội dung bài báo, xây dựng vòng điều chỉnh tốc độ sử dụng bộ điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu và vòng điều chỉnh vị trí sử dụng bộ điều khiển PID tổng hợp theo tiêu chuẩn tối ưu đối xứng [7].



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc hệ truyền động điện - thủy lực bám hướng pháo AK-230

Với $K = K_{bd}.K_i$; ĐCVT: Điều chỉnh vị trí theo tiêu chuẩn tối ưu đối xứng; ĐCTĐ: Điều chỉnh tốc độ là bộ điều khiển thích nghi.

3.1 Lựa chọn mô hình mẫu

Chọn mô hình mẫu là khâu động học bậc 2 là hàm truyền hệ kín của vòng điều chỉnh tốc độ hệ thống được tổng hợp theo tiêu chuẩn tối ưu mô đun [7].

Tổng hợp vòng điều chỉnh tốc độ theo tối ưu mô đun. Hàm truyền của đối tượng là:

$$G(s) = \frac{K.K_q}{\frac{V}{2\beta_e}s + (C_L + K_p)}.\frac{D_m}{Js}.K_{td} = \frac{\frac{K.K_q.D_m.K_{td}}{J(C_L+K_p)}}{s.\left(\frac{V}{2\beta_e(C_L+K_p)}s+1\right)}$$

$$G(s) = \frac{b}{s(T_\mu s+1)} \text{ với } b = \frac{K.K_q.D_m.K_{td}}{J(C_L+K_p)} \text{ và } T_\mu = \frac{V}{2\beta_e(C_L+K_p)}$$

Hàm truyền hệ hở theo tối ưu mô đun: $G_H(s) = \frac{1}{2T_\mu s(T_\mu s+1)}$

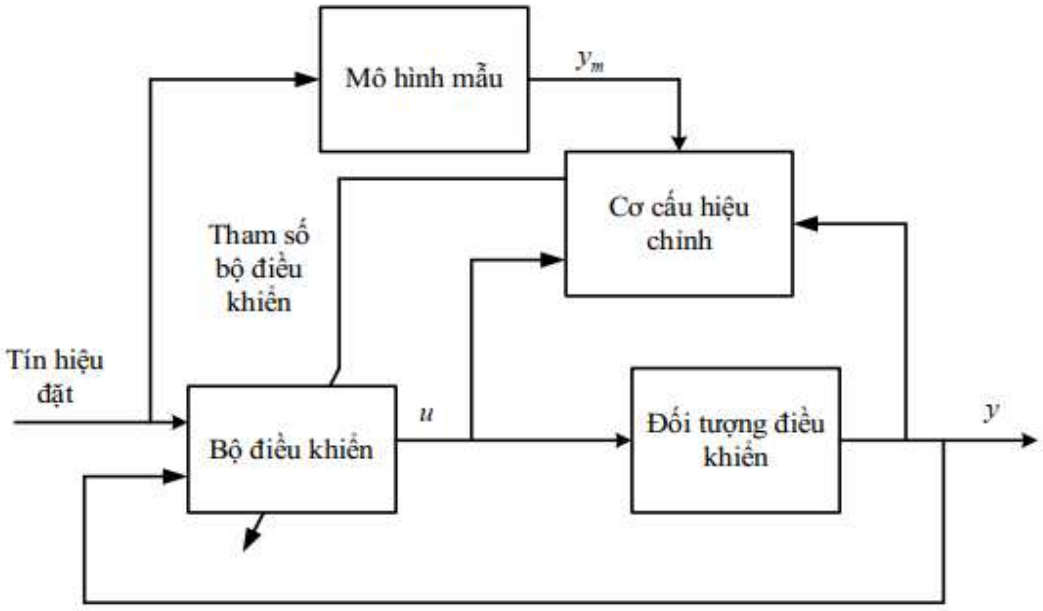
Hàm truyền bộ điều chỉnh tốc độ: $\beta_{td} = \frac{1}{2.b.T_\mu}$

Hàm truyền hệ kín: $G_m(s) = \frac{\omega^2}{s^2+2\xi\omega s+\omega^2}$ $\xi = 0.707; \omega = \frac{\sqrt{2}}{2T_\mu}$

3.2 Xây dựng bộ điều khiển thích nghi

Hệ thích nghi sử dụng mô hình mẫu là một trong những phương pháp chính của điều khiển thích nghi, hệ thống có sơ đồ chức năng như Hình 3. [8] Mô hình mẫu sẽ cho đáp ứng ngõ ra mong muốn đối với tín hiệu đặt (yêu cầu). Hệ thống có một vòng hồi tiếp thông thường bao gồm đối tượng và bộ điều khiển. Sai số ***e*** là sai lệch giữa ngõ ra của hệ thống và của mô

hình mẫu $e = y - y_m$. Bộ điều khiển bao gồm 2 vòng hồi tiếp: Một vòng phía trong gọi là vòng hồi tiếp thông thường có quá trình và bộ điều khiển. Các thông số của bộ điều khiển được chỉnh định bởi vòng ngoài sao cho sai số ngõ ra y và mô hình y_m là nhỏ nhất [8], [9].



Hình 3. Sơ đồ khối của hệ thống thích nghi theo mô hình tham chiếu

Cơ cấu chỉnh định với thông số theo luật MIT:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \tag{7}$$

Trong đó e là sai số của mô hình $e = y - y_m$. Các thành phần của véc tơ $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ là đạo hàm của độ nhạy sai số đối với các thông số chỉnh định θ. Thông số γ xác định tốc độ thích nghi. Giả sử các thông số θ thay đổi chậm hơn nhiều so với các biến khác trong hệ thống. Để bình phương sai số là nhỏ nhất, cần thay đổi các thông số theo hướng gradient âm của bình phương sai số e^2. Giả sử muốn thay đổi thông số của bộ điều khiển sao cho ngõ ra của đối tương và của mô hình chuẩn tiến tới zero. Đặt e là sai số và θ là thông số hiệu chỉnh. Chỉ tiêu chất lượng:

$$V = \frac{1}{2}e^2 \rightarrow \min \tag{8}$$

Để làm cho $V(\theta)$ min thì cần thay đổi các thông số theo hướng âm của gradient, có nghĩa là:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \tag{9}$$

Nếu θ là một vec tơ thì mỗi thành phần của θ hiệu chỉnh theo độ nhạy sai số tương ứng $\frac{d\theta_i}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta_i}$

Xét đối tượng điều khiển tuyến tính có dạng sau: $y(t) = \frac{B}{A}u(t)$. Các hệ số của B và A là các thông số chưa biết.

Mô hình mẫu có dạng $y_m(t) = \frac{B_m}{A_m}u_c(t)$

Luật điều khiển tuyến tính tổng quát: $Ru(t) = Tu_c(t) - Sy(t)$

Sai số ngõ ra đối tượng và ngõ ra mô hình mẫu: $e(t) = y(t) - y_m(t)$. Xác định cấu trúc của các đa thức R, T, S và tìm luật cập nhật các thông số của R, T, S sao cho $e(t) \to 0$

Bậc của các đa thức R, T S được chọn sao cho: điều kiện tồn tại lời giải bài toán điều khiển theo mô hình chuẩn được thỏa mãn và phương trình Diophantine có nghiệm.

Đặt vec tơ thông số của bộ điều khiển là θ:

$\theta = [r_0, r_1, ...r_{nr}, t_0, t_1, ...t_{mt}, s_0, s_1, ...s_{ms}]^T$

n_r, m_s, m_t tương ứng là bậc của các đa thức R, T, S.

Chọn chỉ tiêu chất lượng: $V = \frac{1}{2}e^2 \to \min$

Luật MIT: $\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e\frac{\partial e}{\partial \theta}$

Ta có: $\frac{dV}{dt} = e.\dot{e} = e\left[\frac{\partial e}{\partial \theta}\right]^T\left[\frac{d\theta}{dt}\right] = -\gamma e^2\left[\frac{\partial e}{\partial \theta}\right]^T\left[\frac{\partial e}{\partial \theta}\right] \le 0$

Khi tổng hợp vòng điều khiển tốc độ, ta có hàm truyền đối tượng là

$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b}{s(s+a)}$ với $b = \frac{K.K_q.D_m.K_{td}}{J(C_L + K_p)}; a = \frac{1}{T_\mu} = \frac{1}{\frac{V}{2\beta_e(C_L + K_p)}}$; b là tham số thay đổi theo thời gian (thay đổi theo J).

Mô hình mẫu: $G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{U_c(s)} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2}$

Luật điều khiển: $u = k(u_c - y)$

$\Rightarrow (p^2 + ap)y = bk(u_c - y)$

$\Leftrightarrow (p + ap + bk)y = bku_c$

$\Leftrightarrow y = \frac{bk}{p^2 + ap + bk}u_c$

Sai số của hệ thống vòng kín:

$$e = y - y_m = \frac{bk}{p^2 + ap + bk}u_c - \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial e}{\partial k}=\frac{\partial y}{\partial k}=\frac{b(p^2+ap+bk)-b^2k}{\left(p^2+ap+bk\right)^2}u_c$$

Đạo hàm:

$$\Leftrightarrow \frac{\partial e}{\partial k}=\frac{\partial y}{\partial k}=\frac{b(p^2+ap)}{\left(p^2+ap+bk\right)^2}u_c$$

Theo MIT, luật cập nhật hệ số tỷ lệ k có dạng:

$$\frac{dk}{dt}=-\gamma'.e.\frac{\partial e}{\partial k}=-\gamma'(y-y_m)\frac{b(p^2+ap)}{\left(p^2+ap+bk\right)^2}u_c \qquad (11)$$

Do b là tham số bất định. Do đó phải xấp xỉ để loại bỏ đi thông số chưa biết này.

Hàm truyền đạt mong muốn của hệ thống vòng kín:

$$G_m(s)=\frac{Y_m(s)}{U_c(s)}=\frac{\omega^2}{s^2+2\xi\omega s+\omega^2}$$

$$\Leftrightarrow (s^2+2\xi\omega s+\omega^2)Y_m(s)=U_c(s)$$

$$\Leftrightarrow (p^2+2\xi\omega p+\omega^2)y_m=\omega^2u_c$$

$$\Leftrightarrow y_m=\frac{\omega^2u_c}{p^2+2\xi\omega p+\omega^2}$$

Hàm truyền đạt của hệ thống đạt tới hàm truyền đạt mong muốn:

$$(p+ap+bk)y=bku_c\equiv(p^2+2\xi\omega p+\omega^2)y_m=\omega^2u_c$$

Hay $bk=\omega^2$. Khi đó phương trình (11) có thể xấp xỉ:

$$\frac{dk}{dt}=-\gamma'.e.\frac{\partial e}{\partial k}=-\gamma'(y-y_m)\frac{b(p^2+ap)}{\left(p^2+ap+\omega^2\right)^2}u_c$$

Đặt $\gamma=\gamma'.b$. Ta được: $\frac{dk}{dt}=-\gamma(y-y_m)\frac{(p^2+ap)}{\left(p^2+ap+\omega^2\right)^2}u_c$

$$\frac{dk}{dt}=-\gamma\left(\frac{bk}{p^2+ap+bk}-\frac{\omega^2u_c}{p^2+2\xi\omega p+\omega^2}\right)\frac{(p^2+ap)}{\left(p^2+ap+\omega^2\right)^2}u_c^2 \qquad (12)$$

Khi tín hiệu vào có biên độ nhỏ, tốc độ hội tụ của hệ thống rất chậm, khi biên độ tín hiệu vào tăng lên, tốc độ hội tụ cũng tăng lên tương ứng. Khi biên độ lớn thì hệ thống gần như không ổn định nữa. Để hạn chế nhược điểm này,ta dùng luật hiệu chỉnh thông số bổ sung.

Luật hiệu chỉnh bổ sung [7]:

$$\frac{dk}{dt}=-\gamma\frac{e\frac{\partial e}{\partial k}}{\alpha+\left(\frac{\partial e}{\partial k}\right)^T\left(\frac{\partial e}{\partial k}\right)}=-\gamma\frac{e\frac{\partial e}{\partial k}}{\alpha+\left(\frac{\partial e}{\partial k}\right)^2} \qquad (13)$$

Với α nhỏ tùy ý (chọn $\alpha=0.00001$) và $\frac{\partial e}{\partial k}\approx\frac{(p^2+ap)}{\left(p^2+ap+\omega^2\right)^2}u_c$

4. Mô phỏng và đánh giá kết quả

4.1 Tham số mô phỏng

- Chọn van servo loại Moog_ServoValves_936Series;
- Chọn động cơ piston hướng trục loại A2FM series6:

Bảng 1: Các thông số chính

TT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Lưu lượng dịch chuyển mỗi vòng quay	cm^3/vòng	4,9
2	Áp suất lớn nhất	bar	350
3	Tốc độ quay tối đa	vòng/phút	10.000
4	Lưu lượng tối đa	lít/phút	49
5	Mô men quán tính	kgm^2	0,00006

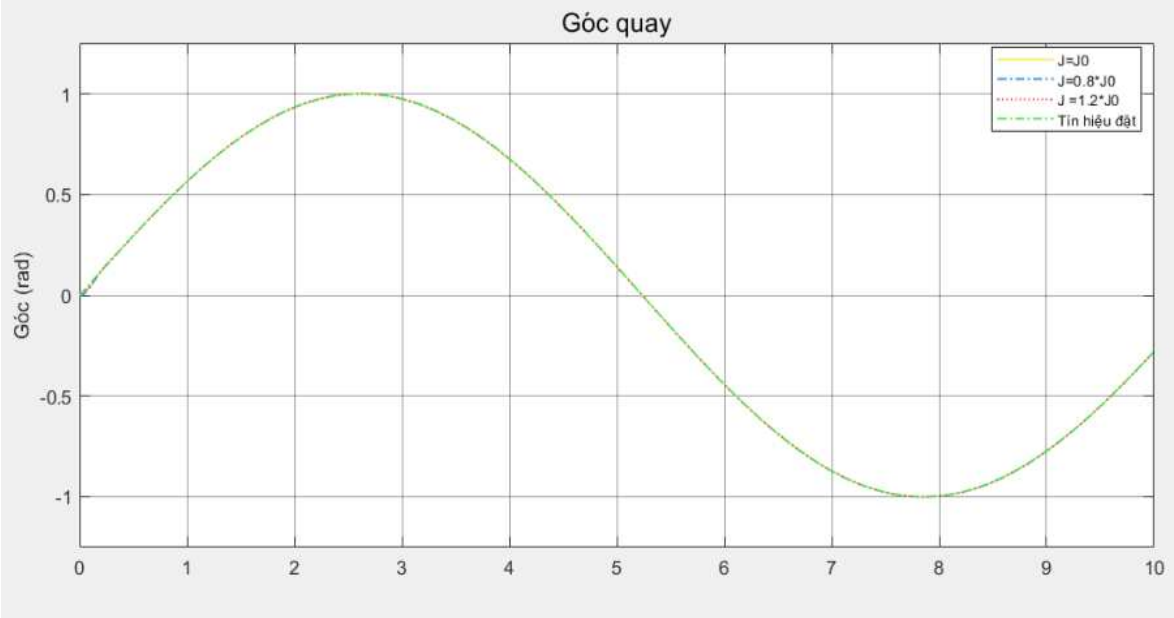
Bảng 2: Các tham số mô phỏng

Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Mô men quán tính bệ pháo	J_p	$N.m.s^2$	0.0225
Mô men quán tính của mô tơ thủy lực	J_t	$N.m.s^2$	0,00006
Hệ số đàn hồi của dầu thủy lực	β_e	N/m^2	$1,25.10^9$
Tổng hệ số rò rỉ.	C_L	$m^5/N.s$	$1,1.10^{-11}$
Thể tích chứa dầu của mô tơ thủy lực.	V_t	m^3	389.10^{-6}
Thể tích dịch chuyển của động cơ	D_m	m^3/rad	$7,8025.10^{-7}$
Hệ số ma sát nhớt	B	N.m.s	0.0267
Tỉ số truyền hộp đổi tốc	i		100
Hệ số phản hồi tốc độ	K_{td}		0.0159
Hệ số phản hồi vị trí	K_{vt}		0.796
Hệ số bộ điều chỉnh tốc độ	β_{td}		6.9046
Hệ số khuếch đại van theo áp suất của bộ phân phối thủy lực	K_p		0.108
Hệ số khuếch đại van theo lưu lượng của bộ phân phối thủy lực	K_q		$1,75.10^{-11}$
Hệ số dòng điện	K_i		$1,325.10^{-3}$
Hệ số khuếch đại công suất	K_{bd}		4.8

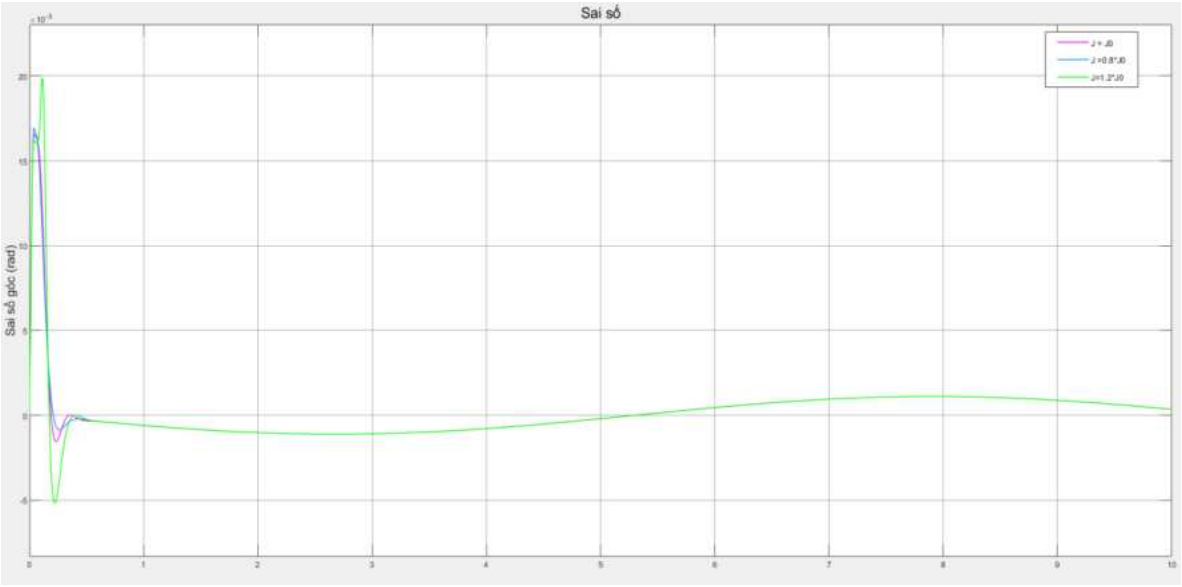
4.2 Kết quả mô phỏng

Mô phỏng hệ thống bám điện thủy lực kênh hướng của pháo AK-230 với hệ thống tuyến tính hóa, mô hình mẫu. Minh chứng hiệu quả của bộ điều khiển thích nghi, ta đặt vào hệ thống những sự thay đổi của mô men quán tính bệ pháo có thể xảy ra trong quá trình làm việc với tín hiệu đầu vào khác nhau.

* Đáp ứng của hệ thống bám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-230 ở chế độ bám sát khi tác động đầu vào là hàm sine có tốc độ quay là 0,6 (rad/s) như Hình 4.



(a) Góc quay bệ pháo (rad)



(b) Sai số $\Delta\varphi(rad)$

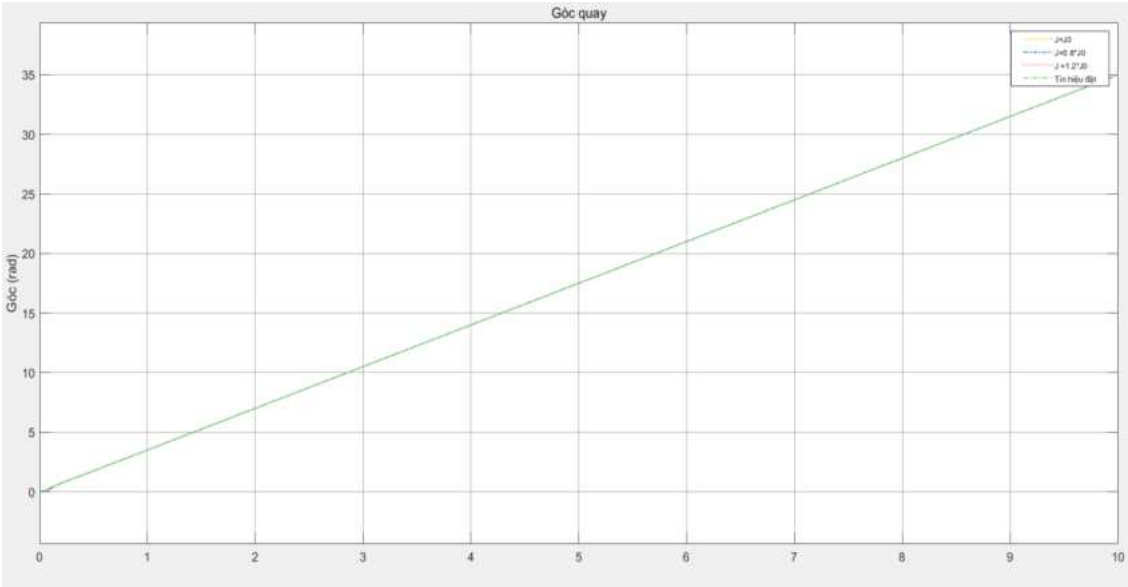
Hình 4. Đáp ứng đầu ra khi thay đổi mô men quán tính phần quay của bệ pháo với đầu vào là hàm sin

(a) Dùng bộ điều khiển thích nghi: 1-Khi $J_P = J_{0P}$; 2-Khi $J_P = 0.8 * J_{0P}$; 3-Khi $J_P = 1.2 * J_{0P}$

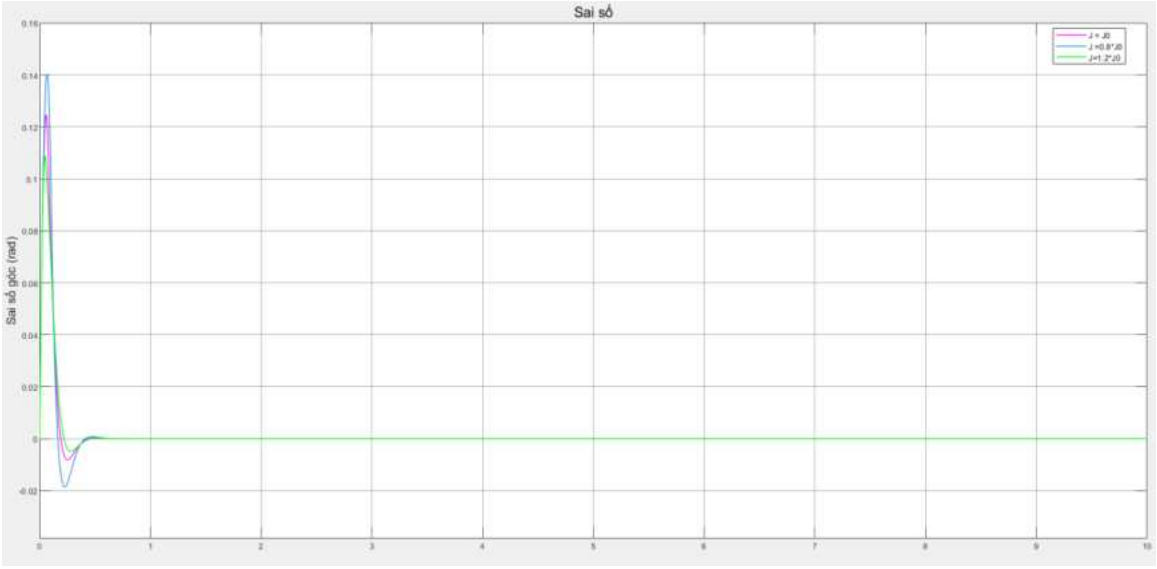
(b) Sai số $\Delta\varphi(rad)$: 1-Khi $J_P = J_{0P}$; 2-Khi $J_P = 0.8 * J_{0P}$; 3-Khi $J_P = 1.2 * J_{0P}$

Nhận xét: Ta thấy rằng khi tăng hoặc giảm mô men quán tính của phần quay bệ pháo J_P, hệ bám hướng pháo AK-230 với bộ điều khiển thích nghi, khi ta giảm $J_P = 0.8 * J_{0P}$ thì sai số giảm xuống và sau một thời gian hệ thống dần ổn định. Còn khi ta tăng $J_P = 1.2 * J_{0P}$ thì tăng lên và thời gian xác lập dài hơn.

* Đáp ứng của hệ thống bám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-230 ở chế độ bám sát khi tác động đầu vào là hàm ramp có độ dốc là 3.5^0 như Hình 5. Ta thấy sau 0,7(s) thì đáp ứng đầu ra bám sát tác động đầu vào.



(a) Góc quay bệ pháo (rad)



(b) Sai số $\Delta\varphi(rad)$

Hình 5. Đáp ứng đầu ra khi thay đổi mô men quán tính phần quay của bệ pháo với đầu vào là hàm ramp

(a) Dùng bộ điều khiển thích nghi: 1-Khi $J_P = J_{0P}$; 2-Khi $J_P = 0.8 * J_{0P}$; 3-Khi $J_P = 1.2 * J_{0P}$

(b) Sai số $\Delta\varphi(rad)$: 1-Khi $J_P = J_{0P}$; 2-Khi $J_P = 0.8 * J_{0P}$; 3-Khi $J_P = 1.2 * J_{0P}$

Nhận xét: Ta thấy rằng khi tăng hoặc giảm mô men quán tính của phần quay bệ pháo J_P, hệ bám hướng pháo AK-230 với bộ điều khiển thích nghi, khi ta giảm $J_P = 0.8 * J_{0P}$ thì sai số tăng lên và sau một thời gian hệ thống dần ổn định. Còn khi ta tăng $J_P = 1.2 * J_{0P}$ thì giảm đi lên và thời gian xác lập ngắn hơn.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển thích nghi cho hệ thống bám điện thủy lực kênh hướng cho pháo AK-230. Phần trình bày được việc xây dựng mô hình toán học của hệ thống và xây dựng bộ điều khiển thích nghi và xây dựng sơ đồ mô phỏng trên Simulink.

Hệ thống bám điện thủy lực của pháo AK-230 trên tàu là một hệ thống phức tạp, tham số thay đổi (cụ thể mô men quán tính của phần quay bệ pháo ảnh hưởng khá lớn đến chất lượng điều khiển của hệ thống). Trong nội dung bài báo đã thực hiện mô hình hóa tuyến tính hệ thống, sử dụng phương pháp điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu để điều khiển hệ thống khi tham số hệ thống thay đổi (mô men quán tính của bệ pháo). Khi mô phỏng với các trường hợp mô men men quán tính phần quay bệ pháo khác nhau với các dạng tín hiệu đầu vào khác nhau, kết quả đánh giá chất lượng làm việc hệ truyền động bám hướng pháo AK-230 nhận thấy hệ thống đạt được các thông số tương ứng với yêu cầu đã nêu trong nhiệm vụ kỹ thuật.

Tài liệu tham khảo

[1] V. K. thuật hải Quân, *Thuyết minh kỹ thuật và hướng dẫn sử dụng pháo AK-230 trên tàu tên lửa 205U*. Hải Phòng: Viện Kỹ thuật Hải quân, 2002.

[2] J. Yao, Z. Jiao, D. Ma, and L. Yan, "High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 633–641, 2014, doi: 10.1109/TMECH.2013.2252360.

[3] R. Dindorf and P. Wos, "Dynamic Properties of a Hydraulic Servo Actuator Flexibly Connected to a Load Mass Excited by Cyclic Force," pp. 1–22.

[4] C. Kaddissi, J. P. Kenné, and M. Saad, "Indirect adaptive control of an electro-hydraulic servo system based on nonlinear backstepping," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 4, pp. 3147–3153, 2006, doi: 10.1109/ISIE.2006.296119.

[5] H.E.Merritt, *Hydraulic Control Systems*. New York: NY, USA: Wiley, 1967.

[6] A. Akers, M. Gassman, and R. Smith, *Hydraulic power system analysis*. 2006. doi: 10.1201/9781420014587.

[7] Đ. H. Việt, *Điều khiển thích nghi hệ thống truyền động điện*. Hà Nội: Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, 2022.

[8] N. T. P. Hà, *Lý thuyết điều khiển hiện đại*. TP.Hồ Chí Minh: Nhà xuất bản ĐHQG TP. HCM, 2016.

[9] Nguyễn Doãn Phước, "Lý Thuyết Điều Khiển Tuyến Tính," 2009.

Adaptive controller design for electro-hydraulic drive system of the AK-230 cannon.

Abstract: This paper presents the results of research and design of an adaptive controller for the electro-hydraulic drive system for the AK-230 gun considering the change of system parameters. The detailed content of the paper shows the process of building a linear mathematical model for the channel-tracking drive system and synthesizing an adaptive controller for the electro-hydraulic drive system for the channel-tracking drive system for the AK-230 gun on a Navy ship when considering the uncertain moment of inertia of the gun platform. The synthesis algorithm is verified by simulation on Matlab-Simulink.

Keywords: *Electro-hydraulic system, adaptive system…*

Nghiên cứu tổng hợp phương pháp dẫn tiếp cận tỉ lệ trên cơ sở kỹ thuật học tăng cường

Lê Ngọc Chính[1], Cao Hữu Tình

Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, HV KTQS

[1]*lechinh.mta@gmail.com; 0847856083*

Tóm tắt

Bài báo đề xuất phương pháp tổng hợp tham số của luật dẫn tiếp cận tỉ lệ cho tên lửa dựa trên kỹ thuật học tăng cường. Hệ số tiếp cận tỉ lệ được xem là tham số cần được tối ưu hóa trong quá trình dẫn tên lửa. Phương pháp được đề xuất là sử dụng thuật toán Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) để huấn luyện các mạng neuron nhằm ánh xạ tới hệ số tiếp cận tối ưu. Quá trình huấn luyện và đánh giá hiệu quả dẫn tên lửa được thực hiện thông qua độ trượt Zero-Effort Miss (ZEM), quá tải yêu cầu và khoảng cách tên lửa - mục tiêu. Bài báo sử dụng mô hình vòng dẫn kín gồm động lực học quán tính bậc nhất và cấu trúc luật dẫn được đề xuất. Việc huấn luyện và mô phỏng được thực hiện trên ngôn ngữ Python, môi trường huấn luyện dựa trên động hình học tên lửa mục tiêu. Kết quả được phân tích và so sánh với luật dẫn tiếp cận tỉ lệ tăng cương để đánh giá hiệu quả của phương án đề xuất.

Từ khóa: *Dẫn đường tên lửa; dẫn tiếp cận tỉ lệ; dẫn tiếp cận tỉ lệ tăng cường; học tăng cường; DDPG;*

1. Đặt vấn đề

Về bản chất, thiết kế luật dẫn tên lửa là một dạng bài toán bám sát trong thời gian hữu hạn, phụ thuộc vào tiêu chí đặt ra ban đầu. Nếu chỉ xem xét đánh chặn mục tiêu, sai số dẫn được xác định là khoảng cách ZEM [1–4]. Việc triệt tiêu ZEM dẫn đến khả năng đánh tiêu diệt mục tiêu. Đối với một số loại tên lửa chiến thuật, việc hạn chế góc tiếp cận hoặc góc đón giúp tăng cường xác suất tiêu diệt mục tiêu hoặc duy trì khả năng dẫn thuận lợi [5–7]. Để đáp ứng yêu cầu này, sai số về góc được coi là sai số bám sát trong thiết kế luật hướng dẫn [8–12]. Để tăng cường khả năng sống sót của tên lửa chống hạm trước hệ thống phòng không của tàu, khái niệm tấn công đồng loạt [13] được đưa ra để để dẫn đường cho nhiều tên lửa đánh trúng một mục tiêu cố định đồng thời tại thời điểm tác động mong muốn và do đó sai số thời gian va chạm được coi là sai số bám sát trong thiết kế luật dẫn [13–17]. Ngày nay nhiều lý thuyết điều khiển phi tuyến như: điều khiển chế độ trượt (SMC) [1, 2, 18 20], điều khiển H∞ [21], lý thuyết hàm Lyapunov [22], điều khiển dự đoán [23] và điều khiển tuyến tính hóa phản hồi [24, 25] được sử dụng để điều khiển sai số bám sát tiệm cận về 0 trong thời gian hữu hạn. Cụ thể hơn, luật dẫn được thiết kế để buộc quỹ đạo của hệ thống tuân theo động lực học sai số mong muốn. Đây là một quy trình chung để thiết lập các luật dẫn tên lửa mới bằng cách sử dụng phương pháp điều khiển phi tuyến tính. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung vào cách buộc sai số bám sát hội tụ về 0 mà chưa quan tâm đến cách tối ưu hóa hiệu suất trong quá trình dẫn. Đồng thời, các bài toán dẫn đường trong điều kiện thực tế ngày nay có tính chất thay đổi nhiều theo thời gian, phi tuyến tính và có nhiều hạn chế trong điều kiện bất đối xứng. Vì vậy thực thi các thuật toán dựa trên mô hình trong các tình huống như vậy bắt đầu xuất hiện những khó khăn vì nó gần đúng với mô hình hoặc dễ bị dự đoán dẫn đến nhiều khả năng bị đánh chặn. Trong khi đó, các thuật toán học theo hướng dữ liệu có thể hỗ trợ cả một mô hình có lựa chọn kém và khó dự đoán hơn. Do đó khi có sự không chắc chắn của mô hình, các thuật toán dựa trên cả mô hình và dữ liệu có thể cho thấy sự cải thiện về hiệu suất so với các phương pháp chỉ dựa trên mô hình.

Mục tiêu chính của bài báo này là xây dựng một phương pháp dẫn cho tên lửa sử dụng kỹ thuật học tăng cường. Để đạt được điều đó bài báo xây dựng một bài toán dẫn tên lửa trong khung học tăng cường (RL framework) bằng cách coi động học tên lửa-mục tiêu là môi trường và lệnh điều khiển là hành động của agent DDPG, đồng thời cấu trúc hàm khen thưởng cũng đảm bảo sự cân bằng giữa độ chính xác dẫn, thời gian đánh chặn và gia tốc tạo được của tên lửa. Với việc sử dụng thuật toán DDPG bài báo đã trình bày phương pháp tổng hợp hệ số tỉ lệ tối ưu cho từng trạng thái quan sát, qua đó hình thành lệnh dẫn tên lửa.

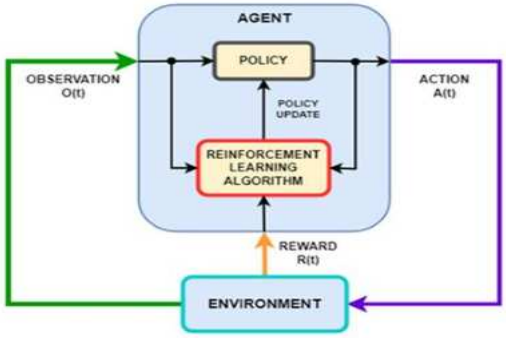
2. Học tăng cường

2.1. Khái niệm chung

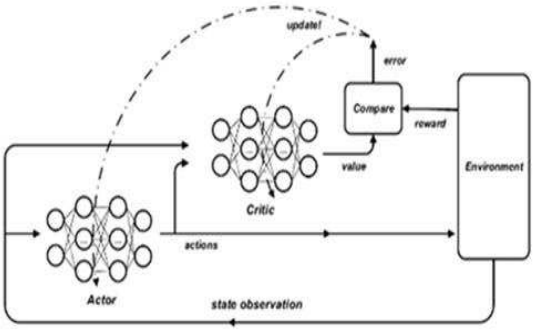
Học tăng cường là một mô hình của học máy, trong đó một tác nhân (agent) học cách đưa ra quyết định thông qua các tương tác thử và sai với môi trường nhằm tối đa hóa phần thưởng tích lũy. Phương pháp này nổi bật bởi khả năng thích nghi dựa trên kết quả của các hành động mà tác nhân thực hiện, thay vì phụ thuộc vào các quy tắc được định nghĩa sẵn [26]. Cơ sở của RL được xây dựng dựa trên một số khái niệm chính sau:

- Tác nhân (Agent): Là đối tượng học hoặc đưa ra quyết định.
- Môi trường (Environment): Là hệ thống mà tác nhân tương tác.
- Trạng thái (States): Là các tình huống hoặc điều kiện khác nhau mà tác nhân gặp phải.
- Hành động (Actions): Là các lựa chọn hoặc động thái mà tác nhân có thể thực hiện.
- Phần thưởng (Rewards): Là phản hồi từ môi trường, cho biết mức độ hiệu quả của một hành động.

Những yếu tố này kết hợp với nhau tạo thành cơ sở của RL, cho phép tác nhân học hỏi từ môi trường một cách linh hoạt và liên tục.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc học tăng cường



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc thuật toán DDPG

2.2. Deep Deterministic Policy Gradient

Thuật toán DDPG là phương pháp học tăng cường thuộc nhóm off-policy, học online và không phụ thuộc mô hình (Model-Free). Cấu tạo bên trong thuật toán DDPG dựa trên kiến trúc mạng Actor-Critic và DDPG được kế thừa những ý tưởng về Experience Relay, Separate Target Network của thuật toán Deep Q-Network (DQN). Bao gồm hai khối chức năng chính: critic đánh giá chính sách đã cho dựa trên các trạng thái hiện tại để tính toàn hàm Q, khối actor tạo ra chính sách dựa trên dựa trên đánh giá của Critic. Thuật toán DDPG sử dụng 2 mạng neuron sâu

khác nhau tức là mạng actor và critic để xấp xỉ hàm hành động và giá trị Q. Cấu trúc cơ bản của DDPG được môt tả trong Hình 2.

3. Học tăng cường trong dẫn tên lửa

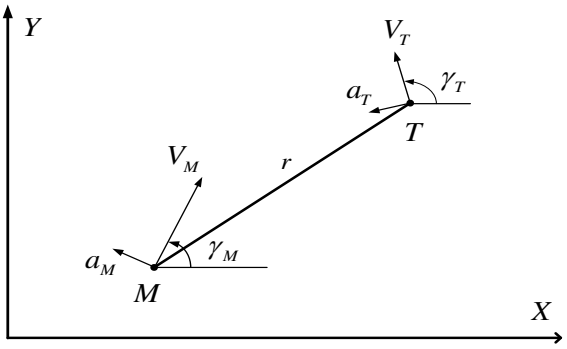
Bài báo này sử dụng 3 giả định cơ bản sau mà không làm mất tính tổng quát của bài toán:

- Giả định 1: tên lửa và mục tiêu đều xem là mô hình chất điểm.
- Giả định 2: nghiên cứu chuyển động trong mặt phẳng thẳng đứng.
- Giả định 3: cả tên lửa và mục tiêu đều bay với tốc độ không đổi.

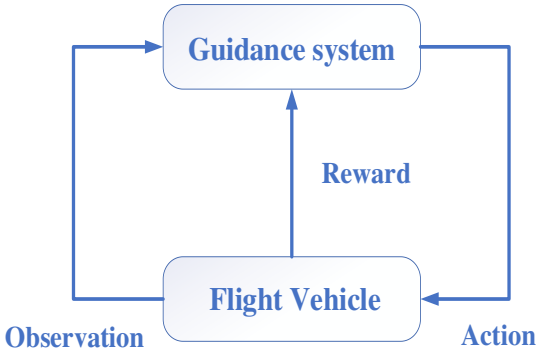
Các giả định này được chấp nhận rộng rãi trong nghiên cứu luật dẫn cho tên lửa phòng không hoặc các loại tên lửa chiến thuật khác.

3.1. Động học tương đối tên lửa mục tiêu

Trong bài báo này, nghiên cứu động học tên lửa mục tiêu 2D như Hình 3. Hệ quy chiếu quán tính được ký hiệu XY, các chỉ số M,T lần lượt biểu thị các biến của tên lửa, mục tiêu, ký hiệu λ là góc đường ngắm (LOS), r là khoảng cách tên lửa mục tiêu, γ là góc nghiêng quỹ đạo, a là gia tốc và V là vận tốc.



Hình 3. Động hình học tên lửa mục tiêu



Hình 4. Dẫn tên lửa trong RL

Động học tên lửa mục tiêu được mô tả bởi các phương trình sau:

$$\dot{r} = V_T \cos(\gamma_T - \lambda) - V_M \cos(\gamma_M - \lambda) \quad (1)$$

$$r\dot{\lambda} = V_T \sin(\gamma_T - \lambda) - V_M \sin(\gamma_M - \lambda) \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}_M = \frac{a_M}{V_M} \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_T = \frac{a_T}{V_T} \quad (4)$$

Trong thực tế việc gia tốc tạo được của tên lửa thường bị trễ bởi hệ truyền động lái. Một cách gần đúng chúng ta có thể coi hệ truyền động lái của tên lửa tương đương với một khâu quán tính bậc nhất được mô tả bởi phương trình:

$$\frac{a_M}{a_C} = \frac{1}{\tau_a s + 1} \tag{5}$$

Trong đó a_c gia tốc đòi hỏi, $\tau_a = 0.05$ là hằng số thời gian đặc trưng cho hệ truyền động lái của tên lửa.

3.2. Học tăng cường trong dẫn tên lửa

Bài báo trình bày phương án xây dựng bài toán dẫn tên lửa trong một khung học tăng cường bằng cách xây dựng một quá trình quyết định Makov (MDP) với hàm khen thưởng thích hợp, và xem động học tương đối phương trình (1-4) là môi trường tương tác được đặc trưng bởi các trạng thái:

$$s_t = (r, \lambda, \dot{r}, \dot{\lambda}) \tag{6}$$

Hành động của tác nhân chính là lệnh dẫn tên lửa a_c. Nội dung trong bài báo được giả định tên lửa có trang bị một đầu tự dẫn radar chủ động có thể đo được khoảng cách tương đối tên lửa-mục tiêu, góc quay đường ngắm và các tốc độ của chúng. Điều này có nghĩa là các biến quan sát của tác nhân là :

$$o_t = (r, \lambda, \dot{r}, \dot{\lambda}) \tag{7}$$

Như vậy phương trình động học tương đối (1-4), trạng thái (6), quan sát (7), hành động của tác nhân và hàm khen thưởng tạo thành một khung học tăng cường hoàn chỉnh của bài toán đặt ra. Cấu trúc của khung học tăng cường dẫn đường tên lửa được mô tả trong Hình 4.

3.3. Xây dựng hàm khen thưởng

Để cân bằng giữa yêu cầu đánh chặn mục tiêu và khả năng thực hiện của tên lửa, bài báo sử dụng hàm khen thưởng có dạng như sau:

$$r_t = r_a + r_z + r_V + r_r \tag{8}$$

Trong đó:

$$r_a = k_a \left(\frac{a_M}{a_{Max}} \right)^2; \qquad r_z = k_z \left(\frac{z}{r_0} \right)^2; \qquad r_V = \begin{cases} k_V, \dot{r} \geq 0 \\ 0, \dot{r} < 0 \end{cases}; \qquad r_r = \begin{cases} k_r, r \leq r_{\max} \\ 0, r > r_{\max} \end{cases}$$

Với k_a, k_z, k_v, k_r là các hệ số để cấu trúc hàm khen thưởng; a_{max} là gia tốc tối đa tên lửa có thể tạo được; z là độ trượt ZEM; r_0 là khoảng cách ban đầu giữa tên lửa và mục tiêu, r_{max} là sai số dẫn tối đa có thể chấp nhận được. Các tham số được trình bày trong Bảng 1.

Table 1 Các tham số của hàm khen thưởng

k_a	k_z	k_v	k_r	a_{max} (m/s^2)	r_{max} (m)
-0.2	-2.0	-2.0	100	400	2

4. Huấn luyện tác nhân DDPG

Trong phần này bài báo trình một agent DDPG nhằm tổng hợp hệ số tỉ lệ tối ưu:

$$N_{DDPG} = f(r, \lambda, \dot{r}, \dot{\lambda}) \tag{9}$$

Khi đó luật dẫn có dạng

$$a_c = N_{DDPG}\,\dot{\lambda} V_c \tag{10}$$

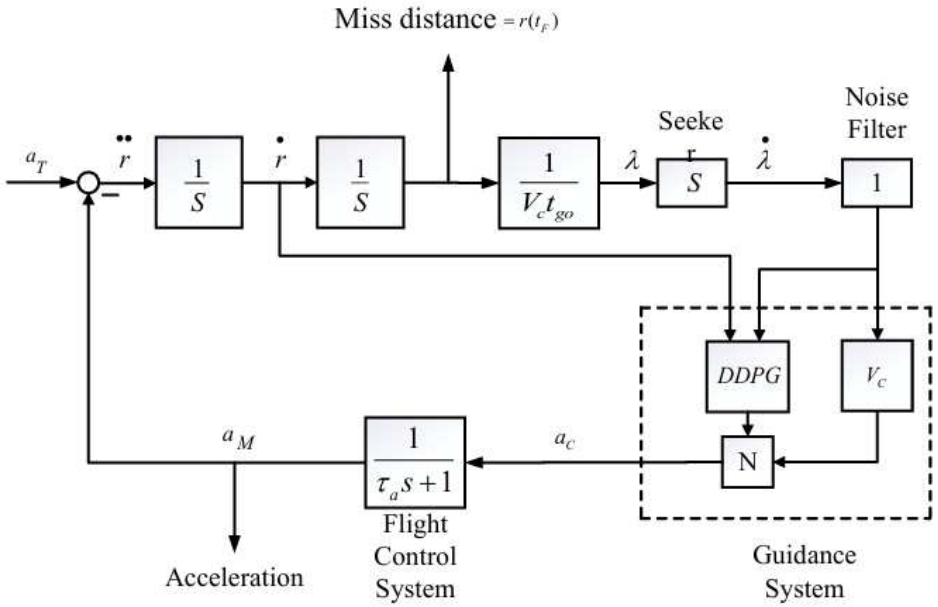
Trong đó *f()* là một hàm phi tuyến, V_c là vận tốc tiếp cận. Để thực hiện việc huấn luyện tác nhân DDPG dẫn tên lửa cần thực hiện 3 phần: xây dựng tình huống huấn luyện, xây dựng cấu trúc mạng neuron và cuối cùng là điều chỉnh các tham số.

4.1. Tình huống huấn luyện

Nội dung bài báo xem xét một tình huống đối đầu trực tiếp. Để agent DDPG đạt được hiệu suất tốt khi huấn luyện thì điều kiện ban đầu cho mỗi episode được chọn ngẫu nhiên trong khoảng như Bảng 2 . Tốc độ tên lửa không đổi $V_M = 700\,(\text{m/s})$, tốc độ mục tiêu không đổi $V_T = 350\,(\text{m/s})$. Gia tốc pháp tuyến của của tên lửa được giới hạn $|a_M| \le 400\,(\text{m/s}^2)$. Mục tiêu chuyển động với gia tốc pháp tuyến dạng xung vuông có chu kỳ $T = 4s$ và biên độ thay đổi tuân theo phân bố đều được giới hạn trong khoảng $|a_T| \le 100\,(\text{m/s}^2)$. Động học quá trình dẫn với agent DDPG được huấn luyện trực tiếp từ dữ liệu được môt tả trong Hình 5.

Bảng 2. Điều kiện ban đầu cho huấn luyện

Tham số	Giá trị tối thiểu	Giá trị tối đa
Khoảng cách tương đối ban đầu, r_0	4000 m	6000 m
Góc đường ngắm (LOS), λ	-10^0	10^0
Góc nghiêng quỹ đạo ban đầu của tên lửa, γ_M	$\lambda - 5^o$	$\lambda + 5^o$
Góc nghiêng quỹ đạo ban đầu của mục tiêu, γ_T	0^0	360^0
Autopilot time constant, τ_a	0.05s	



Hình 5: Động học quá trình dẫn với Agent DDPG

4.2. Cấu trúc mạng neuron

Từ thuật toán DDPG gốc [27], mạng Critic và Actor được cấu trúc 4 lớp. Cấu trúc này thường được áp dụng trong các ứng dụng học tăng cường [28]. Kích thước của các mạng này

được trình bày trong Bảng 3. Ngoại trừ đầu ra của mạng neuron được kích hoạt bởi hàm "tanh", các lớp ẩn đều sử dụng hàm kích hoạt là "Relu". Việc sử dụng hàm kích hoạt "ReLu" giúp tính toán nhanh và cải thiện hiệu quả huấn luyện, đầu ra của mạng neuron sử dụng hàm "tanh" giúp ngăn ngừa hiện tượng bão hòa lệnh điều khiển. Vì đầu ra của hàm kích hoạt "tanh" bị giới hạn trong khoảng (-1,1) nên cần nhân với một hằng số N_{max}.

Cả mạng Critic và Actor đều được huấn luyện với bằng bộ tối ưu Adam với L2 Regularizer để giảm thiểu hiện tượng overfitting của mô hình và cải thiện khả năng tổng quát của mô hình.

Bảng 3. Kích thước mạng neuron

Lớp (Layer)	**Actor network**	**Critic network**
Input layer	4(size of states)	5 (size of states + action)
Hidden layer 1	30	40
Hidden layer 2	20	30
Output layer	1 (size of action)	1(size of Q)

4.3. Điều chỉnh các tham số

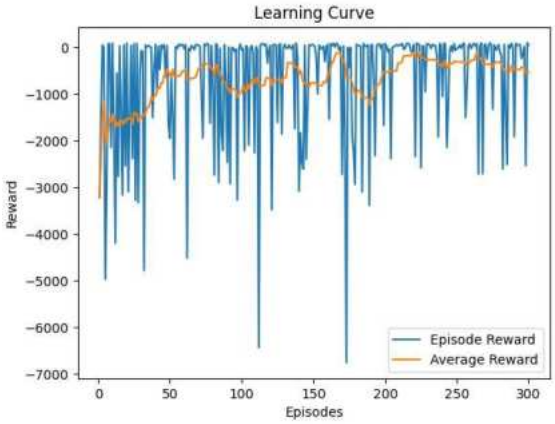
Quá trình huấn luyện của mỗi episode sẽ kết thúc nếu khoảng cách tương đối tên lửa – mục tiêu không quá r_{max} = 2m hoặc thời gian vượt quá giá trị tối đa. Điều này cũng phù hợp với thực tế khi tên lửa tiêu diệt mục tiêu hoặc tiêu hao hết nhiên liệu của mình. Các tham số cho thật toán DDPG dùng để huấn luyện agent cho bài toán dẫn tên lửa này được trình bày trong Bảng 4.

Table 4. Các siêu tham số

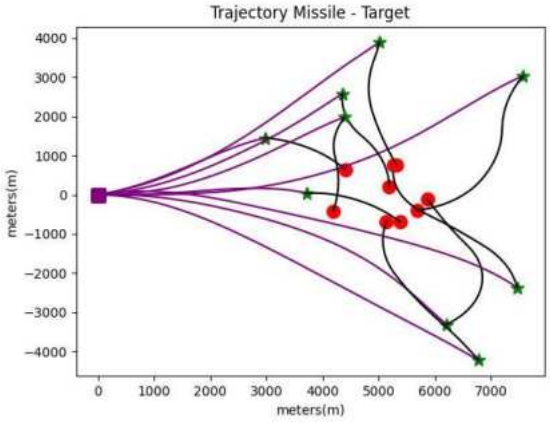
Tham số	**Giá trị**
Maximum permissible steps	2000
Maximum permissible episodes	200
Actor learning rate, α	1e-4÷1e-6
Critic learning rate, β	1e-4÷1e-6
Regularizer L2 constant of Actor network, λ_1	1e-4
Regularizer L2 constant of Critic network, λ_2	1e-4
Gradient upper bound	1
Discounting factor, γ	0.99
Size of experience buffer, $\|D\|$	5e5
Size of mini-batch samples, N	64
Mean of exploration noise, μ	0
Initial variance of exploration noise, σ	0.1
Variance update coefficient, ε	0.99
Mean attraction constant, χ	0.15
Targetnet works update constant, τ	0.05
Sampling time, Δt	1e-5 (s)

4.4. Kết quả mô phỏng

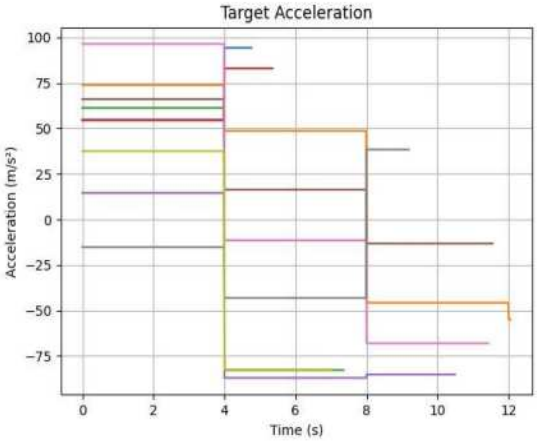
Kết quả huấn luyện mô hình và mô phỏng với 10 lần thử nghiệm:



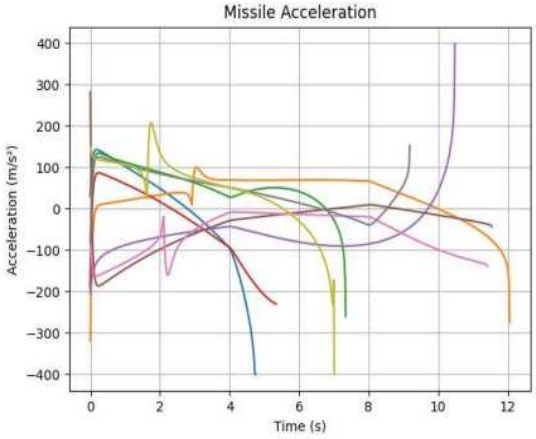
Hình 6: Đường cong huấn luyện



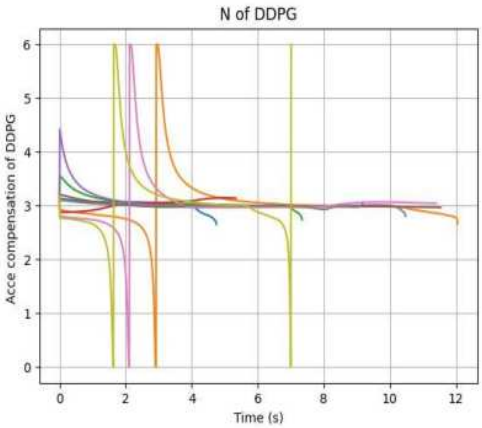
Hình 7 Quỹ đạo tên lửa mục tiêu



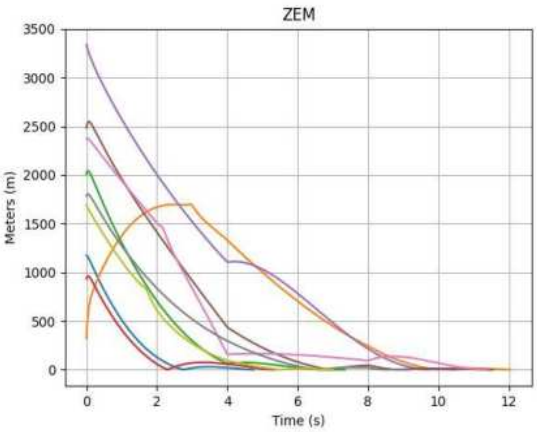
Hình 8. Gia tốc mục tiêu



Hình 9. Gia tốc tên lửa



Hình 11. Hệ số N của Agent DDPG

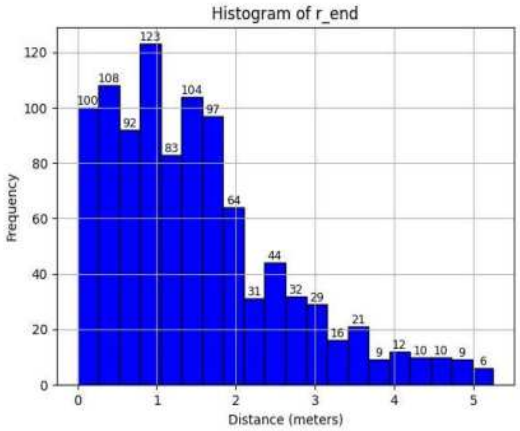


Hình 12. Độ trượt ZEM

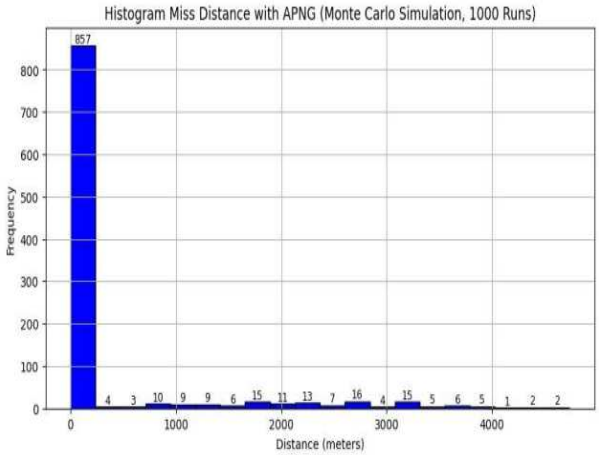
Để đánh giá tính bền vững của phương pháp dẫn, chúng tôi thực hiện so sánh kết quả mô phỏng Monte Carlo 1000 lần giữa mô hình Agent DDPG được đề xuất với tiếp cận tỉ lệ tăng cường APNG [29]. Đồng thời mô hình cũng được thử nghiệm trong những trường hợp không có trong huấn luyện: giới hạn gia tốc mục tiêu a_{Tmax} thay đổi, chu kỳ cơ động của mục tiêu không đổi T = 4s. Tốc độ tên lửa, mục tiêu không đổi lần lượt là V_M = 700 m/s và V_T=350 m/s. Điều kiện được xem là tiêu diệt mục tiêu thành công là sai số dẫn không lớn hơn 2m.

Table 5. So sánh kết quả của Agent DDPG với APNG

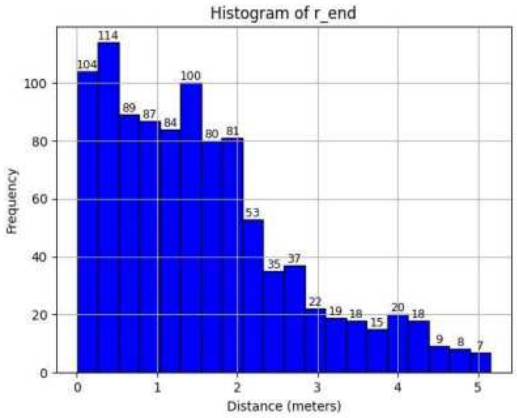
Trường hợp	$a_{T.max}$ [m/s^2]	Agent DDPG	APNG
1	50	76.2%	73.8%
2	70	75.5%	69.5%
3	100	75.0%	53.3%
4	120	73.1%	44.4%
5	150	70.2%	32.7%



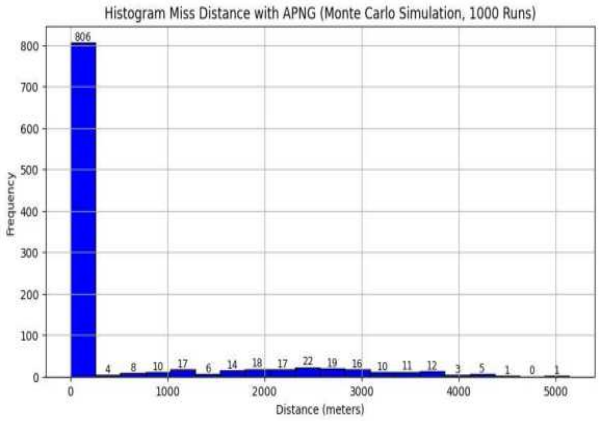
Hình 13. Histogram Agent DDPG trường hợp 3



Hình 14. Histogram APNG trường hợp 3



Hình 15. Histogram Agent DDPG trường hợp 4



Hình 16. Histogram APNG trường hợp 4

5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất phương pháp tối ưu hệ số tỉ lệ cho luật dẫn tiếp cận tỉ lệ khi dẫn tên lửa. Kết quả mô phỏng gồm hai giai đoạn: huấn luyện và đánh giá. Trong giai đoạn đánh giá, mô hình agent DDPG được thử nghiệm với các trường hợp mục tiêu cơ động khác nhau mà không gặp trong giai đoạn huấn luyện. Ngoài ra, một mô phỏng với phương pháp APNG được thực hiện sau đó phân tích và so sánh kết quả đạt được. Trong khi hiệu quả dẫn của APNG phụ thuộc vào sự cơ động của mục tiêu. Ngược lại mô hình Agent DDPG thể hiện rõ tính bền vững của mình đối với các trường hợp khác nhau. Như vậy, việc sử dụng mô hình Agent DDPG để tối ưu hệ số tỉ lệ bước đầu cho thấy tiềm năng hoàn thiện phương pháp dẫn tên lửa.

Tài liệu tham khảo

1. Shima, T., Idan, M., & Golan, O. M. (2006). Sliding-mode control for integrated missile autopilot guidance. *Journal of guidance, control, and dynamics, 29*(2), 250-260.
2. Idan, M., Shima, T., & Golan, O. M. (2007). Integrated sliding mode autopilot-guidance for dual-control missiles. *Journal of guidance, control, and dynamics, 30*(4), 1081-1089.
3. Dwivedi, P., Bhale, P., Bhattacharyya, A., & Padhi, R. (2016). Generalized estimation and predictive guidance for evasive targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 52*(5), 21111-22122.
4. He, S., & Lee, C.-H. (2018). Gravity-turn-assisted optimal guidance law. *Journal of guidance, control, and dynamics, 41*(1), 171-183.
5. Kim, M., & Grider, K. V. (1973). Terminal guidance for impact attitude angle constrained flight trajectories. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*(6), 852-859.
6. Kim, B. S., Lee, J. G., & Han, H. S. (1998). Biased PNG law for impact with angular constraint. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 34*(1), 277-288.
7. Lu, P., Doman, D. B., & Schierman, J. D. (2006). Adaptive terminal guidance for hypervelocity impact in specified direction. *Journal of guidance, control, and dynamics, 29*(2), 269-278.
8. Erer, K. S., & Merttopçuoglu, O. (2012). Indirect impact-angle-control against stationary targets using biased pure proportional navigation. *Journal of guidance, control, and dynamics, 35*(2), 700-704.
9. Lee, C.-H., Kim, T.-H., & Tahk, M.-J. (2013). Interception angle control guidance using proportional navigation with error feedback. *Journal of guidance, control, and dynamics, 36*(5), 1556-1561.
10. Kumar, S. R., Rao, S., & Ghose, D. (2012). Sliding-mode guidance and control for all-aspect interceptors with terminal angle constraints. *Journal of guidance, control, and dynamics, 35*(4), 1230-1246.
11. Kumar, S. R., Rao, S., & Ghose, D. (2014). Nonsingular terminal sliding mode guidance with impact angle constraints. *Journal of guidance, control, and dynamics, 37*(4), 1114-1130.
12. He, S., Song, T., & Lin, D. (2017). Impact angle constrained integrated guidance and control for maneuvering target interception. *Journal of guidance, control, and dynamics, 40*(10), 2653-2661.
13. Jeon, I.-S., Lee, J.-I., & Tahk, M.-J. (2006). Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles. *IEEE Transactions on control systems technology, 14*(2), 260-266.
14. Jeon, I.-S., Lee, J.-I., & Tahk, M.-J. (2010). Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles. *Journal of guidance, control, and dynamics, 33*(1), 275-280.
15. Kim, T.-H., Lee, C.-H., Tahk, M.-J., & Jeon, I.-S. (2013). Biased PNG law for impact-time control. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 56*(4), 205-214.
16. Cho, N., & Kim, Y. (2016). Modified pure proportional navigation guidance law for impact time control. *Journal of guidance, control, and dynamics, 39*(4), 852-872.
17. Harl, N., & Balakrishnan, S. N. (2011). Impact time and angle guidance with sliding mode control. *IEEE Transactions on control systems technology, 20*(6), 1436-1449.

18. Moon, J., Kim, K., & Kim, Y. (2001). Design of missile guidance law via variable structure control. *Journal of guidance, control, and dynamics, 24*(4), 659-664.
19. Brierley, S., & Longchamp, R. (1990). Application of sliding-mode control to air-air interception problem. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 26*(2), 306-325.
20. Koren, A., Idan, M., & Golan, O. M. (2008). Integrated sliding mode guidance and control for missile with on-off actuators. *Journal of guidance, control, and dynamics, 31*(1), 204-214.
21. Yang, C.-D., & Chen, H.-Y. (1998). Nonlinear H robust guidance law for homing missiles. *Journal of guidance, control, and dynamics, 21*(6), 882-890.
22. Lechevin, N., & Rabbath, C. (2004). Lyapunov-based nonlinear missile guidance. *Journal of guidance, control, and dynamics, 27*(6), 1096-1102.
23. Talole, S., & Banavar, R. N. (1998). Proportional navigation through predictive control. *Journal of guidance, control, and dynamics, 21*(6), 1004-1006.
24. Menon, P., Sweriduk, G., & Ohlmeyer, E. (2003). *Optimal fixed-interval integrated guidance-control laws for hit-to-kill missiles.* Paper presented at the AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit.
25. Weiss, G., & Rusnak, I. (2015). All-aspect three-dimensional guidance law based on feedback linearization. *Journal of guidance, control, and dynamics, 38*(12), 2421-2428.
26. Sutton, R. S. (2018). Reinforcement learning: An introduction. *A Bradford Book*.
27. Lillicrap, T. (2015). Continuous control with deep reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1509.02971*.
28. Henderson, P., Islam, R., Bachman, P., Pineau, J., Precup, D., & Meger, D. (2018). *Deep reinforcement learning that matters.* Paper presented at the Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence.
29. Zarchan, P. (2012). *Tactical and strategic missile guidance*: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.

Research on synthesizing proportional guidance law for missiles based on reinforcement learning techniques

Abstract: *This paper proposes a parameter synthesis method for the proportional navigation (PN) guidance law for missiles based on reinforcement learning techniques. The proportional navigation gain is considered a parameter that needs to be optimized during the missile guidance process. The proposed approach utilizes the Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) algorithm to train neural networks to map to the optimal navigation gain. The training process and missile guidance performance evaluation are conducted based on Zero-Effort Miss (ZEM) deviation, required acceleration, and missile-target distance. The paper employs a closed-loop guidance model that includes first-order inertial dynamics and the proposed guidance law structure. Training and simulation are implemented in Python, with the training environment based on the kinematics of the target missile. The results are analyzed and compared with augmented proportional navigation to assess the effectiveness of the proposed approach.*

Keywords: missile guidance; proportional navigation guidance; augmented proportional navigation guidance; reinforcement learning; deep deterministic policy gradient

Nghiên cứu phương án xây dựng hệ thống điều khiển sàn công tác cho đài radar trên tàu hải quân

Ngô Kiên Định[1*], Hoàng Mạnh Tưởng[1], Nguyễn Đình Khánh[2]

[1]Viện tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Khoa Vũ khí dưới nước, Học viện Hải quân

**Email: Ngokiendinh2013@gmail.com; tel: 036 650 2071*

Tóm tắt

Bài báo trình bày nội dung nghiên cứu về phương án xây dựng hệ thống điều khiển sàn công tác cho đài radar trên tàu hải quân, nhằm đảm bảo khả năng hoạt động ổn định của radar trong điều kiện tàu di chuyển trên biển với các chuyển động phức tạp, qua đó duy trì độ chính xác và hiệu quả của radar trong việc phát hiện và theo dõi mục tiêu. Nghiên cứu tập trung vào phân tích các đặc điểm mô hình động học của sàn công tác, đồng thời đề xuất giải pháp sử dụng hệ thống điều khiển sử dụng các tín hiệu từ các thiết bị cảm biến trên tàu. Bằng cách sử dụng các thuật toán điều khiển hiện đại được áp dụng để tối ưu hóa khả năng phản ứng của sàn công tác với các điều kiện hoạt động thực tế. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển được đề xuất có khả năng ổn định tốt theo phương ngang của sàn công tác, tăng cường hiệu quả chiến đấu của tàu hải quân trong các nhiệm vụ tác chiến.

Từ khoá: *Sàn cân bằng ; điều khiển PID ; ổn định theo phương ngang…*

1.Đặt vấn đề

Một trong những xu hướng chính để hiện đại hóa quân đội là làm chủ công nghệ thiết kế, chế tạo nhằm nâng cao sức chiến đấu, tính năng kỹ chiến thuật của các thiết bị, hệ thống vũ khí mới. Theo đó, việc nâng cấp tổ hợp radar trên tàu hải quân là một bài toán quan trọng, mang tính cấp thiết. Trong tổ hợp này, để đảm bảo radar hoạt động tốt trong môi trường tàu rung lắc ta có thể đặt an-ten Radar điều khiển hỏa lực lên một sàn công tác có khả năng ổn định theo phương ngang. Đây là ý tưởng đặt ra nhằm giúp nâng cao khả năng tự chủ trong quá trình đóng mới các hệ tàu quân sự có trang bị hệ thống radar điều khiển hỏa lực hoặc các trang thiết bị hạng nhẹ cần tính ổn định cao trong quá trình thực hiện các nhiệm vụ trên biển.

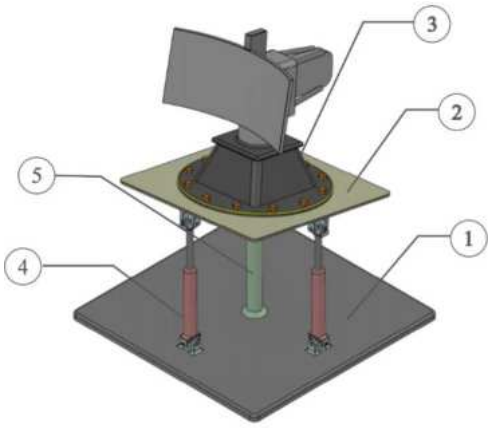
Để thực hiện ổn định sàn công tác theo mặt phẳng ngang có thể thực hiện theo nhiều phương án khác nhau [5-7]. Một số phương án được đưa ra như mô hình sàn ổn định sửu dụng 6 thanh truyền có thể thay đổi chiều dài (Stewart Platform) [8], mô hình sàn ổn định dạng khung cardan (Cardan Frame Stabilizer) và một số phương án khác nhau của mô hình hệ thống ổn định dạng hai chân chống (Two-point Stabilizer).

Trong đó phương án sử dụng cơ cấu bù góc dựa trên các bộ truyền động thủy lực sẽ đảm bảo được vấn đề công suất khi một số loại an-ten Radar trên tàu Hải quân có khối lượng lớn. Góc bù có thể lấy từ đầu ra trong hệ thống dẫn đường chung của tàu hoặc một hệ thống định hướng độc lập và nó được tính toán, biến đổi thành tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành thủy lực (servo thủy lực). Dựa trên cơ sở này bài báo đưa ra một phương án nghien cứu phương án xây dựng hệ thống điều khiển sàn công tác cho đài an-ten radar trên tàu hải quân ổn định theo phương ngang dựa trên bộ điều khiển PID với hiệu suất và độ chính xác cao.

2. Mô hình hệ thống ổn định cho sàn công tác của an-ten radar

Trên Hình 1, thể hiện mô hình hệ thống ổn định sàn công tác đài radar dạng hai chân chống đặt vuông góc, trong đó, (1) là sàn tàu, nơi đặt radar, (2) là sàn ổn định nơi đặt đài radar, (4) là các piston thủy lực được điều khiển bằng các van servo, trụ đỡ (5) có phân chân được gắn chặt vào sàn tàu (1), sàn ổn định (2) được kết nối với các piston và trụ đỡ bởi các khớp nối cardan.

Đối với thiết bị cần ổn định cụ thể là đài Radar điều khiển hỏa lực (3) có khối lượng lớn, cấu trúc đối xứng và được bố trí trùng với trục dọc mũi lái tàu, cách trọng tâm tàu một khoảng

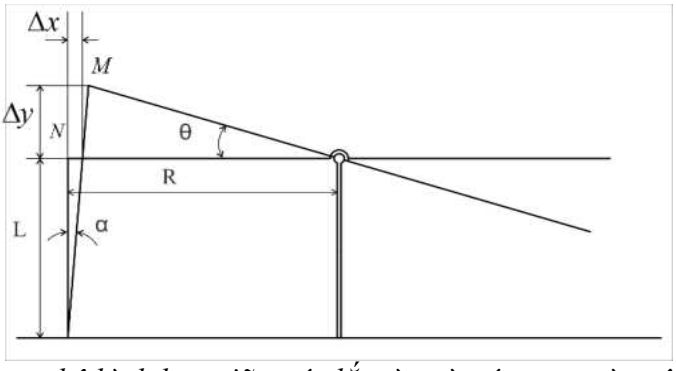


cách tùy vào kiến trúc thượng tầng của tàu.

Hình 1. Mô hình sàn công tác hai chân chống thủy lực của Ra-da

1: Sàn tàu; 2: Sàn công tác; 3: Mô hình Radar; 4: piston thủy lực; 5: Trụ đỡ

Mô hình sàn công tác hoạt động theo nghuyên tắc: khi tàu bị nghiêng góc θ thì chân chống thủy lực được điều khiển kéo dài hoặc co ngắn lại một đại lượng ΔL bù khử góc nghiêng của sàn công tác do tàu gây ra.



Hình 2. Mối quan hệ hình học giữa góc lắc tàu và góc quay sàn công tác

Mối quan hệ động hình học giữa góc nghiêng θ và độ dịch chuyển piston ΔL được biểu diễn trên hình 2, trong đó N là điểm đặt piston, R là bán kính từ tâm quay đến vị trí điểm đặt chân chống thủy lực, L là chiều dài ban đầu của chân chống thủy lực. Khi sàn công tác quay một góc θ thì điểm N quay đến điểm M cách vị trí ban đầu một đoạn Δx và Δy tương ứng.Theo phương án này, mỗi chân chống thủy lực sẽ phụ trách ổn định một góc lắc một cách độc lập, do đó ta xét mô hình toán học của một chân chống thủy lực, chân chống còn lại có thể tính toán tương tự.

Từ hình vẽ 2, ta suy ra được các mối quan hệ hình học:

$$\begin{cases} (L+\Delta L).\sin\alpha = \Delta x \\ (L+\Delta L).\cos\alpha = \Delta y + L \end{cases} \quad (1)$$

Mặt khác

$$\begin{cases} \Delta x = R - R.\cos\theta \\ \Delta y = R.\sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

Từ đó ta có thể tìm ra mối liên hệ giữa ΔL và θ

$$\Delta L = \sqrt{(R - R.\cos\theta)^2 + (R.\sin\theta + L)^2} - L \quad (3)$$

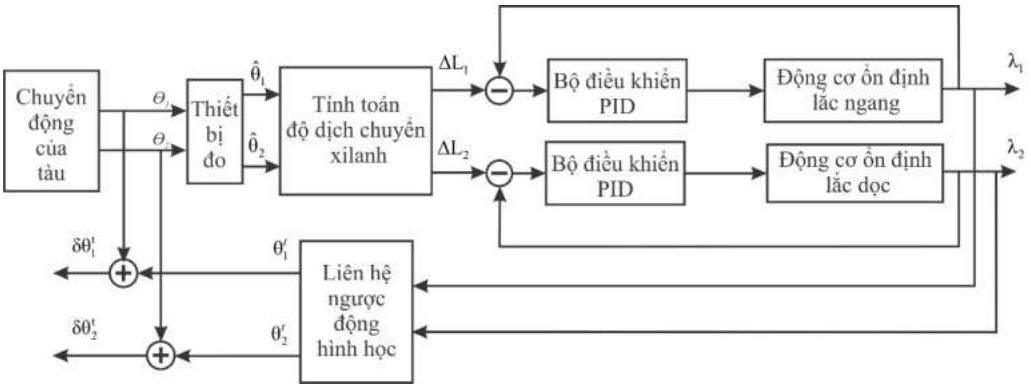
Suy ra

$$\theta = \arccos\left(\frac{L}{\sqrt{R^2+L^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{R^2 - 2.L.\Delta L - \Delta L^2}{2R.\sqrt{R^2+L^2}}\right) \quad (4)$$

Để điều khiển tư thế góc của sàn công tác sử dụng động cơ servo thủy lực. Phương án sử dụng hai chân chống thủy lực vuông góc (Hình 1) còn có khả năng chịu tải rất cao vì trụ đỡ (5) chịu tải hầu hết trọng lượng của đài radar và sàn công tác, các chân chống thủy lực chỉ có trách nhiệm chính là tạo ra góc quay cho sàn công tác quanh trụ đỡ để đưa sàn công tác về vị trí cân bằng. Với phương án sử dụng cấu chấp hành là động cơ servo thủy lực, nó có những ưu điểm vượt trội như đơn giản trong thiết kế, thi công, dễ bảo trì trong điều kiện hoạt động đặc thù trên biển, có khả năng chịu tải tương đối lớn, phù hợp với nhiều nhiệm vụ, phương tiện cần ổn định cũng như tương thích cao với hệ thống điện, hệ thống động lực sẵn có của tàu Hải quân, đặc biệt nó ít chịu ảnh hưởng bởi các tác động của thời tiết trong điều kiện làm việc ngoài trời.

3. Mô phỏng hệ thống ổn định sàn công tác

Để khảo sát phương án xây dựng hệ thống ổn định sàn công tác ta thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink. Sơ đồ khối chức năng của hệ thống ổn định sàn công tác được thể hiện trên hình 3



Hình 3. Sơ đồ khối chức năng của hệ thống ổn định sàn công tác

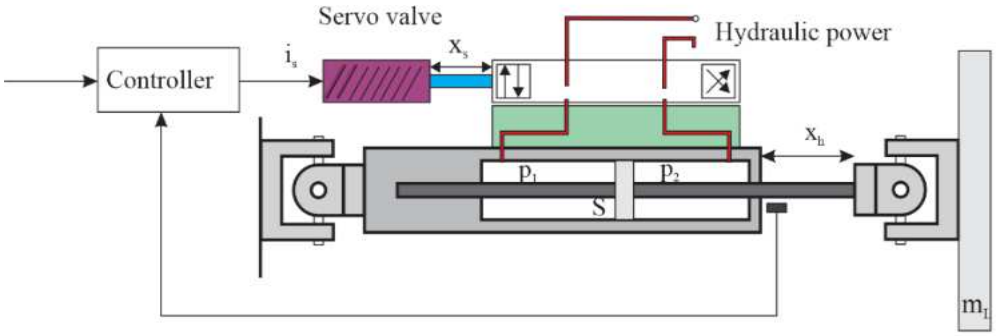
Trong đó Khối chuyển động của tàu sẽ thực hiện tạo giả các góc lệch phương ngang của tàu θ_1, θ_2. Khối thiết bị đo sẽ xác định các tham số góc lệch phương ngang của tàu. Tín hiệu đầu ra của thiết bị đo góc lệch phương ngang $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ sẽ đưa đến khối tính toán để xác định các tham số độ dịch chuyển các động cơ chấp hành $\Delta L_1, \Delta L_2$ tương ứng. Các tham số này được

đưa đến bộ điều khiển để thực hiện điều khiển. Khi mô phỏng sử dụng bộ điều khiển PID có tác dụng bám theo các tín hiệu điều khiển đầu vào. Khối động cơ ổn định sử dụng khi mô phỏng là động cơ servo thủy lực.

Nhờ động cơ thủy lực hoạt động làm độ dịch chuyển các đầu xilanh với độ dịch tương ứng λ_1, λ_2. Để kiểm tra độ chính xác của hệ thống ổn định cần biến đổi các độ dịch λ_1, λ_2 nhờ sử dụng khối liên hệ ngược động hình học. Đầu ra của khối liên hệ ngược động hình học cho phép xác định các góc quay thực của sàn công tác θ_1^t, θ_2^t. Do đó góc lệch của sàn công tác so với phương ngang được xác định bằng

$$\begin{aligned} \delta\theta_1^t &= \theta_1^t + \theta_1; \\ \delta\theta_2^t &= \theta_2^t + \theta_2 \end{aligned} \tag{5}$$

Khi thực hiện mô phỏng coi thiết bị đo góc lệch phương ngang tàu không có sai số. Mô hình động cơ servo thủy lực được thể hiện trên hình 4 [2]:



Hình 4. Cấu trúc của bộ truyền động điện-thủy lực

Mô hình động cơ thủy lực khi mô phỏng được mô tả theo hệ phương trình sau [1-4]:

$$\begin{cases} x(c) = k_c . \dfrac{i_c}{1 + \tau_c . s} \\ Q_h = C_d b_c x_c \sqrt{\dfrac{1}{\rho}(p_s - sign(x_c) P_h)} \\ P_h = \left(Q_h - A_h . \dot{X}_h\right) . \dfrac{1}{\dfrac{V_h}{2E_h} . s + C_{hl}} \\ \dot{X}_h = \dfrac{A_h P_h - F_h}{m_h . s + b_h} \end{cases} \tag{6}$$

Trong đó:

- Phương trình 1 mô tả mối quan hệ giữa vị trí của thanh trượt $x(c)$ trong một van servo và dòng điện điều khiển i_c tác động lên van; τ_c là hằng số thời gian của hệ thống, đại diện cho tốc độ phản ứng của hệ; k_c là hệ số tỷ lệ

- Phương trình 2 thể hiện tính toán lưu lượng tải vào khoang xilanh thông qua van khi độ dịch chuyển của van, trong đó: b_c là diện tích mở của cửa sổ giảm áp hình chữ nhật; C_d là hằng số; p_s là áp suất cổng cấp kết nối với nguồn cung áp suất; P_h là áp suất tải trọng;

- Phương trình 3 là phương trình cân bằng lưu lượng của xi lanh thủy lực, trong đó: Q_h là lưu lượng vào khoang xi lanh; A_h là diện tích mặt cắt ngang của piston; $\dot{X}_h$ là tốc độ dịch

chuyển của piston; V_h là thể tích ban đầu của khoang xi lanh; E_h là mô đun đàn hồi của chất lỏng; C_h là hệ số rò rỉ của chất lỏng; P_h là áp suất trong khoang xi lanh;

- Phương trình 4 mô tả chuyển động của piston thủy lực: A_h là lực tác dụng lên piston do áp suất trong khoang xi lanh; m_h là khối lượng của piston và các phần chuyển động; b_h là hệ số ma sát nhớt trong xi lanh thủy lực; F_h là lực ngoài tác dụng lên piston.

Các tham số động cơ servo thủy lực gồm: $E_h = 8\times10^8; t_c = 0,01s; k_c = 3,04\times10^{-3}$; $K_q = 2,7$ $K_p = 1,75\times10^{-11}; V_h = 1,1\times10^{-4}\,m^3$; $A_h = 2,3\times10^{-3}\,m^2$; $m_h = 250\,kg$; $B_h = 10^4$; $C_{hl} = 10^{-11}; F = 1000\text{N};$

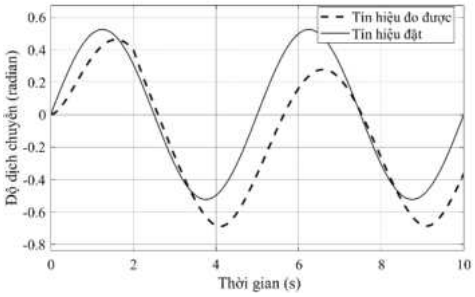
Một mô hình được đề xuất là hệ thống sử dụng bộ điều khiển PID, được thiết kế dựa trên việc phân tích chi tiết các phương trình động lực học, các đặc tính điều khiển, cũng như các tiêu chí ổn định nhằm đảm bảo khả năng hoạt động tối ưu của hệ thống. Quá trình thiết kế bộ điều khiển PID không chỉ tập trung vào việc điều chỉnh các tham số tỉ lệ (P), tích phân (I), và vi phân (D) để đạt được hiệu suất tối ưu, mà còn xem xét tác động của các yếu tố phi tuyến và điều kiện hoạt động thực tế. Để đánh giá tính chính xác và hiệu quả của mô hình, các mô phỏng số được thực hiện trên một loạt các kịch bản hoạt động khác nhau, bao gồm cả những điều kiện biến đổi bất thường và nhiễu động phức tạp.

Chuyển động của tàu trên sóng biển thường được mô phỏng bằng các phương trình dao động điều hòa [9]. Điều này phản ánh sự lắc lư của tàu dưới tác động của sóng biển, với biên độ và tần số dao động phụ thuộc vào đặc tính của sóng và thiết kế của tàu. Với các loại tàu chiến, chu kỳ dao động khi có sóng khoảng 4-7s, góc lắc ngang tối đa khoảng 30 độ, do đó tín hiệu tham chiếu đầu vào có thể lựa chọn: $\theta = 30\sin(0.4\pi t)$

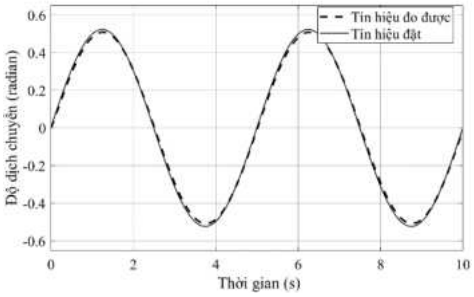
Hệ số rò rỉ của chất lỏng là một tham số phi tuyến, phụ thuộc vào áp suất, nhiệt độ và độ nhớt của chất lỏng, đồng thời hệ số này cũng tích lũy tăng dần trong thời gian hoạt động liên tục của động cơ servo thủy lực. Sự thay đổi của hệ số này có thể gây ảnh hưởng đáng kể đến động học và hiệu suất của hệ thống, đặc biệt trong các hệ thống ổn định.

Để khảo sát, khối liên hệ ngược động hình học dùng để biến đổi tín hiệu dịch chuyển từ động cơ servo thủy lực thành các góc thực tế của sàn công tác theo công thức (4). Các góc này dùng để so sánh với tín hiệu góc được khởi tạo để đánh giá độ chính xác hệ thống ổn định sàn công tác. Mô hình mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab Simulink kết quả mô phỏng hoạt động hệ thống ổn định sàn công tác được thể hiện trên Hình 5

Có thể thấy hệ số rò rỉ càng lớn, hệ thống hoạt động càng không chắc chắn, ổn định, chứng tỏ các yếu tố phi tuyến ảnh hưởng rất lớn đến hệ thống trong quá trình làm việc.

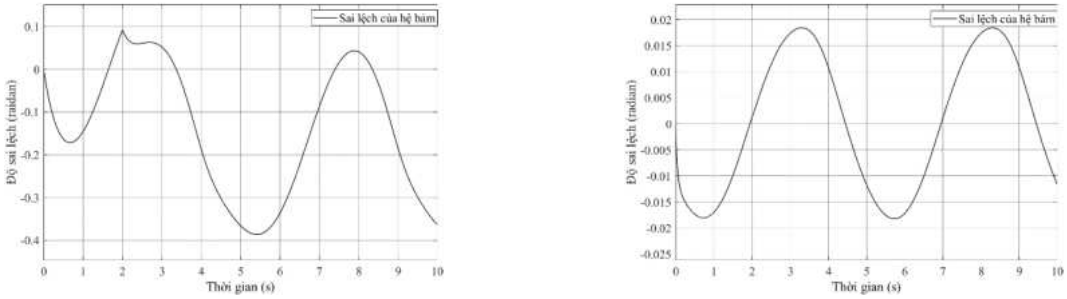


a) Với tham số $C_{hl} = 10^{-8}$



b) Với tham số $C_{hl} = 10^{-11}$

Hình 5. *Góc Dịch chuyển đầu ra servo so với tín hiệu đặt*

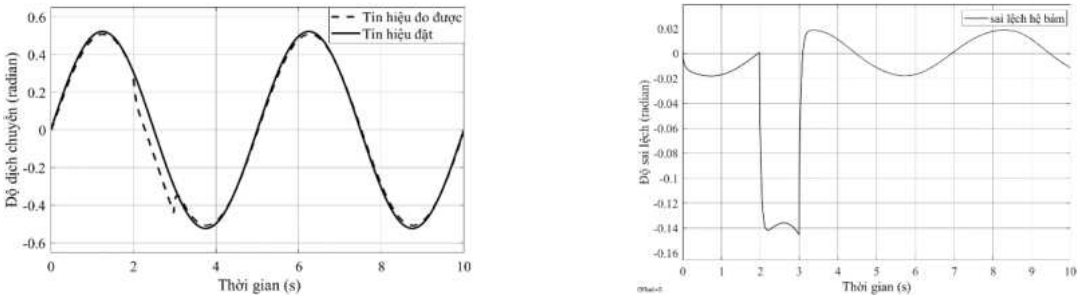


a) Với tham số $C_{hl} = 10^{-8}$ *b) Với tham số* $C_{hl} = 10^{-11}$

Hình 6. Sai số hệ thống ổn định sàn công tác

Ngoại lực tác động dạng một moment nhiễu loạn, moment này được biểu diễn dưới dạng một xung vuông, xuất hiện trong một khoảng thời gian ngắn, nhằm mô phỏng tình huống hệ thống phải đối mặt với một lực tác động đột ngột. Thông qua hình ảnh này, có thể quan sát được khả năng phản ứng của hệ thống, bao gồm cách bộ điều khiển PID xử lý sai lệch, duy trì ổn định và đưa hệ thống trở lại trạng thái cân bằng sau khi lực tác động kết thúc. Đây là một minh họa trực quan về hiệu quả của hệ thống trong việc đối phó với các nhiễu động ngoại lực bất ngờ.

Khảo sát quá trình làm việc của hệ thống khi có một moment ngoại lực tác động bất ngờ trong một khoảng thời gian $\Delta t = 1s$ được thể hiện qua Hình 7:

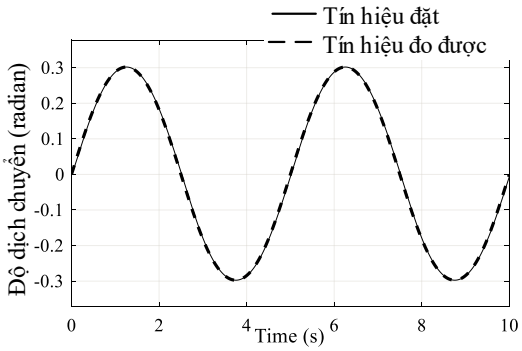


a) so sánh góc dịch chuyển khi có ngoại lực tác động so với tín hiệu đặt

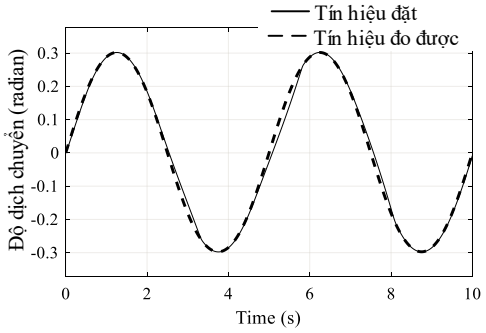
b) Sai lệch của hệ bám khi có ngoại lực tác động

Hình 7. Mô phỏng quá trình làm việc của hệ thống khi có ngoại lực tác động

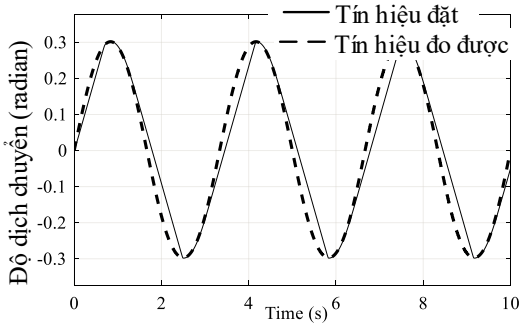
Một thực tế trong quá trình vận hành hệ thống ổn định theo phương ngang là hệ thống chịu ảnh hưởng của tần số dao động của thân tàu từ 0,1-0,3Hz. Hình 8 mô phỏng chuyển động của sàn cân bằng khi chịu tác động của quá trình dao động riêng của thân tàu.



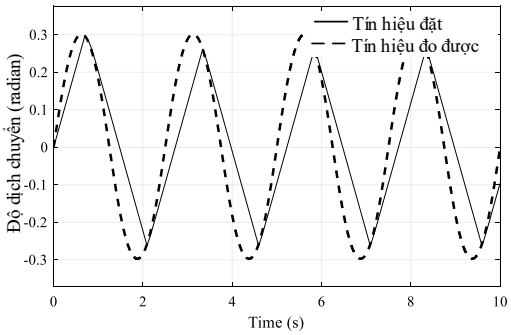
a) Góc dịch chuyển sàn công tác khi thân tàu dao động $\theta = 30\sin(0.2\pi t)$ (f = 0,1Hz)



b) Góc dịch chuyển sàn công tác khi thân tàu dao động $\theta = 30\sin(0.5\pi t)$ (f = 0,25Hz)



c) Góc dịch chuyển sàn công tác khi thân tàu dao động $\theta = 30\sin(0.6\pi t)$ (f = 0,3Hz)



d) Góc dịch chuyển sàn công tác khi thân tàu dao động $\theta = 30\sin(0.8\pi t)$ (f = 0,4Hz)

Hình 8. Mô phỏng quá trình làm việc khi tính tới dao động thân tàu

Kết quả mô phỏng hình 8 cho thấy khi tần số giao động thân tàu càng lớn thì khả năng bám theo tín hiệu đầu vào càng giảm, sai số càng lớn. Điều này là do ảnh hưởng của tính phi tuyến (hàm dấu trong hệ phương trình (6) của hệ thống. Để khắc phục vấn đề này, cần hướng đến việc xây dựng bộ điều khiển phi tuyến cho servo thủy lực với mục tiêu đạt được sai số nhỏ giữa tín hiệu đặt và đầu ra, đảm bảo sàn công tác radar ổn định trên mặt phẳng ngang.

4. Kết luận

Trong bài báo đưa ra phương án xây dựng hệ thống ổn định phương ngang cho sàn công tác. Để ổn định sàn công tác sử dụng hai động cơ servo thủy lực tạo ra các góc quay ngược với góc quay so với phương ngang của tàu. Để đánh giá phương án đưa ra trong nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng và thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy ảnh hưởng đặc điểm phi tuyến cuả động cơ servo thủy lực ảnh hưởng rất lớn đến độ chính xác của hệ thống ổn định.

Tài liệu tham khảo

1. Yu, Hong, Zheng-jin Feng, and Xu-yong Wang. "Nonlinear control for a class of hydraulic servo system." Journal of Zhejiang University-Science A 5 (2004): 1413-1417.

2 V. E. Kuznetsov; Nguyen Dinh Khanh; A. N. Lukichev “System for Synchronizing Forces of Dissimilar Flight Control Actuators with a Common Controller” *2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*

3. N. D. Khanh and N. N. Hung, "Synthesis of an Adaptive Controller for Movement

Synchronization in a Multi-channel Steering System," 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 99-102, doi: 10.1109/SCM62608.2024.10554163.

4. Jiang, Z.P., Hill, D.J., 1999. “A robust adaptive backstepping scheme for nonlinear systems with unmodeled dynamics”. IEEE Trans. On Automatic Controller, 44(9): 1705-1711.
5. https://servosandsimulation.com/motion-base-platforms-and-control-loader-products/two-axis-2dof-motion-base-platform-systems/
6. https://www.oceansciencetechnology.com/company/stable-as/
7. https://www.stableonboard.com/productivity/
8. K. Liu, J.M. Fitzgerald, F.L. Lewis “Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator” IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 40, Issue: 2, April 1993), Page(s): 282 – 293.
9. https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/35

Research on the design of a control system for the work platform of radar stations on naval ships.

Abstract: ***The paper presents research on developing a control system for the work platform of naval radar stations to ensure radar stability during ship movements at sea with complex motions. The study focuses on maintaining radar accuracy and efficiency in target detection and tracking. It analyzes the dynamic model characteristics of the work platform and proposes a control solution using signals from onboard sensors. Advanced control algorithms are applied to optimize the platform's response to real-world operational conditions. Simulation results demonstrate the proposed control system's capability to stabilize the platform horizontally, enhancing the naval ship's combat effectiveness in operational missions.***

Keywords: Stabilized platform; PID control; Horizontal stability;…

Phương án xây dựng giá thử con quay đầu tự dẫn tên lửa phòng không tầm thấp dựa trên công nghệ mới

Phạm Văn Dương[1*], Hoàng Mạnh Tưởng[1]

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự

**Email: hvktqspvd95@gmail.com.vn, Tel:0336787789*

Tóm tắt

Nội dung bài báo nghiên cứu phương án xây dựng giá thử cho con quay đầu tự dẫn trong tên lửa phòng không tầm thấp. Trong đó xây dựng mô hình thuật toán đánh giá các tham số con quay đầu tự dẫn như độ trôi, hệ số tỷ lệ trên giá thử. Quá trình đánh giá các tham số này được thực hiện một cách tự động nhờ vào việc tạo giả chuyển động của giá thử. Kết quả các tham số được đánh giá có thể sử dụng để hiệu chỉnh nhằm nâng cao độ chính xác của đầu tự dẫn. Quá trình thực hiện thử nghiệm đánh giá các tham số trên được mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink.

Từ khoá: *đầu tự dẫn, con quay, giá thử…*

1. Đặt vấn đề

Đầu tự dẫn, với vai trò quan trọng trong việc bắt và bám mục tiêu, đòi hỏi phải được kiểm tra và đánh giá kỹ lưỡng trước khi đưa vào sử dụng. Trong trường hợp đầu tự dẫn một con quay, trục rô to con quay sẽ ổn định phương trong không gian khi không có tác động của mô men ngoại lực. Để xác định được thông tin về đường ngắm tên lửa mục tiêu trục rô to con quay cần được điều khiển sao cho nó luôn hướng về tâm mục tiêu. Việc này thực hiện được nhờ tác động các mô men ngoại lực lên rô to con quay. Các mô men này sẽ làm cho con quay tiến động với tốc độ tỷ lệ với độ lớn mô men ngoại lực và tỷ lệ nghịch với mô men động lượng. Mô men điều khiển được hình thành dựa vào tín hiệu điều khiển tỷ lệ với độ lệch của trục rô to con quay với hướng đường ngắm tới mục tiêu. Đặc điểm hệ số tỷ lệ con quay đầu tự dẫn và độ trôi của con quay khi tín hiệu điều khiển bằng không là các đặc trưng quan trọng ảnh hưởng đến độ chính xác của đầu tự dẫn [1, 3].

Để kiểm tra, hiệu chỉnh đầu tự dẫn trong quá trình thiết kế, chế tạo và kiểm tra sửa chữa đầu tự dẫn trên tên lửa cần xác định các tham số hệ số tỷ lệ của mô men điều khiển với tốc độ quay của rô to con quay cũng như độ trôi không cần sử dụng giá thử chuyên dụng. Để xác định các tham số hệ số tỷ lệ trên cần tạo ra các mô men ngoại lực tác động lên rô to con quay và đo đạc các tham số tốc độ góc. Trong các thiết bị kiểm tra thế hệ cũ việc tạo ra mô men ngoại lực được thực hiện bằng cách treo quả nặng lên trục rô to con quay ở các khoảng cách xác định. Dưới tác dụng của trọng lực tác động lên các quả nặng sẽ tạo ra mô men ngoại lực tác động lên rô to. Tín hiệu tốc độ góc đầu ra đo được sử dụng cho việc xác định các hệ số tỷ lệ của con quay [2]. Nhược điểm của phương án giá thử nghiệm này là cần các điểm gá vật nặng trên rô to và quá trình thực hiện thủ công. Đặc điểm này sẽ dẫn đến giảm độ tin cậy của quá trình đo, kiểm tra.

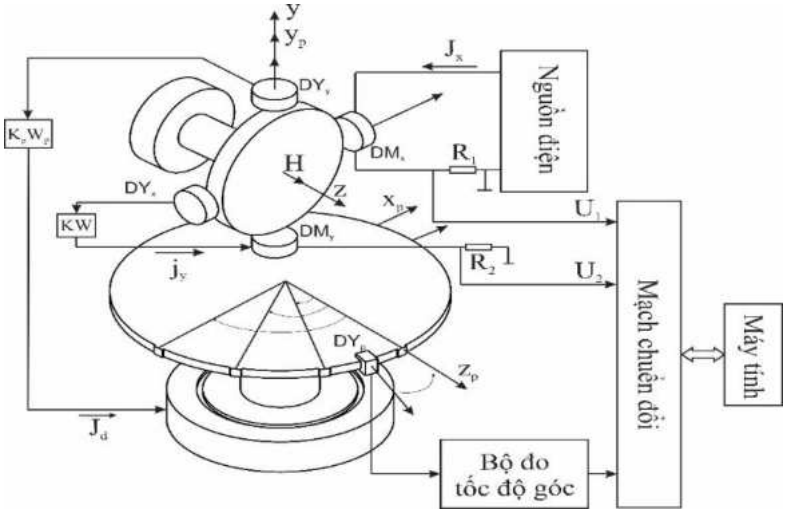
Việc sử dụng các bộ phát mô men có sẵn trên đầu tự dẫn để tạo ra các mô men điều khiển trong quá trình thử nghiệm, kiểm tra đầu tự dẫn cho phép thực hiện đánh giá các tham số của đầu tự dẫn thuận tiện và chính xác. Tín hiệu chuẩn được đưa vào bộ phát mô men sẽ sinh ra mô men ngoại lực tác động lên rô to con quay đầu tự dẫn. Dưới tác động của mô men này rô to con quay sẽ tiến động với tốc độ quay tỷ lệ với mô men ngoại lực sinh ra từ bộ phát mô men. Tín hiệu nhận

được từ cảm biến góc chuyển động của con quay được xử lý đánh giá để xác định các đặc điểm chuyển động của đầu tự dẫn cũng như hệ số tỷ lệ. Việc sử dụng phương án này cho phép tự động hóa quá trình kiểm tra đánh giá con quay trên đầu tự dẫn. Từ đó có thể tăng độ chính xác cũng như mở rộng được các tham số có thể kiểm tra. Với sự phát triển của các công nghệ mới, đặc biệt là công nghệ mô phỏng và tự động hóa, việc thiết kế một giá thử con quay đầu tự dẫn có khả năng đánh giá chính xác các tham số đã mở ra hướng đi đầy triển vọng. Đây không chỉ là yêu cầu kỹ thuật mà còn là giải pháp giúp nâng cao độ tin cậy và chất lượng cho các hệ thống đầu tự dẫn.

Bài báo tập trung vào nghiên cứu và đề xuất một phương án xây dựng giá thử cho con quay đầu tự dẫn trong tên lửa phòng không tầm thấp với thuật toán hiệu chỉnh tự động.

2. Phương án xây dựng giá thử con quay đầu tự dẫn tên lửa phòng không tầm thấp

Để xác định các tham số của con quay đầu tự dẫn có độ chính xác cao, sử dụng giá quay một trục mà hoạt động của nó dựa trên nguyên lý hoạt động của bộ ổn định con quay một trục. Giá quay quay quanh một trục quay của nó được đặt theo chiều thẳng đứng tại vị trí thử nghiệm. Đầu tự dẫn được lắp đặt trên giá quay sao cho trục của con quay đầu tự dẫn vuông góc với trục giá quay.



Hình 1. Sơ đồ động học giá kiểm tra con quay đầu tự dẫn

Trong Hình 1 là sơ đồ động học chức năng của hệ thống tích hợp con quay đầu tự dẫn - giá quay. Cấu trúc của hệ thống này gồm: Đầu tự dẫn được lắp trên giá quay với các hệ tọa độ $Oxyz$, $x_p y_p z_p$, $\xi\eta\zeta$ tương ứng với hệ tọa độ gắn với thân con quay đầu tự dẫn, giá quay và hệ tọa độ địa lý; α, β, γ là góc lệch của rô to con quay đầu tự dẫn xung quanh trục x, y so với vỏ của đầu tự dẫn và góc quay của giá quay; ω_d, ω_n là thành phần vận tốc góc quay theo chiều dọc và ngang của Trái Đất; ω_i vận tốc góc quay của bàn quay; KW và K_pW_p là các hàm truyền của mạch phản hồi con quay đầu tự dẫn và giá quay; J_d, J_x, j_y tương ứng với dòng điện trong động cơ của hệ thống bám, dòng điện điều khiển trong bộ phát mô men DM_x và dòng điện phản hồi trong bộ

phát mô men DM_y của con quay đầu tự dẫn; DY_x, DY_y các cảm biến góc của con quay đầu tự dẫn theo các trục *x* và *y* ; DY_p cảm biến góc quay của bàn quay.

Trong quá trình hiệu chuẩn, con quay đầu tự dẫn lần lượt được lắp vào vị trí 1 (trục y - trục quay của giá) và sau đó vào vị trí 2 (trục x - trục quay của giá). Trong mỗi vị trí này, tín hiệu từ các cảm biến góc DY_y (đối với vị trí 1) hoặc DY_x (đối với vị trí 2) được truyền qua bộ phát hiện pha và bộ khuếch đại công suất đến cuộn dây của động cơ giảm tải, điều khiển bệ quay theo hướng giảm góc lệch giữa rô to và bệ xung quanh trục ổn định. Dòng điện điều khiển ổn định cao từ nguồn cung cấp bên ngoài được đưa vào bộ phát mô men của kênh x (đối với vị trí 1) hoặc kênh y (đối với vị trí 2), tạo ra sự tiến động của rô to con quay và do đó khiến bệ quay lần lượt theo hướng ngược chiều kim đồng hồ và ngược lại.

Sơ đồ này mô tả sự liên kết giữa các thành phần điện tử và cơ khí của hệ thống con quay đầu tự dẫn - giá quay trong quá trình đo và hiệu chuẩn.

Sử dụng các phương trình Euler cho con quay đầu tự dẫn và giá quay ta xây dựng được các phương trình chuyển động của hệ thống tích hợp con quay đầu tự dẫn - giá quay [4-6]:

$$\begin{aligned} &A(\ddot{\alpha}+\dot{\omega}_x)+H(\dot{\beta}+\omega_y) = M_x + M_{Mx} \\ &A(\ddot{\beta}+\dot{\omega}_y)-H(\dot{\alpha}+\omega_x) = M_y + M_{My} \\ &C_p\dot{\omega}_i + D_p\omega_i = M_p + M_c \end{aligned} \qquad (1)$$

Trong đó: A, H là mô men quán tính xích đạo và mô men động học của rô to con quay; ω_x, ω_y các thành phần của tốc độ góc tuyệt đối của chuyển động của rô to con quay trong hệ tọa độ Oxyz; M_x, M_y các mô men nhiễu tác dụng lên rô to con quay; M_{Mx}, M_{My} các mô men đóng vai trò điều khiển là các mô men do các dòng điện j_x, j_y trong cuộn dây của các bộ phát mô men gây ra; C_p là mô men quán tính của hệ xung quanh trục quay; D_p là hệ số giảm chấn của giá quay xung quanh trục quay của nó; M_p, M_c là mô men phản hồi của bệ thử và mô men cản trở sự quay. Hai phương trình đầu tiên của hệ thống (1) là các phương trình chuyển động của rô to con quay hồi chuyển, và phương trình thứ ba là phương trình chuyển động của giá quay xung quanh trục quay của nó.

Tốc độ góc của bệ quay ω_i được xác định bằng cảm biến góc xung DY_p, tín hiệu từ cảm biến này được sử dụng để kích hoạt đồng hồ điện tử, xác định chính xác thời gian của mỗi vòng quay của bệ $t(\gamma = 360^\circ)$ hoặc quay đến các góc cố định $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, tốc độ góc được xác định dựa trên kết quả đo lường:

$$\omega = \frac{\gamma}{t} \qquad (2)$$

Mô men gây ra bởi dòng điện j_x và j_y trong các cuộn dây của bộ phát mô men có dạng sau:

$$M_{Mx} = K_x j_x + K_{xy} j_y$$
$$M_{My} = K_{yx} j_x + K_y j_y \quad (3)$$

Các dòng điện phản hồi chảy qua các cuộn dây của các bộ phát mô men của các kênh con quay và các mô men phản hồi của giá quay được hình thành như sau:

Đối với vị trí 1: $j_y(s) = K_{dy} K_{yc} \mathrm{W}(s) \alpha(s); M_p(s) = K_p \mathrm{W}_p(s) \beta(s)$ (4)

Đối với vị trí 2: $j_x(s) = -K_{dy} K_{yc} \mathrm{W}(s) \beta(s); M_p(s) = K_p \mathrm{W}_p(s) \alpha(s)$ (5)

Trong đó, K_{dy} - Độ dốc đặc trưng cảm biến thay đổi góc con quay; $K_{yc}\mathrm{W}(s)$ và $K_p \mathrm{W}_p(s)$ - hàm truyền phản hồi của con quay đầu tự dẫn và giá quay. K_x, K_y và K_{xy}, K_{yx} - các hệ số tỷ lệ chính và chéo, do độ không chính xác kỹ thuật khi thiết lập vị trí góc, là các hệ số tỷ lệ của bộ phát mô men của con quay đầu tự dẫn.

Xét đến tỉ lệ (3), các yếu tố của phương trình chuyển động của hệ thống tích hợp con quay đầu tự dẫn - giá quay (1) có dạng:

Đối với vị trí 1 (i=1,2):

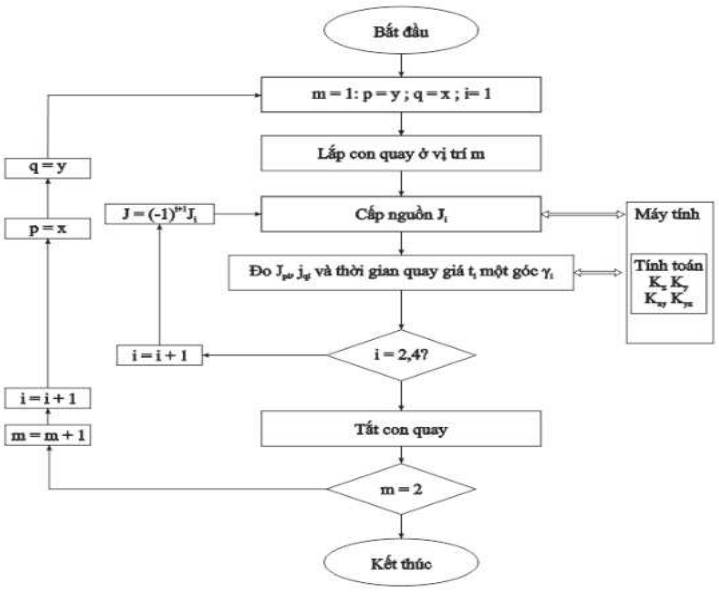
$$\omega_{yi} = \omega_i + \omega_d, \omega_{xi} = -\omega_n \sin \omega_i t, M_{xi} = H(\omega_{y0} + \omega_g),$$
$$M_{yi} = -H(\omega_{x0} - \omega_k), M_{Mxi} = K'_x J_{xi} + K'_{xy} j_{yi}, M_{Myi} = K'_y j_{yi} + K'_{yx} J_{xi} \quad (6)$$

Đối với vị trí 2 (i=3,4):

$$\omega_{xi} = \omega_i + \omega_n, \omega_{yi} = \omega_n \sin \omega_i t, M_{xi} = H(\omega_{y0} + \omega_k),$$
$$M_{yi} = -H(\omega_{x0} + \omega_g), M_{Mxi} = K'_x j_{xi} + K'_{xy} J_{yi}, M_{Myi} = K'_y J_{yi} + K'_{yx} j_{xi} \quad (7)$$

Trong đó ω_{x0} và ω_{y0} là các thành phần không đổi của độ trôi của con quay đầu tự dẫn. ω_g, ω_k là các hệ số của mô hình toán học về sai số con quay, liên quan đến độ lệch trục của trọng tâm rô to và các mô men vuông.

Trong Hình 2 mô tả thuật toán hiệu chỉnh con quay trong chế độ tự động.



Hình 2. Thuật toán hiệu chỉnh trên giá quay một trục

Ở vị trí ban đầu, thân của giá quay được đặt sao cho hệ tọa độ $\xi\eta\zeta$ với trục ξ được định hướng về phía bắc. Sau đó, quá trình hiệu chỉnh được thực hiện theo thuật toán được trình bày trong Hình 2.

Đối với chuyển động ổn định, xét đến các tỉ lệ (6), (7) và các phương trình trong hệ phương trình (1) ta có:

Đối với vị trí 1 (i = 1,2):

$$\begin{aligned}(K'_x J_{xi} + K'_{xy} j_{yi}) + (\omega_{y0} + \omega_g) &= (\omega_i + \omega_d)\\ (K'_{yx} J_{xi} + K'_y j_{yi}) + (-\omega_{x0} + \omega_k) &= \omega_n \sin\omega_i t\end{aligned} \tag{8}$$

Đối với vị trí 2 (i = 3,4):

$$\begin{aligned}(K'_x j_{xi} + K'_{xy} J_{yi}) + (\omega_{y0} + \omega_g) &= \omega_n \sin\omega_i t\\ (K'_{yx} j_{xi} + K'_y J_{yi}) - (\omega_{x0} + \omega_k) &= -(\omega_i + \omega_d)\end{aligned} \tag{9}$$

Với $K'_x = \dfrac{K_x}{H}; K'_{xy} = \dfrac{K_{xy}}{H}; K'_y = \dfrac{K_y}{H}; K'_{yx} = \dfrac{K_{yx}}{H}$

Trong các hệ phương trình (8) và (9), các đại lượng đo được bao gồm dòng điện phản hồi j_{xi} và j_{yi} trong các bộ phát mô men, cũng như tốc độ góc của giá đỡ ω_i, mà như ta thấy từ các tỉ lệ này, ngoài thành phần cố định còn có thành phần điều hòa, gây ra bởi phép chiếu ngang của chuyển động quay tự nhiên của Trái Đất.

Để xác định các hệ số tỷ lệ, cần phải trung bình các giá trị đo được trong một khoảng thời gian t nhất định cho mỗi trong số 4 thử nghiệm, sau khi loại bỏ các thành phần cố định của độ trôi con quay đầu tự dẫn cho các vị trí 1 và 2 ta sẽ có hệ phương trình để xác định các hệ số tỷ lệ.

Với vị trí 1:

$$\begin{aligned} &K_x^{'}(J_{x1}-J_{x2})+K_{xy}^{'}(\overline{j_{y1}}-\overline{j_{y2}})=\omega_1-\omega_2 \\ &K_{yx}^{'}(J_{y1}-J_{y2})+K_y^{'}(\overline{j_{y1}}-\overline{J_{y2}})=\omega_n(\sin\gamma_1-\sin\gamma_2) \end{aligned} \tag{10}$$

Với vị trí 2:

$$\begin{aligned} &K_x^{'}(\overline{j_{x3}}-\overline{j_{x4}})+K_{xy}^{'}(J_{y3}-J_{y4})=\omega_n(\sin\gamma_3-\sin\gamma_4) \\ &K_{yx}^{'}(\overline{j_{x3}}-\overline{j_{x4}})+K_y^{'}(J_{y3}-J_{y4})=\omega_4-\omega_3 \end{aligned} \tag{11}$$

Bằng cách giải các hệ phương trình (10), (11) đối với các hệ số tỷ lệ, ta nhận được:

$$\begin{aligned} &K_x^{'}=\frac{\omega_{12}\Delta J_{34}}{D}-\frac{\Delta\overline{j_{12}}}{D}\omega_n(\sin\gamma_3-\sin\gamma_4);K_{xy}^{'}=-\frac{\Delta\overline{j_{34}}}{\Delta J_{34}}K_x^{'}+\frac{1}{\Delta J_{34}}\omega_n(\sin\gamma_3-\sin\gamma_4) \\ &K_y^{'}=-\frac{\omega_{34}\Delta J_{34}}{D}-\frac{\Delta\overline{j_{34}}}{D}\omega_n(\sin\gamma_1-\sin\gamma_2);K_{yx}^{'}=-\frac{\Delta\overline{j_{12}}}{\Delta J_{12}}K_y^{'}+\frac{1}{\Delta J_{12}}\omega_n(\sin\gamma_1-\sin\gamma_2) \end{aligned} \tag{12}$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} &\Delta J_{12}=J_{x1}-J_{x2};\Delta J_{34}=J_{y3}-J_{y4};\Delta\overline{j_{12}}=\overline{j_{y1}}-\overline{j_{y2}};\Delta\overline{j_{34}}=\overline{j_{x3}}-\overline{j_{x4}}; \\ &\omega_{12}=\omega_1-\omega_2;\omega_{34}=\omega_3-\omega_4;D=\Delta J_{12}\Delta J_{34}-\Delta\overline{j_{12}}\Delta\overline{j_{34}} \end{aligned} \tag{13}$$

3. Mô phỏng hoạt động của giá thử con quay đầu tự dẫn

Theo các phương trình (1), ta xây dựng sơ đồ cấu trúc của hệ thống con quay - giá quay cho vị trí 1 trong môi trường Simulink (MATLAB), trong đó các mô đun chính của hệ thống này gồm: con quay với vòng phản hồi theo kênh x; ổn định con quay với vòng điều chỉnh ổn định theo trục y của con quay; nguồn điện một chiều cung cấp dòng điện không đổi J_x cho bộ phát mô men DM_x của con quay. Để loại trừ góc lệch của rô to con quay xung quanh trục x, y so với vỏ của đầu tự dẫn ta xây dựng các hàm truyền $\mathrm{W}(s)$ và $\mathrm{W}_p(s)$ điều khiển hoạt động của hệ thống qua các vòng phản hồi với các tham số được tối ưu hóa:

$$K_{yc}^{p}\mathrm{W}_p(s)=K_{yc}^{p}\frac{(T_{c1}s+1)(T_{c2}s+1)}{T_{c1}s(T_{c3}s+1)};K_{yc}\mathrm{W}(s)=K_{yc}\frac{T_1s+1}{T_1s(T_2s+1)^2} \tag{14}$$

Trong quá trình mô phỏng, đã sử dụng các dữ liệu đầu vào sau:

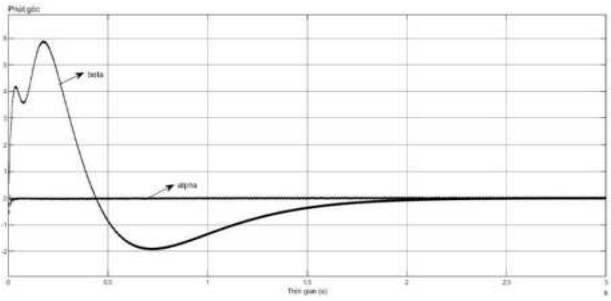
$A=5.10^{-7}H.m.s^2, H=1,4.10^{-3}H.m.s, K_{dy}=6V/rad, C_p=0,04H.m.s^2, D_p=0,01H.m.s, M_c=0.01;$

$K_{yc}=12A/V, K_x=1,4.10^{-2}N.m/A, K_{xy}=1,3.10^{-3}N.m/A, M_x=M_y=0.0001, K_y=1,7.10^{-2}N.m/A,$

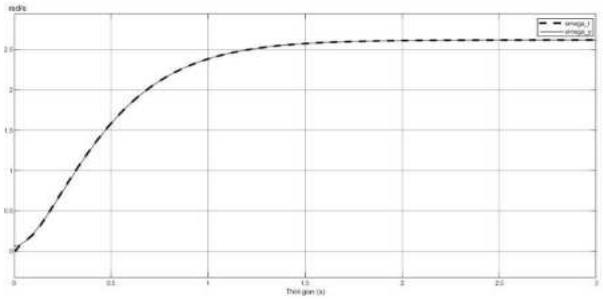
$K_{yx}=1,6.10^{-3}N.m/A, T_1=0.015s, T_2=0.001s; K_{yc}^{p}=4A/V, K_{dc}=1N.m/A, T_{c1}=T_{c2}=0,08s, T_{c3}=0,008s$

Trong Hình 3 trình bày kết quả mô phỏng chuyển động của roto con quay và giá quay ở vị trí 1 khi cấp dòng điện ổn định $J_x=0.2575A$. Có thể thấy rằng sau 2.5 giây kể từ khi cung cấp dòng điều khiển, quá trình quá độ được thiết lập, các góc lệch của rô to con quay đầu tự dẫn xung

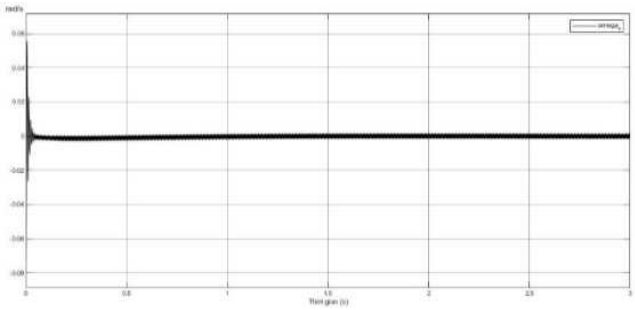
quanh trục x, y so với vỏ bằng 0. Ngoài ra, từ các đồ thị có thể thấy rằng giá trị ổn định của tốc độ góc của rô to con quay ω_x gần như bằng không, vì các giá trị tương ứng với độ trôi riêng của con quay cũng như các thành phần ngang và dọc của chuyển động quay của Trái đất là rất nhỏ so với tốc độ góc được đặt của giá quay. Tốc độ góc của giá quay ω_i cũng gần như bằng tốc độ góc tiến động của rô to con quay ω_y theo trục thẳng đứng.



a) Các góc lệch của rô to con quay đầu tự dẫn xung quanh trục x, y



b) Tốc độ góc của giá quay và tốc độ góc tiến động ω_y của rô to theo trục y



c) Tốc độ góc tiến động ω_x của rô to theo trục x

Hình 3. Các quá trình chuyển tiếp ở vị trí 1.

Để đánh giá các hệ số tỷ lệ con quay đầu tự dẫn, 4 loạt thử nghiệm đã được thực hiện ở các dòng điện điều khiển: (0.2575, 0.2, 0.1, 0.05) A. Bảng 1 trình bày kết quả các loạt thử nghiệm, bảng 2 trình bày kết quả hiệu chuẩn các hệ số tỷ lệ.

Bảng 1. Kết quả thử nghiệm

Loạt 1	**Vị trí 1**	J_{x1}	j_{y1}	ω_1	J_{x2}	j_{y2}	ω_2	ΔJ_{12}	$\Delta\overline{j_{12}}$	ω_{12}
		0.2575	-0.02998	2.618	-0.2575	0.01835	-2.486	0.515	-0.04833	5.104
	Vị trí 2	J_{y3}	j_{x3}	ω_3	J_{y4}	j_{x4}	ω_4	ΔJ_{34}	$\Delta\overline{j_{34}}$	ω_{34}
		0.2575	-0.03125	-3.091	-0.2575	0.01669	3.107	0.515	-0.04794	-6.198
Loạt 2	**Vị trí 1**	J_{x1}	j_{y1}	ω_1	J_{x2}	j_{y2}	ω_2	ΔJ_{12}	$\Delta\overline{j_{12}}$	ω_{12}
		0.2	-0.0247	2.048	-0.2	0.01286	-1.916	0.4	-0.03756	3.964
	Vị trí 2	J_{y3}	j_{x3}	ω_3	J_{y4}	j_{x4}	ω_4	ΔJ_{34}	$\Delta\overline{j_{34}}$	ω_{34}
		0.2	-0.02558	-2.399	-0.2	0.0114	2.415	0.4	-0.03698	-4.814
Loạt	**Vị**	J_{x1}	j_{y1}	ω_1	J_{x2}	j_{y2}	ω_2	ΔJ_{12}	$\Delta\overline{j_{12}}$	ω_{12}

3	**trí 1**	0.1	-0.01533	1.057	-0.1	0.003562	-0.9252	0.2	-0.018892	1.9822
	Vị trí 2	J_{y3}	j_{x3}	ω_3	J_{y4}	j_{x4}	ω_4	ΔJ_{34}	$\Delta\overline{j_{34}}$	ω_{34}
		0.1	-0.01631	-1.196	-0.1	0.002238	1.212	0.2	-0.018548	-2.408
Loạt 4	**Vị trí 1**	J_{x1}	j_{y1}	ω_1	J_{x2}	j_{y2}	ω_2	ΔJ_{12}	$\Delta\overline{j_{12}}$	ω_{12}
		0.05	-0.01063	0.5615	-0.05	-0.001233	-0.4297	0.1	-0.009397	0.9912
	Vị trí 2	J_{y3}	j_{x3}	ω_3	J_{y4}	j_{x4}	ω_4	ΔJ_{34}	$\Delta\overline{j_{34}}$	ω_{34}
		0.05	-0.01169	-0.5937	-0.05	-0.002409	0.6098	0.1	-0.009281	-1.2035

Bảng 2. Kết quả hiệu chuẩn hệ số tỷ lệ

Loạt	**Kết quả hiệu chuẩn**							
	K_x	$\%\Delta K_x$	K_{xy}	$\%\Delta K_{xy}$	K_y	$\%\Delta K_y$	$\%K_{yx}$	$\%\Delta K_{yx}$
1	0.013997228	-0.0003	0.001302965	-0.0005	0.016997417	-0.0002	0.001595117	-0.0001
2	0.013995496	0.0003	0.001293884	-0.0006	0.016996548	-0.0002	0.001595976	-8E-05
3	0.013998026	-0.0003	0.001298177	-0.0003	0.017004967	0.0005	0.001606289	-0.0003
4	0.013998889	-0.0005	0.001299237	-0.0004	0.016997239	0.00063	0.001597231	-0.0003

Từ dữ liệu ở Bảng 2, ta thấy sai số thu được giữa các hệ số hiệu chỉnh là rất nhỏ, đặc biệt so với giá trị gốc ban đầu của thiết bị. Điều này thể hiện sự ổn định và độ chính xác cao trong mô hình hiệu chuẩn đã được xây dựng.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương án xây dựng giá thử con quay đầu tự dẫn cho tên lửa phòng không tầm thấp. Giá quay một trục trong phương án được xây dựng theo sơ đồ hệ thống ổn định một trục. Quá trình điều khiển giá quay, chế độ kiểm tra đánh giá các tham số được thực hiện nhờ máy tính thực hiện theo các thuật toán đưa ra. Dựa vào giá thử đưa ra cho phép đánh giá được các hệ số tỷ lệ con quay đầu tự dẫn, độ trôi của con quay đầu tự dẫn với độ chính xác cao và quá trình thử được thực hiện một cách tự động. Mô phỏng hoạt động của giá thử con quay đầu tự dẫn được thực hiện trên phần mềm Matlab Simulink.

Tài liệu tham khảo

1. Lê Anh Dũng, Nguyễn Hữu Độ, Nguyễn Xuân Căn, Huỳnh Lương Nghĩa (1999), *Giáo trình lý thuyết bay và hệ thống điều khiển tên lửa phòng không*, Học viện Kỹ thuật quân sự.
2. Vũ Văn Thung (2012), *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu và động lực đến độ chính xác con quay 3 bậc tự do khung các đăng trong của đầu tự dẫn hồng ngoại tên lửa*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.
3. Криксунов Л.З., Усольцев И.Ф. (1963). *Инфракрасные устройства самонаведения управляемых снарядов: учебное пособие*. Москва: Советское радио, 240 с.
4. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. (1968). *Динамический синтез систем гироскопической стабилизации*. Ленинград: Судостроитель, 348 с.

5. Матвеев В.А., Подчезерцев В.П., Фатеев В.В. (2005). *Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах*. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 103 с.
6. Колоссов Ю.А., Ляховецкий Ю.Г., Рахтеенко Е.Р. (1977). *Гироскопические системы: Проектирование гироскопических систем*. В 2 ч. Ч. 2. Москва: Высшая школа, 223 с.

Approach to Constructing a Test Rig for the Seeker Gyroscope of Short-Range Surface-to-Air Missiles Based on New Technology

Abstract: *The content of the article studies the approach to constructing a test rig for the seeker gyroscope in short-range surface-to-air missiles. It involves developing an algorithmic model to evaluate gyroscope parameters such as drift and scale factor on the test rig. The parameter evaluation process is conducted automatically by simulating the motion of the test rig. The evaluated parameters can be used for calibration to enhance the accuracy of the seeker. The testing and evaluation process for these parameters is simulated using MATLAB Simulink software.*

Keywords: Seeker head, Gyroscope, Test rig...

Nghiên cứu nâng cao chất lượng bộ điều khiển độ sâu ngư lôi trên cơ sở ứng dụng phương pháp điều khiển PID kết hợp GA

Cao Song Hào[1], Bùi Văn Tiến[1], Phạm Văn Tuấn[2]
[1]*Viện Tên lửa & KTĐK; Học viện Kỹ thuật quân sự;*
[2]*Khoa Vũ khí dưới nước; Học viện Hải quân*
Email: caosonghaohvhq@gmail.com; Tel: 0345011094

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp cải tiến hệ thống điều khiển độ sâu của ngư lôi bằng phương pháp sử dụng bộ điều khiển PID kết hợp với thuật toán di truyền. Dựa vào kết quả xây dựng mô hình động lực học trong mặt phẳng đứng và nguyên tắc điều khiển độ sâu ngư lôi, bài báo tổng hợp bộ điều khiển PID, đồng thời sử dụng GA để tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển PID nhằm cải thiện chất lượng điều khiển theo độ sâu của ngư lôi. Kết quả mô phỏng cho thấy sự khác biệt rõ rệt về chất lượng của hệ thống điều khiển theo độ sâu khi sử dụng và khi không sử dụng bộ điều khiển PID. Ngoài ra, so sánh hiệu quả điều khiển theo độ sâu giữa phương pháp tối ưu hóa tham số PID bằng GA với phương pháp tối ưu hóa khác. Kết quả cho thấy sử dụng bộ điều khiển PID kết hợp GA không chỉ cải thiện độ chính xác, mà còn nâng cao tính ổn định của hệ thống điều khiển so với các phương pháp PID truyền thống.

Từ khóa: *Điều khiển độ sâu ngư lôi; bộ điều khiển PID; thuật toán di truyền; tối ưu hoá*

1. Đặt vấn đề

Máy điều khiển độ sâu ngư lôi dùng để điều khiển chuyển động ngư lôi trong mặt phẳng đứng theo chương trình đặt trước và theo các lệnh của hệ thống tự dẫn. Máy điều khiển do Liên Xô chế tạo đã ra đời từ lâu có tốc độ đáp ứng chậm, sai số đo góc nghiêng và độ sâu lớn, độ tin cậy của hệ thống không cao, vì vậy quá trình điều khiển tìm kiếm và tiêu diệt mục tiêu độ chính xác thấp. Các công trình nghiên cứu sau này đã ứng dụng bộ điều khiển PID nhờ tính đơn giản và hiệu quả, nhưng phương pháp PID truyền thống gặp hạn chế trong việc tối ưu hóa tham số để đáp ứng yêu cầu về độ chính xác và độ ổn định cao.

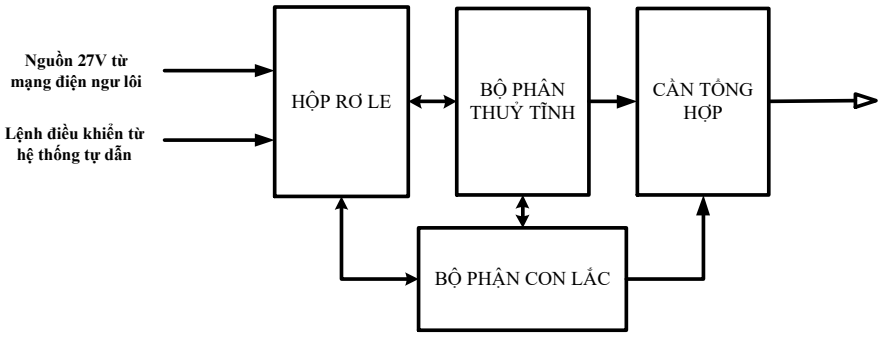
Để khắc phục những hạn chế này, thuật toán di truyền (GA) được đề xuất như một phương pháp tối ưu hóa hiệu quả. GA mô phỏng quá trình tiến hóa sinh học, giúp tìm ra bộ tham số PID tối ưu để cải thiện chất lượng điều khiển. Nghiên cứu này tập trung vào thiết kế và tối ưu hóa bộ điều khiển PID sử dụng GA cho hệ thống điều khiển độ sâu ngư lôi, đồng thời so sánh hiệu quả với các phương pháp truyền thống như Ziegler-Nichols. Kết quả hứa hẹn nâng cao độ chính xác, độ ổn định và khả năng đáp ứng nhanh của hệ thống điều khiển trong thực tiễn.

2. Nội dung

2.1. Mô hình động lực học của ngư lôi trong mặt phẳng thẳng đứng

Máy điều khiển độ sâu ngư lôi [1] do Liên Xô chế tạo được mô tả theo sơ đồ khối chức năng: Bộ phận thủy tĩnh chứa phần tử cảm biến áp suất được cấu tạo từ hộp xếp để đo độ sâu hành trình của ngư lôi. Bộ phận con lắc chứa phần tử cảm biến góc nghiêng được cấu tạo từ con lắc vật lý để đo góc nghiêng dọc. Hộp rơ le được sử dụng để liên kết các lệnh điều khiển từ hệ thống tự dẫn đến máy điều khiển độ sâu. Bộ phận thủy tĩnh và bộ phận con lắc liên kết

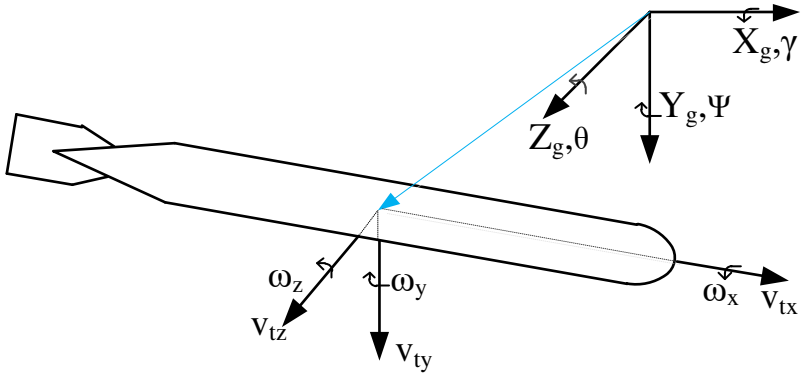
với nhau bằng thanh nối để điều khiển máy lái ngang, từ đó điều khiển ngư lôi đi lên hoặc đi xuống theo chương trình đặt trước, hoặc theo lệnh của hệ thống tự dẫn.



Hình 1. Sơ đồ khối máy điều khiển độ sâu ngư lôi

Cơ chế điều khiển kiểu con lắc dựa trên nguyên lý sử dụng moment hồi chuyển để duy trì góc chúc và ổn định độ sâu của ngư lôi. Con lắc được gắn trong hệ thống điều khiển hoạt động như một phần tử cân bằng, tạo ra lực phản hồi khi ngư lôi thay đổi trạng thái. Khi ngư lôi thay đổi góc chúc, moment hồi chuyển do con lắc tạo ra sẽ tác động để điều chỉnh lại hướng di chuyển, giúp đưa ngư lôi trở về trạng thái cân bằng mong muốn.

Để đơn giản hóa mô hình toán học, ta đưa ra các giả định sau: Ngư lôi chỉ chuyển động trong mặt phẳng thẳng đứng với tốc độ không đổi và tính nổi bằng không. Các thông số có giá trị gồm: góc lắc dọc (góc chúc) θ; tốc độ góc quay quanh trục z là ω_z, vận tốc tiến v_{tx}. Các thông số được coi bằng 0 gồm: góc lắc ngang γ; góc lắc xiên Ψ; vận tốc chìm v_{ty}; vận tốc dạt v_{tz}; tốc độ góc quay quanh trục y là ω_y; tốc độ góc quay quanh trục x là ω_x.



Hình 2. Hệ toạ độ trái đất và hệ toạ độ liên kết của ngư lôi

Trong trường hợp này, cấu trúc của các phương trình chuyển động dọc và ngang của ngư lôi là giống nhau, cho phép thiết lập sự thống nhất trong nguyên tắc điều khiển theo mặt phẳng thẳng đứng và ngang. Các phương trình này, khi được biểu diễn dưới dạng toán tử với điều kiện ban đầu bằng không, có dạng:

$$[\lambda_{26}s^2 - (A^{\omega}_{y_1} + \lambda_{22})v_t s - A_{y\Pi}v_t^2]\theta(s) + [m_0 s^2 + A_{y\Pi}v_t s]y(s) = A_p v_t^2 \delta_\Gamma(s) \quad (1)$$

$$[J_0 p^2 + (A^{\omega}_{mz1} - \lambda_{26})v_t s - A_{mz\Pi}v_t^2]\theta(s) + [\lambda_{26}s^2 + A_{mz\Pi}v_t s]\, y(s) = -A_p C_p v_t^2 \delta_\Gamma(s)$$

(2)

Với: $A_{y_1}^{\omega} = A_y^{\omega} + kC_B - m;\ A_{mz1}^{\omega} = A_{mz}^{\omega} + kC_B^2 + \lambda_{26}; m_0 = m + \lambda_{22};$

$A_{y\Pi} = A_x + A_y + A_p + k;\ A_{mz\Pi} = A_{mz} - kC_B - A_pC_p; J_0 = J + \lambda_{66};$

Các thông số ngư lôi: m là khối lượng; v_t là vận tốc; B là lượng giãn nước; J là mô men quán tính; C_p, C_B lần lượt là khoảng cách từ trọng tâm đến tâm lực thủy động của lái và tới mặt phẳng các chân vịt; δ_Γ là góc đánh lái ngang; k là hệ số chân vịt; $A_x, A_y\ A_p$ lần lượt là hệ số hỗn hợp của lực cản chính diện, lực nâng thân và lực nâng lái ngang; A_{mz} là hệ số hỗn hợp của mô men lắc dọc; A_y^{ω} Hệ số hỗn hợp của lực nâng đệm êm của thân và vây; A_{mz}^{ω} là hệ số hỗn hợp mô men đệm êm của lắc dọc; $\lambda_{22}, \lambda_{26}, \lambda_{66}$ là các hệ số khối lượng, mô men thêm mô tả ảnh hưởng của khối lượng nước chuyển động cùng ngư lôi.

Được xem như một hệ động lực tuyến tính, điều này cho phép sử dụng nguyên lý chồng chất khi xác định các hàm truyền của ngư lôi. Các biểu thức hàm truyền cuối cùng:

Hàm truyền liên hệ giữa góc đánh lái δ_Γ với góc chúc θ là:

$$W_T^{\delta_\Gamma \to \theta}(s) = \frac{a_0 s + a_1}{b_0 s^2 + b_1 s + b_2} \tag{3}$$

Với: $a_0 = -A_p v_t^2(\lambda_{26} + C_p m_0);\ a_1 = -A_p v_t^3(A_{mz\Pi} + A_{y\Pi} C_p);\ b_0 = \lambda_{26}^2 - m_0 J_0;$

$b_1 = [\lambda_{26}(A_{mz\Pi} - A_{y_1}^{\omega} - \lambda_{22}) - m_0(A_{mz1}^{\omega} - \lambda_{26}) - J_0 A_{y\Pi}]v_t;$

$b_2 = [A_{mz\Pi}(m - A_{y_1}^{\omega}) - A_{y\Pi} A_{mz1}^{\omega}]v_t^2;$

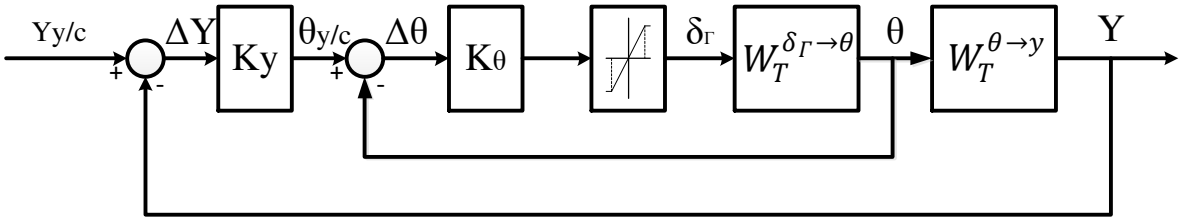
Hàm truyền liên hệ giữa góc chúc θ với độ sâu y là:

$$W_T^{\theta \to y}(s) = \frac{v_t}{s} \tag{4}$$

Hàm truyền liên hệ giữa góc đánh lái δ_Γ với độ sâu y là:

$$W_T^{\delta_\Gamma \to y}(s) = \frac{a_0 s + a_1}{b_0 s^2 + b_1 s + b_2} \cdot \frac{v_t}{s} \tag{5}$$

Qua phần cơ sở phía trên, vòng điều khiển độ sâu của ngư lôi được xây dựng sơ đồ gồm những thành phần sau: bộ điều khiển góc chúc; bộ điều khiển độ sâu và mô hình động học của ngư lôi trong mặt phẳng thẳng đứng, thể hiện như trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ vòng điều khiển độ sâu ngư lôi

Trong đó: $Y_{y/c:}$ độ sâu đặt cho ngư lôi; ΔY: sai lệch độ sâu đặt và độ sâu phản hồi; K_y: hệ số khuếch đại theo độ sâu; $\theta_{y/c}$: góc chúc theo yêu cầu; $\Delta\theta$: sai lệch góc chúc; K_θ: hệ số

khuếch đại theo góc chúc; δ_Γ: góc đánh lái ngang; $W_T^{\delta_\Gamma \to \theta}$: hàm truyền giữa góc chúc và góc đánh lái ngang; $W_T^{\theta \to y}$: hàm truyền giữa độ sâu của ngư lôi và góc chúc; θ: góc chúc thực tế; Y: độ sâu thực tế.

Do thực tế góc đánh lái ngang của ngư lôi là có hạn chế nên trên sơ đồ vòng điều khiển có khâu hạn chế góc đánh lái. Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển độ sâu của ngư lôi có 2 vòng phản hồi, gồm vòng phản hồi theo góc chúc và vòng phản hồi theo độ sâu. Bộ điều khiển độ sâu tạo ra góc chúc mong muốn $\theta_{y/c}$, trở thành đầu vào cho vòng điều khiển góc chúc. Bộ điều khiển góc chúc điều khiển độ lệch của bánh lái ngang δ_Γ dựa trên độ sai lệch của góc chúc ($\Delta\theta = \theta_{y/c} - \theta$). Góc của bánh lái ngang ngư lôi được hạn chế ở một góc đánh lái nhất định nên trên sơ đồ có thêm khâu hạn chế góc đánh lái.

Để đo độ sâu hành trình của ngư lôi, người ta sử dụng phần tử cảm biến dạng hộp xếp, ta có thể coi bộ điều khiển độ sâu của ngư lôi là một khâu tỷ lệ K_y. Bộ điều khiển góc chúc là cơ cấu con lắc, có thể coi đây là một khâu không quán tính có hệ số tỷ lệ là K_θ.

Theo luật điều khiển được trình bày trên Hình 3, điều khiển tỷ lệ theo góc chúc được thể hiện như sau:

$$\frac{\delta_\Gamma(s)}{\Delta\theta(s)} = K_\theta \tag{6}$$

Trong đó $\Delta\theta(s) = \theta_{y/c} - \theta$. K_θ là hệ số khuếch đại tỷ lệ.

Đối với điều khiển độ sâu, điều khiển tỷ lệ được xác định như sau:

$$\frac{\theta(s)}{\Delta Y(s)} = K_y \tag{7}$$

Trong đó $\Delta Y(s) = Y_{y/c} - Y$. K_y là hệ số khuếch đại tỷ lệ.

Thay bộ tham số ngư lôi SET-53M cho mô hình ta có [2]: m = 1753 kg; v_t= 15 m/s; B = 14450 N; J = 6400 kg.m^2/s^2; C_p= 4.12 m; C_B = 3.94 m; δ_Γ = 0.332 rad; k = 38 kg/m; A_x= 21.3 kg/m; A_y = 239 kg/m; A_p= 43.7 kg/m; A_{mz}= 69 kg/m; A_y^ω = 1170 kg; A_{mz}^ω = 3920 kg.m; λ_{22} = 1570 kg; λ_{26} = -168 kg.m^2; λ_{66}= 600 kg.m^2;

Từ đây ta có các hàm truyền cụ thể:

Hàm truyền giữa góc chúc và góc đánh lái ngang:

$$W_T^{\delta_\Gamma \to \theta}(s) = \frac{0.507s + 1}{0.1646s^2 + 1.104s + 0.5814} \tag{8}$$

Hàm truyền liên hệ giữa góc chúc θ với độ sâu y là:

$$W_T^{\theta \to y}(s) = \frac{15}{s} \tag{9}$$

Hàm truyền liên hệ giữa góc đánh lái δ_Γ với độ sâu y là:

$$W_T^{\delta_\Gamma \to y}(s) = \frac{0.507s + 1}{0.1646s^2 + 1.104s + 0.5814} . \frac{15}{s} \tag{10}$$

Hàm truyền kín của hệ thống:

$$W(s) = \frac{7.605K_\theta K_y s + 15K_\theta K_y}{0.1646s^3 + (1.104 + 0.507K_\theta)s^2 + \left(0.5814 + K_\theta + 7.605K_\theta K_y\right)s + 15K_\theta K_y} \quad (11)$$

Phương trình đặc trưng của hệ:

$$0.1646s^3 + (1.104 + 0.507K_\theta)s^2 + \left(0.5814 + K_\theta + 7.605K_\theta K_y\right)s + 15K_\theta K_y = 0$$

Dùng tiêu chuẩn ổn định Routh, ta có, điều kiện để hệ kín theo độ sâu ổn định là:

$$\begin{cases} K_\theta > 0 \\ K_y > 0 \\ (1.104 + 0.507K_\theta)\left(0.5814 + K_\theta + 7.605K_\theta K_y\right) - 0.1646\left(15K_\theta K_y\right) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

2.2. Tổng hợp bộ điều khiển PID cho hệ thống điều khiển độ sâu của ngư lôi

Điều khiển PID (Proportional – Integral – Derivative) là cơ chế điều khiển vòng lặp có phản hồi được sử dụng để hiệu chỉnh sai số giữa một biến đo được và một biến tham chiếu mong muốn (tín hiệu đặt).

Thuật toán PID được đưa ra:

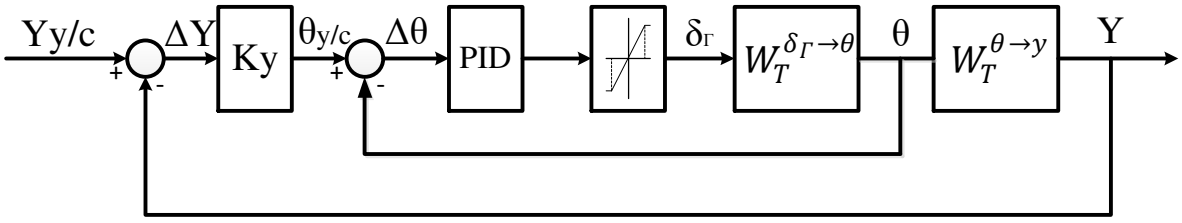
$$u = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

Dạng hàm truyền

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (14)$$

Trong đó, u là đầu ra của bộ điều khiển PID, K_p là hệ số khuếch đại tỷ lệ, K_i hệ số khuếch đại tích phân, K_d là hệ số khuếch đại vi phân, $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ là hằng số thời gian tích phân; $T_d = \frac{K_p}{K_d}$ là hằng số thời gian vi phân, *e* là sai số tín hiệu.

Dựa trên sơ đồ vòng điều khiển độ sâu của ngư lôi đã trình bày ở mục 2.1, ta xây dựng sơ đồ vòng điều khiển độ sâu của ngư lôi sử dụng bộ điều khiển PID như sau:



Hình 4. Sơ đồ vòng điều khiển độ sâu ngư lôi sử dụng bộ điều khiển PID

Trong sơ đồ Hình 4, bộ điều khiển PID được đặt trong vòng điều khiển phản hồi góc chúc. Trong khi đó, vòng điều khiển phản hồi theo độ sâu chỉ cần là khâu khuếch đại tỉ lệ.

2.2.1. Sử dụng phương pháp Ziegler-Nichols tổng hợp tham số bộ điều khiển PID

Phương pháp Ziegler–Nichols là một trong những kỹ thuật kinh điển để tổng hợp tham số cho bộ điều khiển PID dựa trên đặc tính đáp ứng quá độ của hệ thống. Phương pháp này giúp xác định các tham số ban đầu của bộ điều khiển $\{K_p; K_i; K_d\}$ từ phản ứng bước của hệ

thống, từ đó tạo ra một cơ sở thiết kế để có thể hiệu chỉnh thêm nếu cần thiết. Các bước thực hiện tổng hợp tham số PID theo phương pháp Ziegler–Nichols được trình bày như sau:

- Thí nghiệm đáp ứng bước: Kích thích hệ thống mở bằng một đầu vào bước (step input) có biên độ đơn vị. Ghi nhận đáp ứng đầu ra của hệ thống theo thời gian.

- Xác định các tham số L, T và K: Vẽ tiếp tuyến tại đoạn có độ dốc lớn nhất của đường đáp ứng. L là khoảng thời gian từ khi kích thích bước đến khi tiếp tuyến cắt trục thời gian. T ước lượng khoảng thời gian từ L đến khi tiếp tuyến cắt mức giá trị bão hòa (hoặc 63,2% giá trị bão hòa). K là hệ số khuếch đại tĩnh, được tính bằng giá trị bão hòa của đáp ứng khi đầu vào có biên độ đơn vị.

- Tổng hợp các tham số PID: Áp dụng các công thức Ziegler–Nichols

$$K_p = 1.2\frac{T}{L}\frac{1}{K};\ T_i = 2L;\ T_d = 0.5L$$

- Kiểm tra và tinh chỉnh: Sau khi áp dụng các tham số tổng hợp vào hệ thống, tiến hành mô phỏng hoặc thử nghiệm thực tế để đánh giá các chỉ tiêu như thời gian quá độ, độ quá điều chỉnh (overshoot) và dao động dư. Tinh chỉnh $\{K_p; K_i; K_d\}$ dựa trên các yêu cầu về chất lượng đáp ứng của hệ thống.

Kết quả dựa trên mô phỏng đáp ứng bước của hệ thống, ta ước lượng được các thông số đặc trưng sau: Thời gian trễ L = 0.4 s; Hằng số thời gian T = 1.6 s; Hệ số khuếch đại tĩnh $K \approx 1.718$.

Từ đó, ta tính được bộ điều khiển PID tổng hợp ban đầu có các tham số: K_p= 2.79; K_i; = 3.49; K_d = 0.558;

Cuối cùng, hệ số K_y = 0.008 được tính toán để kết hợp hiệu quả giữa hai vòng điều khiển (vòng điều khiển góc chúc và vòng điều khiển độ sâu), nhằm đảm bảo sự tương thích và tối ưu hóa tổng thể đáp ứng của hệ thống.

Phương pháp Ziegler–Nichols được đánh giá cao vì tính đơn giản và hiệu quả trong việc đưa ra các tham số ban đầu cho bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, do các công thức tổng hợp mang tính chất xấp xỉ, nên sau bước tổng hợp ban đầu luôn cần có giai đoạn kiểm tra và hiệu chỉnh kỹ lưỡng để phù hợp với đặc tính thực của hệ thống, nhất là trong những ứng dụng có yêu cầu cao về độ chính xác và ổn định như điều khiển độ sâu của ngư lôi.

2.2.2. Sử dụng thuật toán di truyền GA tổng hợp tham số bộ điều khiển PID

Thuật toán di truyền (GA) là một phương pháp tối ưu hóa dựa trên cơ chế tiến hóa tự nhiên, bao gồm các bước lọc, lai ghép và đột biến. GA cho phép tìm kiếm các giá trị tối ưu cho các tham số của bộ điều khiển PID, cụ thể là các giá trị $\{K_{p_out}, K_{d_out}, K_{i_out}\}$, trong một không gian giải pháp rộng và phức tạp. Ưu điểm nổi bật của GA là không yêu cầu hàm mục tiêu phải khả vi hay liên tục, nhờ đó có thể áp dụng cho nhiều loại bài toán tối ưu khác nhau. Trong nghiên cứu này, GA được sử dụng như một công cụ hỗ trợ quá trình tối ưu hóa bộ điều khiển PID nhằm đạt được các giá trị tham số thỏa mãn hàm mục tiêu trong không gian tìm kiếm được giới hạn.

Quá trình đánh giá và xây dựng hàm thích nghi: Trong nghiên cứu này, hàm thích nghi được xây dựng dựa trên tiêu chuẩn tích phân bình phương sai số (ISE) kết hợp với các yếu tố phạt nhằm đảm bảo hiệu suất điều khiển toàn diện của hệ thống. Cụ thể, hàm mục tiêu J được xác định theo hai trường hợp:

Trường hợp có quá độ (Overshoot > 0): Nếu đáp ứng đầu ra của hệ thống có hiện tượng quá độ (overshoot được tính bằng hiệu giữa giá trị cực đại và giá trị cuối của y), bộ điều khiển PID sẽ bị "phạt" bằng cách gán $J = 10^6$. Việc này nhằm loại bỏ các bộ PID không đạt yêu cầu về độ ổn định, hướng quá trình tối ưu đến các giải pháp cho đáp ứng mượt mà, không có hiện tượng quá độ.

Trường hợp không có quá độ: Khi hệ thống không xuất hiện hiện tượng quá độ, hàm mục tiêu J được tính bằng tổng của các thành phần sau:

- Sai số bình phương (ISE): $e^T e$, với e là vector sai số giữa giá trị đặt và giá trị phản hồi.

- Năng lượng điều khiển: $\rho.(u^T u)$, trong đó u là tín hiệu điều khiển và ρ là hệ số phạt, nhằm hạn chế mức tiêu thụ năng lượng.

- Thời gian ổn định: β_1·settling_time, với β_1 là hệ số phạt thời gian ổn định và $settling_time$ là thời gian cần để hệ thống đạt trạng thái ổn định.

Từ đó, hàm mục tiêu được xác định là:

$$J = e^T e + \rho.(u^T u) + \beta_1 \cdot \text{settling_time}. \quad (15)$$

Sau khi tính được J, hàm thích nghi (fitness) được định nghĩa theo công thức:

$$fitness = \frac{1}{J + \varepsilon} \quad (16)$$

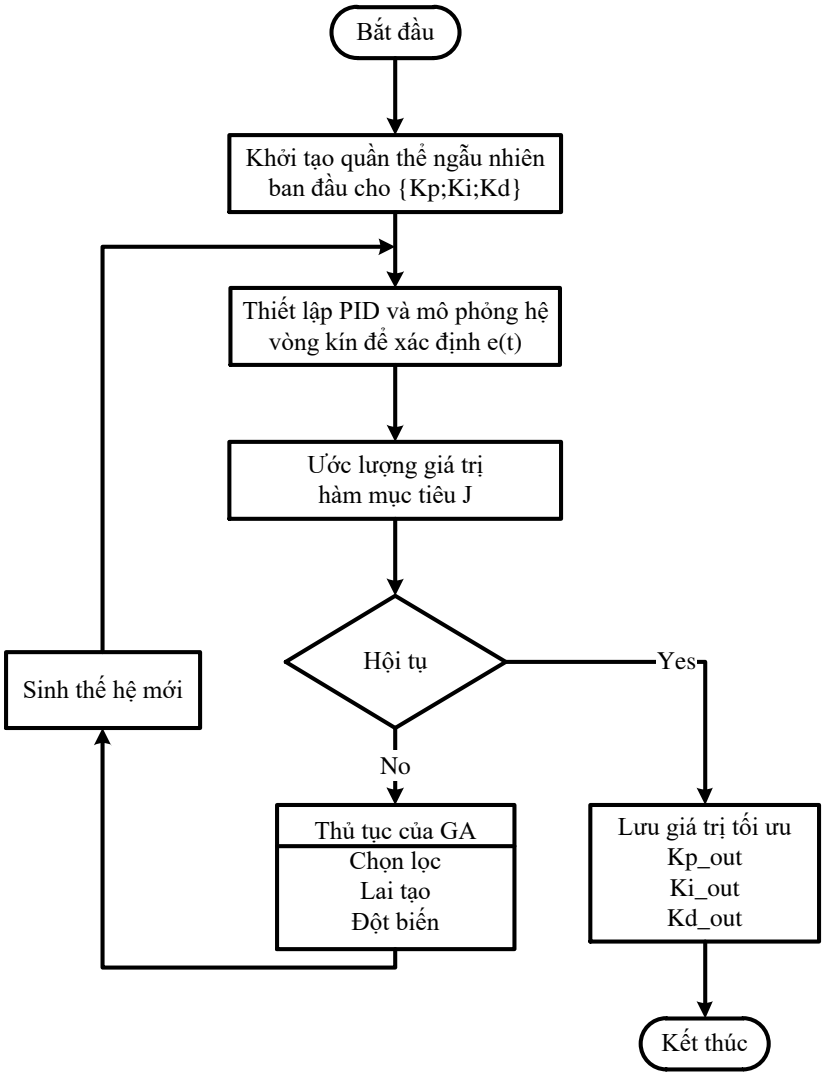
trong đó ε là một hằng số nhỏ được thêm vào để tránh chia cho 0. Công thức này đảm bảo rằng những bộ PID có giá trị J thấp (tức là có sai số nhỏ, tiêu thụ năng lượng hợp lý và thời gian ổn định ngắn) sẽ có mức fitness cao, giúp chúng được ưu tiên trong quá trình chọn lọc.

Thiết lập các tham số của giải thuật GA, để quá trình tối ưu hóa diễn ra hiệu quả, các tham số của giải thuật GA được chọn lựa như sau: quá trình tiến hóa qua 100 thế hệ (generations = 1000), nhằm tạo điều kiện cho quần thể phát triển và hội tụ dần về giải pháp tối ưu; kích thước quần thể 20 (populationsize = 20), được chọn để đảm bảo sự đa dạng mà không làm tăng quá mức thời gian tính toán; tần suất lai ghép 0,9 (CrossoverFraction = 0,9), để trao đổi thông tin giữa các cá thể, tạo ra thế hệ con thừa hưởng được các đặc tính ưu việt của cha mẹ; xác suất đột biến được điều chỉnh thích nghi trong khoảng từ 0.001 đến 0.01, giúp duy trì sự đa dạng của quần thể và tránh hội tụ vào cực trị cục bộ sớm.

Tiến trình tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển PID bằng giải thuật GA được mô tả tóm tắt trên lưu đồ Hình 5. Quá trình này bắt đầu từ việc khởi tạo một quần thể ngẫu nhiên, sau đó thực hiện các bước chọn lọc dựa trên mức độ thích nghi, lai ghép để tạo ra thế hệ con, và đột biến nhằm đảm bảo sự đa dạng trong quần thể. Chu kỳ này được lặp lại qua nhiều thế hệ, cho đến khi đạt được số thế hệ tối đa hoặc khi các giải pháp hội tụ đến một giá trị tối ưu.

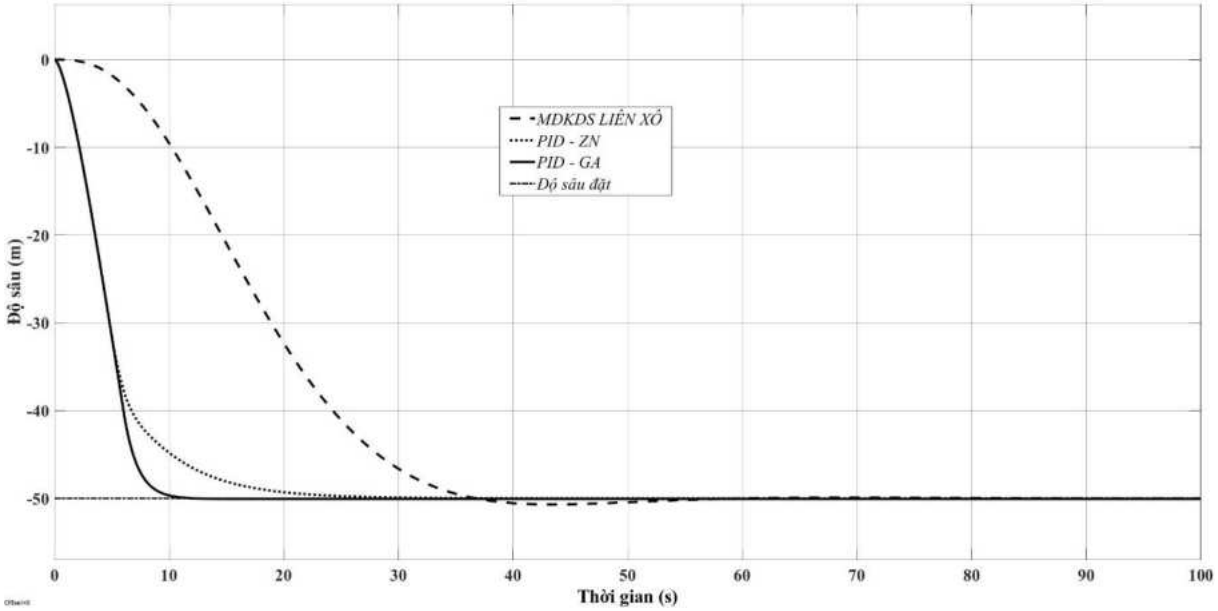
Kết quả tìm kiếm các thông số của bộ điều khiển PID bằng giải thuật GA, thỏa mãn tiêu chuẩn chất lượng với các thông số: $K_p = 48.5$; $K_i = 0.0150$; $K_d = 55.1922$.

Từ đó tính toán tìm ra hệ số K_y để kết hợp 2 vòng điều khiển: $K_y = 0.956$;



Hình 5: Lưu đồ tiến trình GA xác định thông số bộ điều khiển PID

3. Kết quả mô phỏng



Hình 6. Đáp ứng độ sâu của ngư lôi trong ba trường hợp: Máy điều khiển độ sâu Liên Xô; bộ điều khiển PID tối ưu bằng Ziegler-Nichols; và bộ điều khiển PID tối ưu bằng GA.

So sánh trong 3 trường hợp: Máy điều khiển độ sâu Liên Xô sản xuất - hệ thống cho thời gian đáp ứng dài nhất và độ vọt lố lớn, sai số ổn định vẫn tồn tại, cho thấy hiệu suất kém trong việc duy trì độ sâu mong muốn; PID tối ưu bằng Ziegler-Nichols - thời gian đáp ứng nhanh hơn so với máy điều khiển kiểu cũ, sai số ổn định được giảm đáng kể, tuy nhiên, thời gian đáp ứng vẫn còn chưa thực sự nhanh; PID tối ưu bằng GA - hệ thống đạt hiệu suất tốt nhất với thời gian đáp ứng ngắn nhất, sai số ổn định triệt tiêu hoàn toàn, không có độ vọt lố và dao động dư.

Kết quả so sánh cho thấy bộ điều khiển PID tối ưu bằng GA vượt trội hơn hẳn về thời gian đáp ứng, độ chính xác và tính ổn định. Đây là phương pháp hiệu quả để cải thiện hiệu suất điều khiển độ sâu ngư lôi.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp cải tiến hệ thống điều khiển độ sâu ngư lôi bằng cách sử dụng bộ điều khiển PID kết hợp với thuật toán di truyền (GA). Dựa trên mô hình động lực học trong mặt phẳng thẳng đứng và nguyên tắc điều khiển độ sâu, bài báo đã tổng hợp và so sánh các phương pháp tối ưu hóa tham số PID, bao gồm Ziegler-Nichols và GA. Kết quả nghiên cứu cho thấy bộ điều khiển PID tối ưu bằng GA đạt hiệu suất tốt nhất với thời gian đáp ứng ngắn nhất, độ vọt lố và dao động dư giảm đáng kể, sai số ổn định gần như triệt tiêu hoàn toàn. Phương pháp này không chỉ nâng cao độ chính xác mà còn đảm bảo độ ổn định và khả năng phản hồi nhanh trong các môi trường phức tạp, nhiễu loạn. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào tích hợp các thuật toán tối ưu hóa khác như PSO, ANN để so sánh và nâng cao hơn nữa hiệu quả, đồng thời mở rộng ứng dụng vào các hệ thống điều khiển tự động khác như tàu ngầm hoặc thiết bị ngầm trong môi trường nước. Bài báo hy vọng đóng góp một giải pháp hữu ích trong việc cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống điều khiển độ sâu trong các ứng dụng thực tiễn.

Tài liệu tham khảo

[1] Nguyễn Xuân Phú, (2013), *Hệ thống điều khiển ngư lôi*, Học viện Hải quân.

[2] Nguyễn Công Bằng, "*Xây dựng bộ lọc Kalman cho mô - đun con quay vi cơ ứng dụng dẫn đường cho các phương tiện hoạt động trên biển*", Tạp chí Khoa học và huấn luyện hải quân, số 2 (107), 2021;

[3] Vũ Tuấn Thiệp, Ngô Mạnh Trường, (2001), *Thủy động học ngư lôi*, Học viện Hải quân.

[4] Huỳnh Thái Hoàng, (2014), *Lý thuyết điều khiển nâng cao*, Nhà xuất bản Đại học Bách khoa TP HCM.

[5] Nguyễn Công Định, (2002), *Phân tích và tổng hợp các hệ thống điều khiển bằng máy tính*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật Hà Nội.

[6]. Thor I. Fossen, (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley, Norway.

[7]. Bjarni Helgason, Leifur Leifsson, Indridi Rikhardsson, Helgi Thorgilsson and Slawomir Koziel, *Low-speed Modeling and simulation of Torpedo-Shaped AUVs*, Engineering Optimization & Modeling Centre, Shool of science anh Eng., Reykjavik University, Reykjavik, Iceland.

[8]. T. Sarkar, P.G. Sayer, and S.M. Fraser, (1997), "Study of Autonomous Underwater Vehicle Hull Forms Using Computational Fluid Dynamics", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v 25, n 11, 1301-1313.

[9]. S.F. Hoerner and V.B. Henry, (1985), *Fluid Dynamic Lift, second edition*, Published by author.

[10]. J.Lee, M.Roh, J.Lee and D.Lee, *Clonal Selection Algorithms for 6-DOF PID Control of Autonoumous Underwater Vehicles*, Department of Bio and Brain Engineering, KAIST.

A Study on Enhancing the Quality of the Torpedo Depth Control System Based on the Application of PID Control Combined with GA

Abstract: *This paper presents an improved approach to the torpedo depth control system by employing a PID controller in combination with a genetic algorithm (GA). Based on the developed dynamic model in the vertical plane and the underlying principles of torpedo depth control, the paper synthesizes a PID controller and further optimizes its parameters using GA to enhance the overall quality of depth control. Simulation results reveal a marked difference in the performance of the depth control system when using the PID controller versus not using it. Moreover, a comparative study is conducted between the GA-based PID parameter optimization method and other optimization approaches. The findings indicate that employing a PID controller combined with GA not only improves accuracy but also significantly enhances the stability of the control system compared to traditional PID methods.*

Keywords: Torpedo depth control; PID controller; genetic algorithm; optimization

Tổng hợp bộ điều khiển trượt đầu cuối nhanh để điều khiển tư thế thiết bị bay không người lái dạng hexacopter

Trịnh Văn Hiền[1], Nguyễn Ngọc Hưng[1]
[1]Học viện Kỹ thuật quân sự
**Email: mr.trinh94@gmail.com.vn*

Tóm tắt:

Bài báo nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển tư thế cho UAV dạng hexacopter trên cơ sở luật điều khiển trượt đầu cuối nhanh với các hệ số thay đổi thích nghi theo sai số. Điều này giúp sai số bám sát nhanh hội tụ về không nhưng vẫn đảm bảo các yếu tố chống rung cho bộ điều khiển trượt. Ngoài ra, bài báo cũng giới thiệu phương pháp xác định nhiễu loạn trên cơ sở mạng nơ ron để thích ứng với các tác động phức tạp đến điều kiện bay. Kết quả mô phỏng trong bài báo chứng minh tính hiệu quả của phương pháp điều khiển đề xuất so với một số bộ điều khiển điển hình khác. Quá trình thực hiện thử nghiệm đánh giá các tham số trên được mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink.

Từ khoá: *UAV; hexacopter; điều khiển trượt; điều khiển thích nghi; mạng nơ ron…*

1. Đặt vấn đề

Hệ thống thiết bị bay không người lái (UAV) dạng hexacopter đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực. Sự phổ biến này đến từ khả năng cơ động cao, khả năng bay linh hoạt và dễ dàng triển khai trong điều kiện thực tế. Tuy nhiên, quá trình vận hành hexacopter đặt ra nhiều thách thức kỹ thuật liên quan đến độ ổn định và chính xác khi bay, đặc biệt trong các môi trường phức tạp và biến đổi không ngừng.

Những yếu tố như gió, nhiễu loạn không xác định và sự biến thiên của điều kiện môi trường có thể gây mất ổn định cho hệ thống. Điều này làm suy giảm hiệu suất bay và độ tin cậy, đặc biệt khi UAV hoạt động trong điều kiện yêu cầu độ chính xác cao hoặc phải thích nghi với các tác động không mong muốn từ môi trường.

Để giải quyết những vấn đề này, việc áp dụng các luật điều khiển mạnh mẽ như bộ điều khiển trượt đầu cuối nhanh đã được nghiên cứu và phát triển. Phương pháp điều khiển này không chỉ giúp cải thiện khả năng bám sát tư thế với tốc độ hội tụ nhanh mà còn đảm bảo khả năng chống rung động hiệu quả cho hệ thống.

Ngoài ra, với sự phát triển của các mô hình học máy, việc kết hợp mạng nơ ron nhân tạo vào quá trình xác định và bù trừ nhiễu loạn giúp hệ thống có khả năng thích ứng cao hơn với các điều kiện biến động trong thực tế. Điều này tạo ra một hướng tiếp cận hiệu quả cho các bài toán điều khiển UAV phức tạp, đảm bảo độ ổn định và chính xác trong các môi trường không lý tưởng.

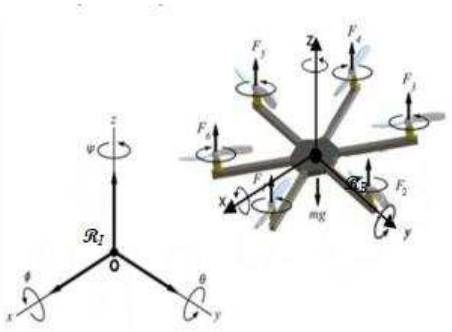
Bài báo này nhằm phát triển một bộ điều khiển trượt đầu cuối nhanh với hệ số thay đổi thích nghi theo sai số để cải thiện độ ổn định và tính chính xác của UAV dạng hexacopter trong quá trình bay. Đồng thời, bài báo đề xuất một phương pháp xác định và bù trừ nhiễu loạn dựa trên mạng nơ ron để thích ứng với các tác động phức tạp từ môi trường, giúp tăng cường khả năng điều khiển chính xác và ổn định của hệ thống trong điều kiện thực tế.

2. Nội dung

2.1. Xây dựng mô hình động lực học của UAV dạng hexacopter

Thiết bị bay này bao gồm sáu động cơ cánh quạt được bố trí đều nhau theo khung thân máy (body frame)[1, 2]. Có ba chuyển động chính mô tả tất cả các tổ hợp tư thế có thể có:

1. **Roll** (quay quanh trục X): Được tạo ra khi sự cân bằng tốc độ của các rotor 1, 2 và 3 (hoặc 6, 5 và 4) thay đổi (tăng hoặc giảm tốc độ).
2. **Pitch** (quay quanh trục Y): Được tạo ra khi sự cân bằng tốc độ của các rotor 1 và 6 (hoặc 3 và 4) thay đổi.
3. **Yaw** (quay quanh trục Z): Được tạo ra khi đồng thời thay đổi tốc độ của các rotor theo cặp (1, 3, 5) hoặc (2, 4, 6).



Hình 1: Cấu trúc và quy ước các trục quay của hexacopter

Để mô tả chuyển động của hexacopter, chỉ cần hai hệ quy chiếu:

- Hệ quy chiếu quán tính trái đất (Earth inertial frame) RIR_IRI.
- Hệ quy chiếu gắn trên thân UAV (Body-fixed frame) RBR_BRB.
- **Góc quay Euler (Euler Angles):**
  - Tư thế (orientation) của hexacopter được xác định bởi ba góc Euler:
    - ψ (yaw angle - góc xoay trục đứng),
    - θ (pitch angle - góc lật trước-sau),
    - ϕ (roll angle - góc nghiêng ngang).
  - Ba góc này tạo thành vector $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$
- **Vị trí của UAV trong hệ quán tính:** được biểu diễn bởi vector $\xi = [x, y, z]^T$
- **Ma trận chuyển đổi:** R_B^I chuyển đổi tọa độ từ hệ thân máy sang hệ quán tính. Nó phụ thuộc vào ba góc Euler và là cơ sở để tính toán các lực khí động học, vị trí, và vận tốc.

$$R_B^I = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

- **Ma trận vận tốc góc :** R_η chuyển đổi các biến đạo hàm của góc Euler $(\dot{\eta})$ thành vận tốc góc trong hệ quán tính. Điều này rất quan trọng trong điều khiển và mô phỏng chuyển động của UAV.

$$R_\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}, \text{ với } \omega = R_\eta \dot{\eta}$$

Giả định mô hình động lực học của UAV:

- Hexacopter được xem là một vật thể cứng không biến dạng trong quá trình bay.
- Hình dạng và cấu trúc của hexacopter là đối xứng qua các trục.
- Lực đẩy FFF và mô-men quay MMM do cánh quạt tạo ra đều tỉ lệ với bình phương tốc độ quay ω của rotor.

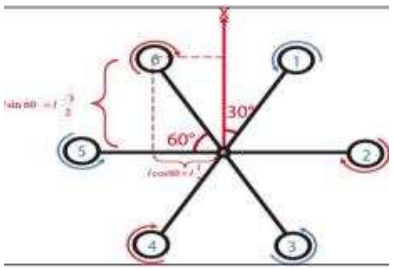
Phương trình Newton-Euler: $\begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \times m\mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \mathbf{F} \\ \sum \mathbf{M} \end{bmatrix}$

Lực trọng trường (Gravity Force): $\mathbf{F}_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mg \end{bmatrix}^T$

Lực đẩy của rotor (Thrust Force): $\mathbf{F}_p = R_B^I \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sum_{i=1}^{6} F_i \end{bmatrix}^T = R_B^I \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sum_{i=1}^{6} b\omega_i^2 \end{bmatrix}^T$

Lực cản từ rotor (Rotor Drag): $\mathbf{F}_t = k_{ft}\upsilon = \mathbf{I}_{3\times3}\begin{bmatrix} k_{ftx} & k_{fty} & k_{ftz} \end{bmatrix}\dot{\xi}$

Lực cản không khí (Air Resistance): $T_i = C_p \rho A r^2 \Omega_i^{\,2} = d\Omega_i^{\,2}$



Mô-men quay Roll:

$$M_x = b\left(-\Omega_2^2 + \Omega_5^2 + \frac{1}{2}(-\Omega_1^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 + \Omega_6^2)\right)$$

Mô-men quay Pitch: $M_y = b\frac{\sqrt{3}}{2}\left(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2 - \Omega_6^2\right)$

Mô-men quay Yaw:

$$M_z = d\left(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 - \Omega_5^2 + \Omega_6^2\right)$$

Vector mô-men tổng: $\mathbf{M}_f = \begin{bmatrix} M_x & M_y & M_z \end{bmatrix}^T$

Mô-men cản khí động học: $\mathbf{M}_a = K_{fa}\omega^2 = \begin{bmatrix} K_{fa_x}\dot{\phi}^2 & K_{fa_y}\dot{\theta}^2 & K_{fa_z}\dot{\psi}^2 \end{bmatrix}^T$

Hiệu ứng hồi chuyển từ cánh quạt: $\mathbf{M}_{gh} = \sum_{i=1}^{6}\Omega_r \Lambda \mathbf{J_r}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & (-1)^i & \omega_i \end{bmatrix}^T$

Mô-men quán tính Yaw:

$$\mathbf{M}_{gh} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{J_r}\dot{\Omega}_r \end{bmatrix}^T \text{ with } \Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 - \Omega_5 + \Omega_6$$

Phương trình tổng quát động lực học tịnh tiến: $m\ddot{\xi} = \sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_t$

Thành phần động lực học theo trục x, y, z:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}\left(\cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi\right)\left(\sum_{i=1}^{6}F_i\right) - k_{fx}\frac{\dot{x}}{m}$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m}\left(\cos\phi\sin\psi\sin\theta - \sin\phi\cos\psi\right)\left(\sum_{i=1}^{6}F_i\right) - k_{fy}\frac{\dot{y}}{m}$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{m}\left(\cos\phi\cos\theta\right)\left(\sum_{i=1}^{6}F_i\right) - k_{fz}\frac{\dot{z}}{m} - g$$

Phương trình tổng quát động lực học quay: $\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega}\Lambda\mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{M}_f - \mathbf{M}_a - \mathbf{M}_{gh}$

Thành phần động lực học quay theo trục ϕ, θ, ψ:

$$J_{xx}\ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}(J_{yy} - J_{zz}) - K_{f\phi}\dot{\phi}^2 - J_s\Omega_r\dot{\phi} + b\left(-\Omega_2^2 + \Omega_5^2 + \frac{1}{2}(-\Omega_1^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 + \Omega_6^2)\right)$$

$$J_{yy}\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}(J_{zz} - J_{xx}) - K_{f\theta}\dot{\theta}^2 - J_s\Omega_r\dot{\phi} + b\frac{\sqrt{3}}{2}\left(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2 - \Omega_6^2\right)$$

$$J_{zz}\ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta}(J_{xx} - J_{yy}) - K_{f\psi}\dot{\psi}^2 + d\left(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 - \Omega_5^2 + \Omega_6^2\right)$$

Vector điều khiển $\mathbf{U}^T = [u_1, u_2, u_3, u_4]$: Các tham số điều khiển tương ứng với lực đẩy tổng của toàn bộ rotor (tác động lên trục z) và mô-men quay quanh trục x, y, z.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b & b & b \\ -\frac{bl}{2} & -\frac{bl}{2} & -\frac{bl}{2} & -\frac{bl}{2} & bl & bl \\ -\frac{bl\sqrt{3}}{2} & \frac{bl\sqrt{3}}{2} & -\frac{bl\sqrt{3}}{2} & \frac{bl\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ -d & d & -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \\ \Omega_5^2 \\ \Omega_6^2 \end{bmatrix}$$

Khi muốn tính tốc độ quay của rotor dựa trên các tín hiệu điều khiển (u1, u2, u3, u4):

$$\Omega_1^2 = \frac{1}{6bl}\left(u_1 + 2u_2 - \frac{bl}{d}u_4\right); \quad \Omega_2^2 = \frac{1}{6bl}\left(u_1 + u_2 + \sqrt{3}u_3 + \frac{bl}{d}u_4\right)$$

$$\Omega_3^2 = \frac{1}{6bl}\left(u_1 - u_2 - \sqrt{3}u_3 - \frac{bl}{d}u_4\right); \quad \Omega_4^2 = \frac{1}{6bl}\left(u_1 - 2u_2 + \frac{bl}{d}u_4\right)$$

$$\Omega_5^2 = \frac{1}{6bl}\left(u_1 - u_2 + \sqrt{3}u_3 - \frac{bl}{d}u_4\right); \quad \Omega_6^2 = \frac{1}{6bl}\left(u_1 + u_2 + \sqrt{3}u_3 + \frac{bl}{d}u_4\right)$$

Mô hình hệ thống tổng quát:

$$\dot{\phi} = \frac{1}{J_{xx}}\left[\dot{\theta}\dot{\psi}(J_{yy} - J_{zz}) - K_{f\phi}\dot{\phi}^2 - J_s\Omega_r\dot{\phi} + u_2\right]$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{J_{yy}}\left[\dot{\phi}\dot{\psi}(J_{zz} - J_{xx}) - K_{f\theta}\dot{\theta}^2 - J_s\Omega_r\dot{\phi} + u_3\right]$$

$$\dot{\psi} = \frac{1}{J_{zz}}\left[\dot{\phi}\dot{\theta}(J_{xx} - J_{yy}) - K_{f\psi}\dot{\psi}^2 + u_4\right]$$

$$\ddot{x} = -\frac{k_{fx}}{m}\dot{x} + \frac{1}{m}u_x u_1$$

$$\ddot{y} = -\frac{k_{fy}}{m}\dot{y} + \frac{1}{m}u_y u_1$$

$$\ddot{z} = -\frac{k_{fz}}{m}\dot{z} + g + \frac{\cos\phi\cos\theta}{m}u_1$$

$$u_x = \cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi$$

$$u_y = \cos\phi\sin\psi\sin\theta - \sin\phi\cos\psi$$

Mô hình động lực học UAV có thể biểu diễn dưới dạng không gian trạng thái $\dot{X} = f(X,U)$

$$X^T = \begin{bmatrix} \phi & \dot{\phi} & \theta & \dot{\theta} & \psi & \dot{\psi} & x & \dot{x} & y & \dot{y} & z & \dot{z} \end{bmatrix}$$

$$\dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3\Omega_r x_2 + b_1 u_2$$

$$\dot{x}_4 = a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6\Omega_r x_2 + b_2 u_3$$

$$\dot{x}_6 = a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_3 u_4$$

$$\dot{x}_8 = a_9 x_8 + \frac{1}{m}u_x u_1$$

$$\dot{x}_{10} = a_{10} x_{10} + \frac{1}{m}u_y u_1$$

$$\dot{x}_{10} = a_{10} x_{10} + \frac{1}{m}u_y u_1$$

với:

$$a_1 = \frac{(J_{yy} - J_{zz})}{J_{xx}}, \quad a_2 = \frac{-K_{f\phi}}{J_{xx}}, \quad a_3 = \frac{-J_s}{J_{xx}}, \quad b_1 = \frac{1}{J_{xx}}$$

$$a_4 = \frac{(J_{zz} - J_{xx})}{J_{yy}}, \quad a_5 = \frac{-K_{f\theta}}{J_{yy}}, \quad a_6 = \frac{-J_s}{J_{yy}}, \quad b_2 = \frac{1}{J_{yy}}$$

$$a_7 = \frac{(J_{xx} - J_{yy})}{J_{zz}}, \quad a_8 = \frac{-K_{f\psi}}{J_{zz}}, \quad b_3 = \frac{1}{J_{zz}}$$

$$a_9 = \frac{-K_{fx}}{m}, \quad a_{10} = \frac{-K_{fy}}{m}, \quad a_{11} = \frac{-K_{fz}}{m}$$

2.2. Điều khiển tư thế UAV với luật điều khiển FTSMC với hệ số thay đổi thích nghi

Điều khiển trượt đầu cuối nhanh (FTSM - Fast Terminal Sliding Mode) là một phương pháp điều khiển trong đó hệ thống được đẩy về bề mặt trượt và cuối cùng hội tụ về gốc tọa độ trong thời gian hữu hạn. FTSM kết hợp tốc độ hội tụ nhanh của SMC (Sliding Mode Control) và tính hội tụ hữu hạn của TSM (Terminal Sliding Mode) [2, 4].

Bề mặt trượt sss được định nghĩa cho từng trục quay (ϕ,θ,ψ) như sau:

$$s_\phi = p + \alpha_\phi \cdot |e_\phi|^\mu \cdot \text{sign}(e_\phi)$$

$$s_\theta = q + \alpha_\theta \cdot |e_\theta|^\mu \cdot \text{sign}(e_\theta) \quad \text{với } (0<\mu<1).$$

$$s_\psi = r + \alpha_\psi \cdot |e_\psi|^\mu \cdot \text{sign}(e_\psi)$$

- Thành phần $\alpha \cdot |e|^\mu \cdot \text{sign}(e)$ tạo đặc tính phi tuyến, giúp giảm sai số về 0 nhanh hơn so với điều khiển trượt thông thường.
- Bề mặt s đại diện cho sự ổn định của hệ thống. Khi s=0, trạng thái hệ thống đạt cân bằng.

Luật điều khiển được thiết kế để kéo trạng thái về bề mặt trượt và đảm bảo s→0 trong thời gian hữu hạn. Tính mô-men điều khiển ($\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi$):

$$\tau_\phi = -k_\phi \cdot \text{sat}\left(\frac{s_\phi}{\grave{o}_s}\right); \ \tau_\theta = -k_\theta \cdot \text{sat}\left(\frac{s_\theta}{\grave{o}_s}\right); \ \tau_\psi = -k_\psi \cdot \text{sat}\left(\frac{s_\psi}{\grave{o}_s}\right)$$

Trong đó sat là hàm saturation thay cho sign để giảm dao động.

$$\text{sat}(x, \grave{o}_s) = \begin{cases} \text{sign}(x), & |x| > \grave{o}_s, \\ \dfrac{x}{\grave{o}_s}, & |x| \le \grave{o}_s. \end{cases}$$

Các tham số $\alpha_\phi, \alpha_\theta, \alpha_\psi$ và k_ϕ, k_θ, k_ψ được điều chỉnh thích nghi để cải thiện hiệu năng điều khiển. Hàm sigm(|e|) được sử dụng để tăng giá trị tham số khi sai số lớn:

$$\alpha_\phi = \alpha_{0,\phi} + \Delta\alpha_\phi \cdot \text{sigm}(|e_\phi|)$$

$$k_\phi = k_{0,\phi} + \Delta k_\phi \cdot \text{sigm}(|e_\phi|)$$

- Khi sai số lớn, α và k tăng, giúp tăng cường phản hồi điều khiển.
- Khi sai số nhỏ, tham số giảm dần, tránh dao động lớn và tiết kiệm năng lượng.

Một ưu điểm của SMC/FTSM là **bền vững** (robust) với sai số mô hình, nhiễu. Khi có nhiễu Δϕ trong phương trình $\ddot{\phi}$, miễn Δϕ còn trong **dải chấp nhận** thì điều khiển trượt vẫn có thể kéo hệ về bề mặt sϕ=0.

Thêm nhiễu mô-men (d_ϕ, d_θ, d_ψ) dạng sin vào các phương trình quay $\ddot{\phi}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}$:

$$u(2) = \tau_\phi + d_\phi, \quad u(3) = \tau_\theta + d_\theta, \quad u(4) = \tau_\psi + d_\psi.$$

Thêm nhiễu lực dz dạng sin vào phương trình tịnh tiến trục z.

$$\ddot{z} = -g + \frac{1}{m}(u(1)\cos\phi\cos\theta) + \frac{d_z}{m}.$$

Để nâng cao hiệu quả điều khiển, sử dụng một mạng nơ-ron (NN) để xấp xỉ (estimate) nhiễu trong thời gian thực, thay vì giả định nhiễu dạng sin hoặc hàm cố định. Mạng nơ-ron sẽ cập nhật tham số dựa trên dữ liệu đo được (trạng thái, sai số, v.v.) để thích nghi với các tác động phức tạp (gió, thay đổi tải trọng ...) [5, 6].

Ta muốn xấp xỉ δ thông qua một hàm phi tuyến $\hat{\delta}(\mathbf{s})$ do mạng nơ-ron đảm nhiệm, trong đó s là bộ vector đầu vào (gồm: $\phi, \theta, \psi, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, e_\phi, e_\theta, e_\psi, \ldots$).

Cấu trúc mạng NN truyền thẳng (MLP) 1 hidden layer: $\hat{\delta} = W_2\,\sigma\left(W_1\mathbf{s} + b_1\right) + b_2$,

- W1, b1: trọng số, bias của lớp ẩn.
- W2, b2: trọng số, bias lớp output.
- σ: hàm kích hoạt (tanh, ReLU, ...).

Tiêu chí để mạng nơ-ron cập nhật: $e_d = \delta_{meas} - \hat{\delta}$, với δ_{meas} là giá trị nhiễu đo/ước lượng từ cảm biến, hoặc sử dụng SMC "tự thích nghi"

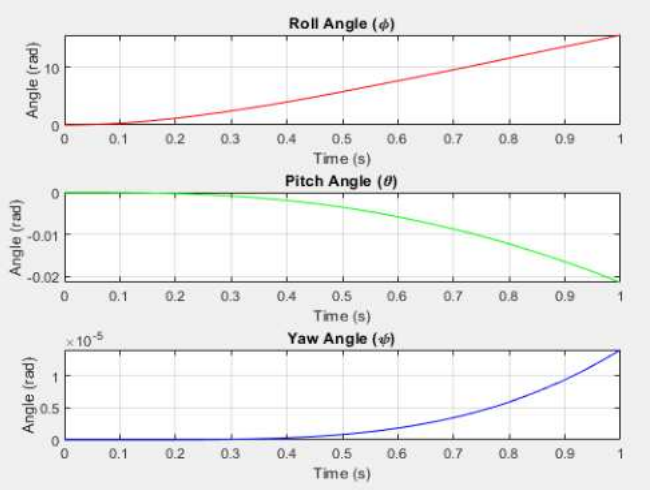
Trong nghiên cứu này, giả sử ta "biết" $\hat{\delta}$, và lấy sai số e_d để cập nhật W_1,W_2 theo một gradient descent đơn giản.

3. Kết quả mô phỏng

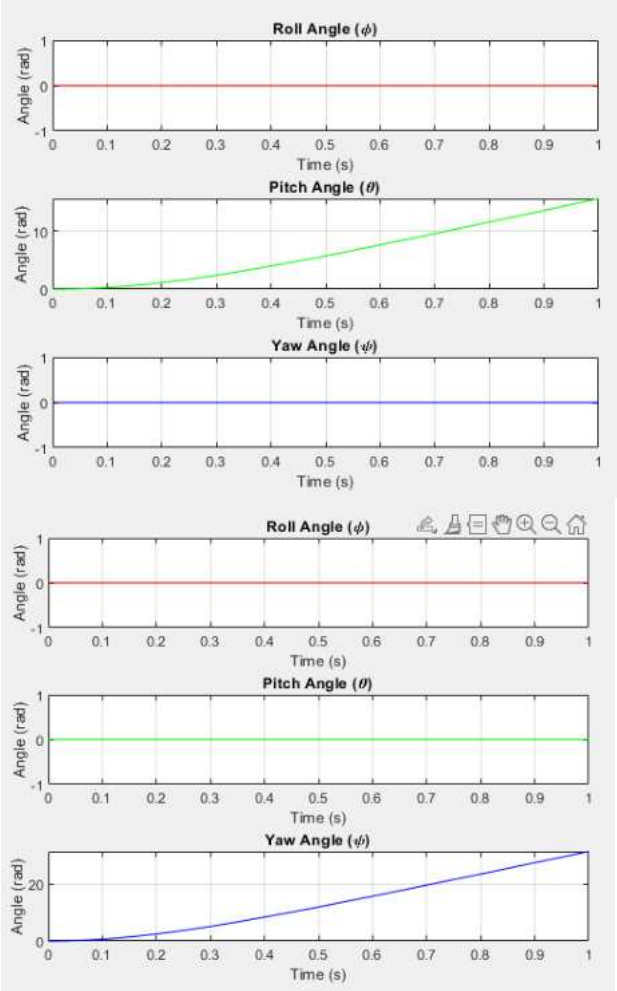
Trong nghiên cứu tập trung điều khiển tư thế của hexacopter nên các hình vẽ đều tập trung xem xét ảnh hưởng đến 3 góc tư thế.

Khi mô hình động lực học của hexacopter chưa sử dụng luật điều khiển, ta xét ảnh hưởng của các góc tư thế khi tác động riêng biệt từng mô men theo các trục theo 3 trường hợp:

Trường hợp	U1	U2	U3	U4
1	0	1	0	0
2	0	0	1	0
3	0	0	0	1



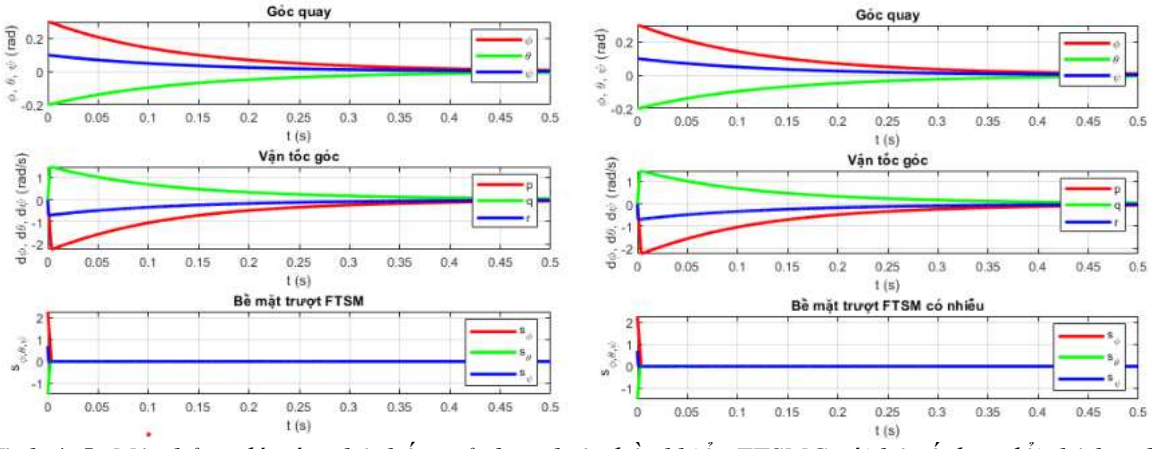
Hình 2. Sự thay đổi 3 góc tư thế khi xét trường hợp 1



Hình 2, 3. Sự thay đổi 3 góc tư thế khi xét trường hợp 2, 3

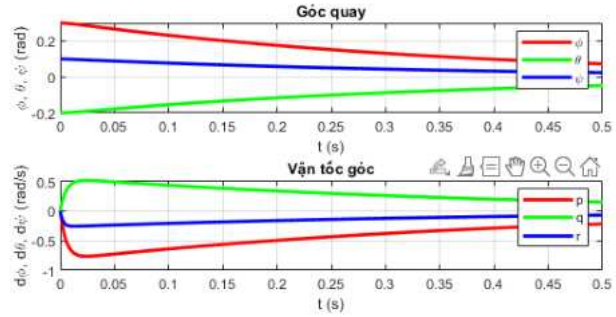
Nhận xét: Do mối liên hệ động lực học giữa các tốc độ góc ($\dot{\phi}$,$\dot{\theta}$,$\dot{\psi}$), ảnh hưởng từ Ωr, hay các hệ số khí động học nên khi tác động mô men theo một trục thì hai góc tư thế còn lại của hai trục kia vẫn bị thay đổi một lượng nhỏ. Tùy hệ số mà trường hợp 1 ảnh hưởng này rõ rệt hơn, các trường hợp 2,3, sự ảnh hưởng gần như bằng 0.

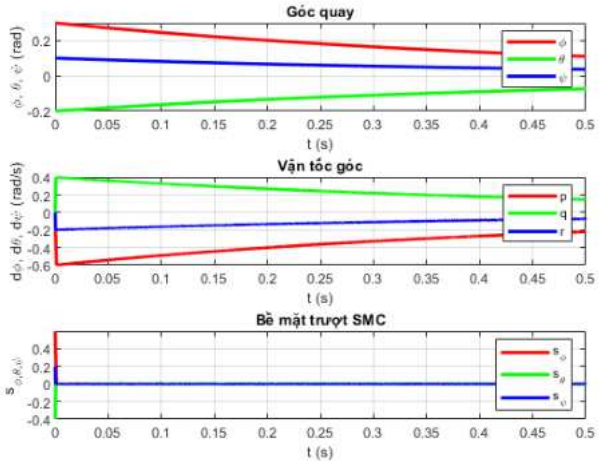
Để điều khiển tư thế của hexacopter, nghiên cứu đã đặt các góc ban đầu khác 0 (rad) cho cả 3 góc. Qua thử nghiệm luật điều khiển FTSMC với hệ số thay đổi thích nghi để đưa góc sai lệch này về 0 rad.



Hình 4, 5: Mô phỏng đáp ứng hệ thống sử dụng luật điều khiển FTSMC với hệ số thay đổi thích nghi trong 2 trường hợp (không có nhiễu, có nhiễu)

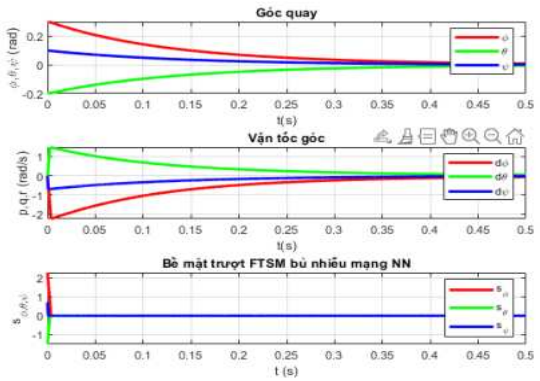
Nhận xét, luật điều khiển FTSMC với hệ số thay đổi thích nghi hoạt động hiệu quả ngay cả khi hệ thống có nhiễu, các tiêu chí đánh giá về điều khiển gần khi không đổi khi thêm nhiễu.





Hình 6, 7: Mô phỏng đáp ứng hệ thống sử dụng luật điều khiển PID và SMC cơ bản

Nhận xét, đáp ứng hệ thống khi sử dụng luật điều khiển FTSMC tốt hơn nhiều khi sử dụng PID, SMC cơ bản (các giá trị xác lập đạt được nhanh hơn, sai số thấp hơn…)



Nhận xét: Khi bù phần nhiễu loạn sử dụng mạng NN sẽ hiệu quả khi nhiễu ngẫu nhiên lớn, phức tạp. Việc bù nhiễu NN làm tốc độ tính toán FTSMC nhanh hơn, nhưng yêu cầu tài nguyên mạnh hơn.

Hình 8. Mô phỏng đáp ứng hệ thống sử dụng luật điều khiển FTSMC với hệ số thay đổi thích nghi và bù nhiễu sử dụng mạng Nơ ron

Đánh giá chung: FTSMC thích nghi có tốc độ hội tụ nhanh, khả năng chống nhiễu tốt, thích ứng với điều kiện thay đổi, đảm bảo độ ổn định và chính xác cao trong các môi trường phức tạp và giảm được hiện tượng chattering khi so với SMC cơ bản nhưng cần tài nguyên tính toán lớn; PID đơn giản, dễ triển khai, phù hợp cho các UAV hoạt động trong môi trường ổn định và ít biến động. Bù nhiễu bằng mạng nơ ron có ý nghĩa quan trọng trong việc cải thiện hiệu suất điều khiển của hệ thống UAV, đặc biệt khi đối mặt với các yếu tố nhiễu loạn và điều kiện môi trường thay đổi (có gió, nhiễu loạn hay các yếu tố không dự đoán được khác…).

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp xây dựng bộ điều khiển tư thế cho UAV dạng hexacopter trên cơ sở luật điều khiển trượt đầu cuối nhanh với các hệ số thay đổi thích nghi theo sai số. Điều này giúp sai số bám sát nhanh hội tụ về không nhưng vẫn đảm bảo các yếu tố chống rung cho bộ điều khiển trượt. Ngoài ra, bài báo cũng giới thiệu phương pháp xác định nhiễu loạn trên cơ sở mạng nơ ron để thích ứng với các tác động phức tạp đến điều kiện bay. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp này hiệu quả hơn nhiều so với PID truyền thống hay SMC cơ bản, hiệu quả cả khi có nhiễu hay bù nhiễu bằng mạng Nơ ron, làm cơ sở nghiên cứu sâu hơn về luật điều khiển UAV khi áp dụng vào các hệ thống điều khiển UAV phức tạp, hiện đại.

Tài liệu tham khảo

1. Mostafa Moussid, Adil Sayouti, Hicham Medromi, *Dynamic Modeling and Control of a HexaRotor using Linear and Nonlinear Methods",* International Journal of Applied Information Systems. 9, 5 (August 2015), 9-17.

2. Radek Baránek; František Šolc, "*Modelling and control of a hexa-copter"*, Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC), 02 July 2012.

3. Najafi, Amin; Vu, Mai The; Mobayen, Saleh; Asad, Jihad H.; Fekih, Afef, "*Adaptive Barrier Fast Terminal Sliding Mode Actuator Fault Tolerant Control Approach for Quadrotor UAVs*", Mathematics (2227-7390), 2022, Vol 10, Issue 16, p3009

4. Ngoc Phi Nguyen, Nguyen Xuan Mung, Ha Le Nhu Ngoc Thanh, Tuan Tu Huynh, (Member, Ieee), Ngoc Tam Lam, And Sung Kyung Hong, *"Adaptive Sliding Mode Control for Attitude and Altitude System of a Quadcopter UAV via Neural Network",* Department of Aerospace Engineering, IEEE Access PP(99):1-1, March 17, 2021.

5. Shurui Huang, Yueneng Yang, "*Adaptive Neural-Network-Based Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control for a Quadrotor with Dynamic Uncertainty*", *August 2022*, Drones 6(8):206.

6. Zhengguo Huang, Mou Chen, Peng Shi, Hao Shen, "*Adaptive Neural Network Control for Fixed-Wing UAV With Disturbance Observer Under Switching Disturbance*", IEEE Trans Neural Netw Learn Syst, 2024 Nov.

Research on synthesizing Fast Terminal Sliding Mode Controller for Attitude Control of Hexacopter UAV

Abstract*: This paper investigates the development of a posture controller for a hexacopter UAV based on a fast terminal sliding mode control law with error-adaptive coefficients. This approach ensures that the tracking error converges quickly to zero while maintaining vibration suppression characteristics for the sliding mode controller. Additionally, the paper introduces a disturbance estimation method based on neural networks to adapt to the complex environmental influences on the flight conditions. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control method compared to several other typical controllers. The experimental process for evaluating the parameters is simulated using Matlab Simulink.*

Keywords*:* UAV; hexacopter; sliding mode control; adaptive control; neural networks...

Nghiên cứu xây dựng mô hình động học và tổng hợp hệ thống điều khiển tư thế cho UAV dạng Quadrotor

Đinh Lê Duy Hiếu[1] , Nguyễn Vĩ Thuận[1]

[1]Viện Tên lửa và Kĩ thuật điều khiển, Trường Đại học Kĩ thuật Lê Quý Đôn

Email: h.master9696@gmail.com; Tel: 0913353596

Tóm tắt

Bài báo trình bày về mô hình động học; xây dựng bộ điều khiển và ổn định tư thế cho UAV dạng Quadrotor. Trong đó, hai bộ điều khiển riêng biệt được đề xuất: Bộ điều khiển PID và bộ điều khiển trượt; làm cơ sở so sánh, đánh giá chất lượng. Bộ điều khiển mới được xây dựng có khả năng điều khiển và ổn định tư thế UAV dạng Quadrotor với độ dự trữ ổn định lớn. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink và thử nghiệm Monte Carlo cho thấy bộ điều khiển trượt có những ưu điểm hơn so với bộ điều khiển PID thông thường: thời gian quá độ nhanh hơn, độ quá chỉnh thấp hơn, sai số xác lập nhỏ hơn; khả năng chống chịu tốt với nhiễu và sự không chắc chắn trong các thành phần c

ủa UAV dạng quadrotor. Các chỉ tiêu chất lượng cho thấy bộ điều khiển đã đạt được các yêu cầu chất lượng bay.

Từ khóa: *Điều khiển tư thế; Quadrotor; điều khiển PID, điều khiển trượt.*

1. Đặt vấn đề

UAV dạng Quadrotor với thiết kế nhỏ gọn và khả năng điều khiển linh hoạt là một trong những nền tảng được nghiên cứu sâu rộng. Tuy nhiên, việc điều khiển UAV Quadrotor phải đối mặt với nhiều thách thức, bao gồm tác động của trọng lực, lực khí động học và sự không ổn định nội tại của hệ thống. Các phương pháp điều khiển như điều khiển PID [1], điều khiển bền vững [2] và [3], điều khiển LQR [4] đã được đề xuất nhằm giải quyết các vấn đề này. Tuy nhiên, những phương pháp này thường gặp khó khăn khi đối mặt với nhiễu và bất định mô hình. Các bài báo nghiên cứu về điều khiển trượt cho UAV dạng quadrotor trước đây [5] đã xem xét các ràng buộc phi tuyến hình học và các hiện tượng vật lý ảnh hưởng đến động học của thiết bị bay; từ đó sử dụng bộ điều khiển trượt để đảm bảo tính ổn định và khả năng chống nhiễu. Tuy nhiên, chưa nghiên cứu sâu về phương pháp giảm hiện tượng chattering, giảm sai số trong những thời điểm ban đầu, cũng như đảm bảo tính ổn định với các thành phần không chắc chắn của hệ thống.

Trong bài báo này, trình bày một cách chi tiết động lực học của UAV dạng Quadrotor, từ đó xây dựng một mô hình toán học và triển khai xây dựng bộ điều khiển và ổn định tư thế đặc thù cho UAV dạng Quadrotor, đề xuất phương pháp điều khiển trượt nhằm đảm bảo tính bền vững và khả năng thích ứng cao cho UAV dạng Quadrotor, giảm thiểu hiện tượng chattering, có khả năng chống nhiễu và ổn định ngay cả khi tính đến các thành phần không chắc chắn của hệ thống; sau đó tiến hành mô phỏng hệ thống trên phần mềm Matlab Simulink.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 xây dựng mô hình toán. Phần 3 trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển. Phần 4 trình bày kết quả mô phỏng và một số nhận xét về chất lượng bộ điều khiển. Cuối cùng là kết luận.

2. Mô hình toán

Sử dụng các góc Euler (ϕ,θ,ψ) để liên hệ giữa hệ tọa độ gắn cố định gắn với thân của UAV $S_b(x,y,z)$ và hệ tọa độ quán tính $S_I(X,Y,Z)$. Bằng cách thực hiện chuỗi các phép quay quanh các trục $x-y-z$ sẽ thu được ma trận quay sau:

$$R_{xyz}=\begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Gọi u,v,w là thành phần vận tốc đo được trên hệ toạ độ S_b, thông qua phép nhân với ma trận (1) thu được các thành phần vận tốc trong hệ toạ độ S_I:

$$\begin{cases} \dot{x}=u(c\theta c\psi)+v(s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi)+w(c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi) \\ \dot{y}=u(c\theta s\psi)+v(s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi)+w(c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi) \\ \dot{z}=-us\theta + v(s\phi c\theta)+w(c\phi c\theta) \end{cases} \quad (2)$$

Thực hiện các phép quay tương tự, từ vận tốc góc p,q,r đo được trên hệ toạ độ S_b sẽ tính được vận tốc góc trong hệ toạ độ S_I:

$$\begin{cases} \dot{\phi}=p+qs\phi t\theta + rc\phi t\theta \\ \dot{\theta}=qc\phi - rs\phi \\ \dot{\psi}=qs\phi \sec\theta + rc\phi \sec\theta \end{cases} \quad (3)$$

Từ công thức động lực học Newton cho vật rắn ta có:

$$\vec{F}+\vec{f}_g=m\left(\begin{bmatrix}\dot{u}\\ \dot{v}\\ \dot{w}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix}\right)\Rightarrow\begin{cases}\dot{u}=rv-qw-gs\theta \\ \dot{v}=pw-ru+gs\phi c\theta \\ \dot{w}=qu-pv+gc\phi c\theta-\dfrac{f_t}{m}\end{cases} \quad (4)$$

Ta có công thức động lực học Newton về chuyển động quay như sau:

$$\begin{cases} \dot{p}=\dfrac{\tau_x}{I_{xx}}+\dfrac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}}qr \\ \dot{q}=\dfrac{\tau_y}{I_{yy}}+\dfrac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}}rp \\ \dot{r}=\dfrac{\tau_z}{I_{zz}}+\dfrac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}pq \end{cases} \quad (5)$$

Từ (2), (3), (4) và (5) ta thu được mô hình toán của UAV dạng Quadrotor.

3. Thiết kế bộ điều khiển

3.1. Bộ điều khiển PID

Các trạng thái và tín hiệu điều khiển ở điểm cân bằng là các hằng số, được kí hiệu:

$$\phi_0,\theta_0,\psi_0,p_0,q_0,r_0,u_0,v_0,w_0,x_0,y_0,z_0,f_{t0},\tau_{x0},\tau_{y0},\tau_{z0} \quad (6)$$

Kí hiệu các biến nhiễu nhỏ tương ứng:

$$\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\psi, \Delta p, \Delta q, \Delta r, \Delta u, \Delta v, \Delta w, \Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta f_t, \Delta\tau_x, \Delta\tau_y, \Delta\tau_z \quad (7)$$

Mối liên hệ giữa các biến trạng thái, các tín hiệu điều khiển với các biến nhiễu nhỏ:

$$\begin{array}{llll} \phi = \phi_0 + \Delta\phi = \Delta\phi; & q = q_0 + \Delta q = \Delta q; & w = w_0 + \Delta w = \Delta w; & f_t = f_{t0} + \Delta f_t \\ \theta = \theta_0 + \Delta\theta = \Delta\theta; & r = r_0 + \Delta r = \Delta r; & x = x_0 + \Delta x = \Delta x; & \tau_x = \tau_{x0} + \Delta\tau_x \\ \psi = \psi_0 + \Delta\psi = \Delta\psi; & u = u_0 + \Delta u = \Delta u; & y = y_0 + \Delta y = \Delta y; & \tau_y = \tau_{y0} + \Delta\tau_y \\ p = p_0 + \Delta p = \Delta p; & v = v_0 + \Delta v = \Delta v; & z = z_0 + \Delta z = \Delta z; & \tau_z = \tau_{z0} + \Delta\tau_z \end{array} \quad (8)$$

Xác định điểm làm việc chính là trạng thái bay treo:

$$\phi_0 = \theta_0 = \psi_0 = 0; p_0 = q_0 = r_0 = 0; u_0 = v_0 = w_0 = 0; x_0 = y_0 = z_0 = 0 \quad (9)$$

Áp dụng lý thuyết nhiễu nhỏ, khai triển Taylor, ta có thể tuyến tính hóa mô hình toán mô hình toán xung quanh điểm làm việc chính (9):

$$\begin{cases} \Delta\phi = \Delta p; \quad \Delta\theta = \Delta q; \quad \Delta\psi = \Delta r; \quad \Delta p = \dfrac{1}{I_{xx}}\Delta\tau_x; \quad \Delta q = \dfrac{1}{I_{yy}}\Delta\tau_y; \quad \Delta\overset{\cdot\cdot}{r} = \dfrac{1}{I_{zz}}\Delta\tau_z \\ \Delta u = -g\Delta\theta \quad \Delta v = g\Delta\phi \quad \Delta w = -\dfrac{1}{m}\Delta f_t \quad \Delta x = \Delta u \quad \Delta y = \Delta v \quad \Delta z = \Delta w \end{cases} \quad (10)$$

Từ (10) rút ra được: $\Delta\phi = \dfrac{1}{I_{xx}}\Delta\tau_x; \Delta\overset{\cdot\cdot}{\theta} = \dfrac{1}{I_{yy}}\Delta\tau_y; \Delta\psi = \dfrac{1}{I_{zz}}\Delta\tau_z; \Delta\overset{\cdot\cdot}{z} = -\dfrac{1}{m}\Delta f_t$

Suy ra hàm truyền liên hệ giữa góc roll và moment xoắn theo trục x, góc pitch và moment xoắn theo trục y, góc yaw và moment xoắn theo trục z, độ cao z và lực đẩy tổng f_t lần lượt là:

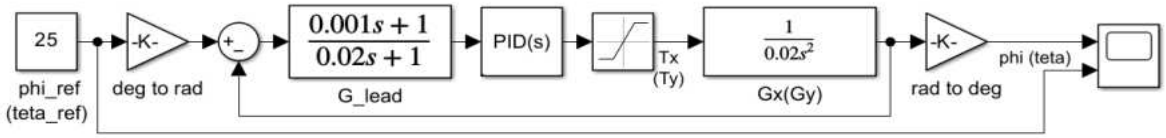
$$G_x = \frac{1}{I_{xx}s^2}, G_y = \frac{1}{I_{yy}s^2}, G_z = \frac{1}{I_{zz}s^2}, G_f = \frac{1}{ms^2} \quad (11)$$

Sử dụng UAV có các thông số như sau: $m = 0,5kg; I_{xx} = I_{yy} = 0,02kg.m^2; I_{zz} = 0,04kg.m^2$

$f_{tmax} = 20N$; $|\tau_x|, |\tau_y|, |\tau_z| < 1$

3.1.1. Điều khiển và ổn định góc roll và pitch

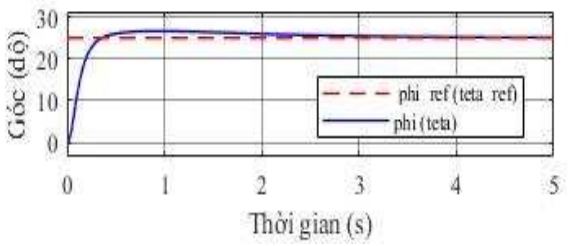
Do hàm truyền $G_x = G_y$, nên mô hình điều khiển và ổn định góc roll và góc pitch đều được xây dựng như sau:



Hình 1. Mô hình điều khiển và ổn định góc roll (pitch)

Bộ điều chỉnh Lead bù pha tại tần số mong muốn giúp hệ thống có độ dự trữ dương (bộ điều khiển ổn định).

Hệ số PID lựa chọn như sau: $K_P = 0,5; K_I = 0,3; K_D = 0,2; N = 100$



Hình 2. Đáp ứng góc roll (pitch) của Quadrotor (Bộ điều khiển PID)

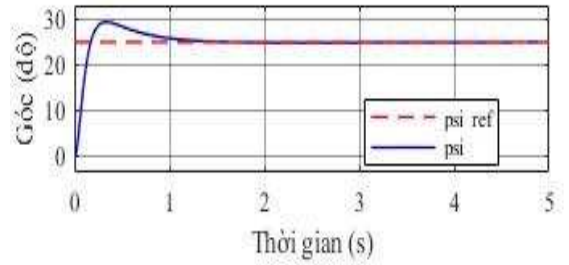
Bảng 1. Chất lượng bộ điều khiển góc roll (pitch) (Bộ điều khiển PID)

Thời gian quá độ (giây)	Độ quá chỉnh (%)	Độ dự trữ biên (dB)	Độ dự trữ pha (độ)
2,8	6,44	24,1	59,7

3.1.2. Điều khiển và ổn định góc yaw

Mô hình điều khiển và ổn định góc yaw có dạng như Hình 1.

Hệ số PID lựa chọn như sau: $K_P = 1; K_I = 0,6; K_D = 0,4; N = 100$



Hình 3. Đáp ứng góc yaw của Quadrotor

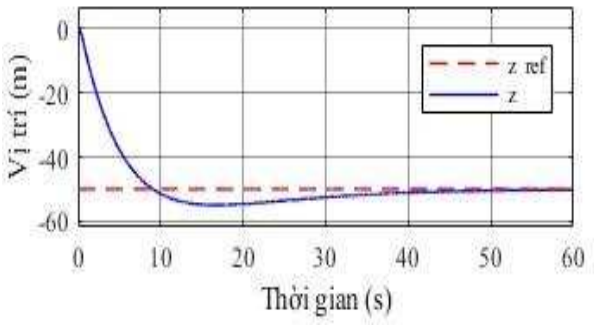
Bảng 2. Chất lượng bộ điều khiển góc yaw

Thời gian quá độ (giây)	Độ quá chỉnh (%)	Độ dự trữ biên (dB)	Độ dự trữ pha (độ)
1,2	17,68	24,1	59,4

3.1.3. Điều khiển và ổn định vị trí theo trục z (độ cao)

Mô hình điều khiển và ổn định vị trí theo trục z có dạng như Hình 1.

Hệ số PID lựa chọn như sau: $K_P = -1,3; K_I = -0,08; K_D = -5; N = 100$



Hình 4. Vị trí của UAV Quadrotor theo trục z

Bảng 3. Chất lượng bộ điều khiển vị trí theo trục z (Bộ điều khiển PID)

Thời gian quá độ (giây)	Độ quá chỉnh (%)	Độ dự trữ biên (dB)	Độ dự trữ pha (độ)
40,9	9,88	41,7	82

Nhận xét: Với các thông số PID tìm được, bộ điều khiển cho chất lượng điều khiển trên cả 4 kênh đều đạt được các yêu cầu chất lượng bay.

3.2. Bộ điều khiển trượt

Xuất phát từ các nghiên cứu trước, bài báo này tập trung vào việc xây dựng bộ điều khiển trượt điều khiển tư thế cho UAV dạng Quadrotor tập trung vào việc giảm thiểu hiện tượng rung chattering, ổn định với nhiễu loạn và sự không chắc chắn trong các thành phần của hệ thống.

Với các giá trị đặt từ thiết bị điều khiển: $z_{ref}, \phi_{ref}, \theta_{ref}, \psi_{ref}$, ta có sai số giữa tín hiệu phản hồi và tín hiệu đặt: $e_1 = z - z_{ref}$; $e_2 = \phi - \phi_{ref}$; $e_3 = \theta - \theta_{ref}$; $e_4 = \psi - \psi_{ref}$

Chọn mặt trượt có dạng như sau:

$$\begin{cases} S_1 = c_1 e_1 + c_2 \dot{e}_1 = c_1 (z - z_{ref}) - c_2 (us\theta - vs\phi c\theta - wc\phi c\theta + \dot{z}_{ref}) \\ S_2 = c_3 e_2 + c_4 \dot{e}_2 = c_3 \left(\phi - \phi_{ref}\right) + c_4 \left(p + qs\phi t\theta + rc\phi t\theta - \dot{\phi}_{ref}\right) \\ S_3 = c_5 e_3 + c_6 \dot{e}_3 = c_5 \left(\theta - \theta_{ref}\right) + c_6 \left(qc\phi - rs\phi - \dot{\theta}_{ref}\right) \\ S_4 = c_7 e_4 + c_8 \dot{e}_4 = c_7 \left(\psi - \psi_{ref}\right) + c_8 \left(qs\phi \sec\theta + rc\phi \sec\theta - \dot{\psi}_{ref}\right) \end{cases} \quad (12)$$

Các hệ số $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$ được chọn sao cho đa thức $c_1\lambda + c_2$; $c_3\lambda + c_4$; $c_5\lambda + c_6$; $c_7\lambda + c_8$ thoả mãn tiêu chuẩn Hurwitz.

Để hệ thống ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov thì điều kiện mặt trượt cần thiết là:

$$\dot{S} = -\alpha.sign(S) \qquad \text{với } \alpha > 0 \quad (13)$$

Mặt trượt trên sử dụng hàm dấu $sign(x)$, sự không liên tục của hàm dấu trong luật điều khiển trượt có thể gây ra hiện tượng rung. Giá trị α lớn làm cho mặt trượt hội tụ nhanh hơn, giúp hệ thống ổn định trong thời gian ngắn nhưng nhạy với nhiễu và gây dao động hoặc chattering. Để khắc phục nhược điểm này, bài báo đề xuất một điều kiện khác thay thế (13):

$$\dot{S} = -\alpha.|S|.sign(S) \qquad \text{với } \alpha > 0 \quad (14)$$

Khi thêm thành phần $|S|$ vào luật điều khiển mặt trượt hội tụ nhanh hơn, giảm hiện tượng dao động và chattering khi S tiến gần về 0.

Ta có hệ phương trình trượt sau:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -\alpha_1.|S_1|.sign(S_1) \\ \dot{S}_2 = -\alpha_2.|S_2|.sign(S_2) \\ \dot{S}_3 = -\alpha_3.|S_3|.sign(S_3) \\ \dot{S}_4 = -\alpha_4.|S_4|.sign(S_4) \end{cases} \quad (15)$$

Thay các tham số trạng thái và phương trình mặt trượt (12) vào (15), giải hệ phương trình thu được các tín hiệu điều khiển (lực đẩy tổng f_t và moment xoắn theo các trục τ_x, τ_y, τ_z):

$$f_t = m\frac{c_1\left(-us\theta + vs\phi c\theta + wc\phi c\theta - \dot{z}_{ref} + \alpha_1 |S_1| sign\left(S_1\right)\right) + c_2\left(g - \ddot{z}_{ref}\right)}{c_2 c\phi c\theta} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \tau_x = {} & \left(I_{zz} - I_{yy}\right)qr - I_{xx}[\frac{c_3}{c_4}(p + qs\phi t\theta + rc\phi t\theta - p\dot{\phi}_{ref}) + \frac{c_7}{c_8}\left(\dot{\psi}_{ref} c\theta - rc\phi - qs\phi\right)t\theta \\ & + \ddot{\psi}_{ref} s\theta - \ddot{\phi}_{ref} + qr\left(c\phi^2 - s^2\phi\right) + \left(q^2 - r^2\right)s\phi c\phi + \frac{\alpha_2}{c_4}|S_2| sign(S_2) - \frac{\alpha_4}{c_8} s\theta |S_4| sign(S_4)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \tau_y = {} & (I_{xx} - I_{zz})pr + I_{yy}[\frac{c_5}{c_6}(\dot{\theta}_{ref} - qc\phi + rs\phi)c\phi + \frac{c_7}{c_8} s\phi(\dot{\psi}_{ref} c\theta - qs\phi - rc\phi) + \ddot{\theta}_{ref} c\phi + \ddot{\psi}_{ref} c\theta s\phi \\ & + r^2 c\phi t\theta + (r^2 - q^2)s^2\phi c\phi t\theta + pr(1 + 2s^3\phi t\theta) - \frac{\alpha_3}{c_6} c\phi |S_3| sign(S_3) - \frac{\alpha_4}{c_8} s\phi c\theta |S_4| sign(S_4)] \end{aligned} \quad (18)$$

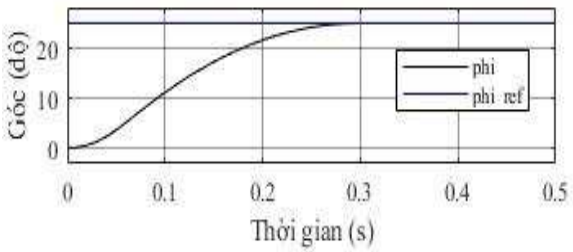
$$\tau_z = (I_{yy} - I_{xx})pq - I_{zz}[\frac{c_5}{c_6}(\dot{\theta}_{ref} - qc\phi + rs\phi)s\phi + \frac{c_7}{c_8}c\phi(qs\phi + rc\phi - \dot{\psi}_{ref}c\theta) + \ddot{\theta}_{ref}s\phi - \ddot{\psi}_{ref}c\phi c\theta$$
$$+ q^2 s\phi t\theta + (q^2 - r^2)s\phi c^2\phi t\theta + pq + 2qrc^3\phi t\theta - \frac{\alpha_3}{c_6}s\phi|S_3|sign(S_3) + \frac{\alpha_4}{c_8}c\phi c\theta|S_4|sign(S_4)] \quad (19)$$

Sử dụng UAV mô phỏng có thông số: $m = 1,3kg; I_{xx} = I_{yy} = 0,02kg.m^2; I_{zz} = 0,04kg.m^2$

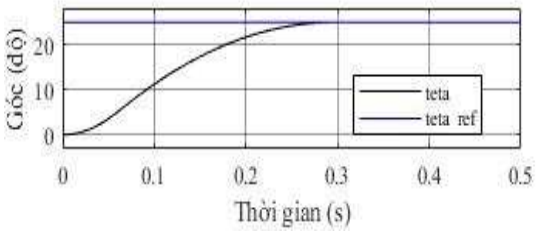
Qua nhiều lần thử nghiệm và kiểm tra chất lượng hệ thống, để đảm bảo cân bằng giữa các chỉ tiêu chất lượng bài báo lựa chọn các hệ số mặt trượt như sau:

$$\begin{cases} c_1 = 1; c_2 = 1; \alpha_1 = 5 \\ c_3 = 100; c_4 = 1; \alpha_2 = 50 \\ c_5 = 100; c_6 = 1; \alpha_3 = 50 \\ c_7 = 100; c_8 = 1; \alpha_4 = 50 \end{cases} \quad \text{(Thoả mãn điều kiện ổn định)} \quad (20)$$

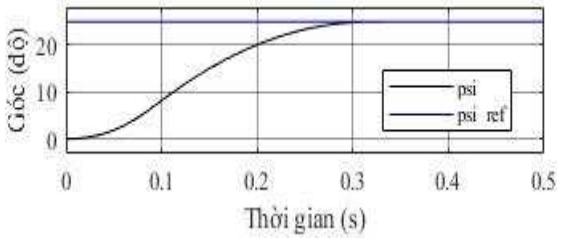
Khi đặt các góc Euler là $20°$ và độ cao là $50m$, đáp ứng đầu ra của hệ thống như sau:



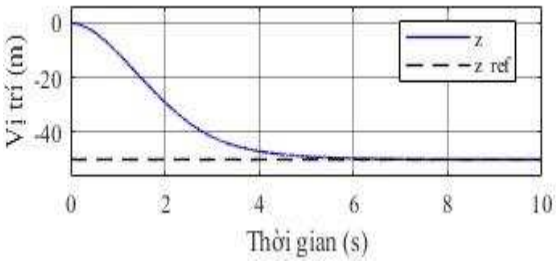
Hình 5. Đáp ứng góc roll (SMC)



Hình 6. Đáp ứng góc pitch (SMC)



Hình 7. Đáp ứng góc yaw (SMC)



Hình 8. Vị trí theo trục z (SMC)

Bảng 4. Chất lượng bộ điều khiển trên từng kênh

STT	Tên tín hiệu	Thời gian quá độ (giây)	Độ quá chỉnh
1	Góc roll ϕ	0,3	0%
2	Góc pitch θ	0,3	0%
3	Góc yaw ψ	0,3	0%
4	Độ cao z	5,1	0%

Nhận xét: Bộ điều khiển trượt được xây dựng cho chất lượng điều khiển trên cả 4 kênh đạt được các yêu cầu chất lượng bay.

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Điều kiện bài toán

Bảng 5. Điều kiện ban đầu của bài toán

STT	Tham số	Giá trị
1	Toạ độ ban đầu (x, y, z)	(0,0,0)
2	Góc Euler ban đầu (ϕ, θ, ψ)	(0,0,0)
3	Vận tốc ban đầu (u, v, w)	(0,0,0)
4	Vận tốc góc ban đầu (p, q, r)	(0,0,0)

Bảng 6. Tham số của UAV

STT	Tham số	Giá trị
1	Khối lượng (m)	$0,5kg$
2	Mô men quán tính theo các trục (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})	(0,02;0,02;0,04) $kg.m^2$
3	Lực đẩy tổng lớn nhất (f_{tmax})	$20N$
4	Mô men xoắn cực đại theo các trục $(\lvert\tau_x\rvert, \lvert\tau_y\rvert, \lvert\tau_z\rvert)$	$< 1N.m$

Mô phỏng đánh giá hiệu quả của hệ thống điều khiển và ổn định tư thế UAV dạng quadrotor đối với hai trường hợp sử dụng bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển PID. Qua đó cho thấy chất lượng tốt hơn của bộ điều khiển trượt so với bộ điều khiển PID. Đồng thời sử dụng mô phỏng Monte-Carlo đánh giá tính bền vững đối với các thành phần không chắc chắn của hệ thống SMC đã tổng hợp.

Kịch bản mô phỏng được thể hiện bằng các tham số trong Bảng 5 và 6.

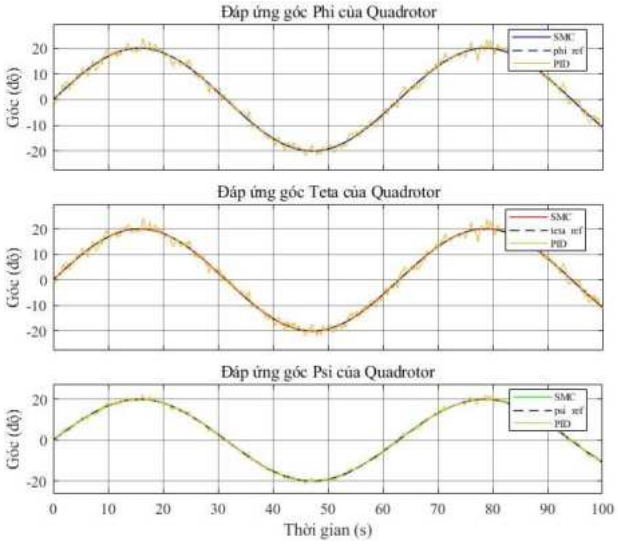
Ngoài ra, để tạo nhiễu loạn gây ra cho hệ thống, sử dụng khối Band-Limited White Noise với cường độ nhiễu là 0,0001.

4.2. Kết quả tổng hợp hệ thống điều khiển

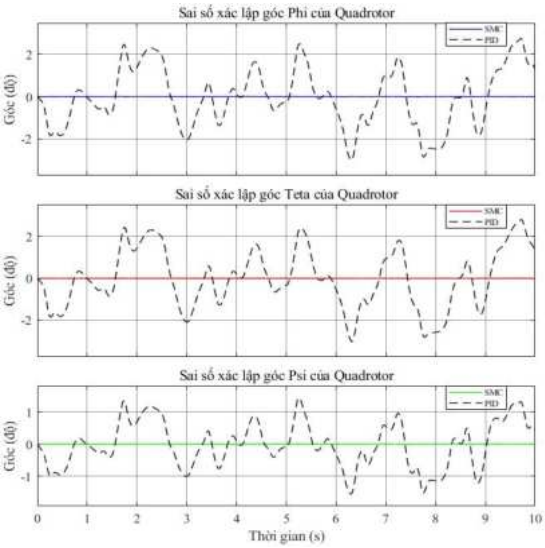
Cho tín hiệu các giá trị đặt là tín hiệu hình sine có biên độ 20, tần số 0,1 rad/s.

Đáp ứng của UAV đối với các bộ điều khiển đã xây dựng như Hình 9, 10, 11 và 12.

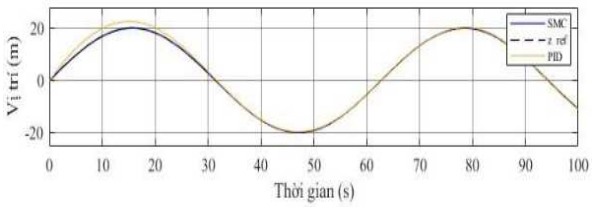
Trên hình cho thấy bộ điều khiển trượt cho các chỉ tiêu chất lượng như thời gian quá độ, độ quá chỉnh và sai số xác lập tốt hơn bộ điều khiển PID. Điều này thể hiện khả năng bền vững với nhiễu của bộ điều khiển trượt.



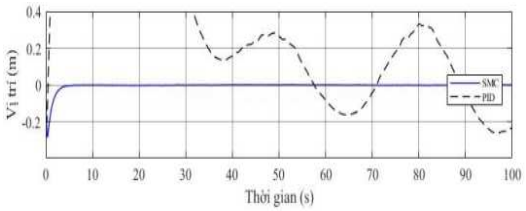
Hình 9. Đáp ứng các góc Euler



Hình 10. Sai số xác lập các góc Euler



Hình 11. Đáp ứng vị trí theo trục z



Hình 12. Sai số xác lập vị trí theo trục z

Ngoài khả năng bên vững với nhiễu, bộ điều khiển trượt còn bền vững đối với các thành phần không chắc chắn của hệ thống.

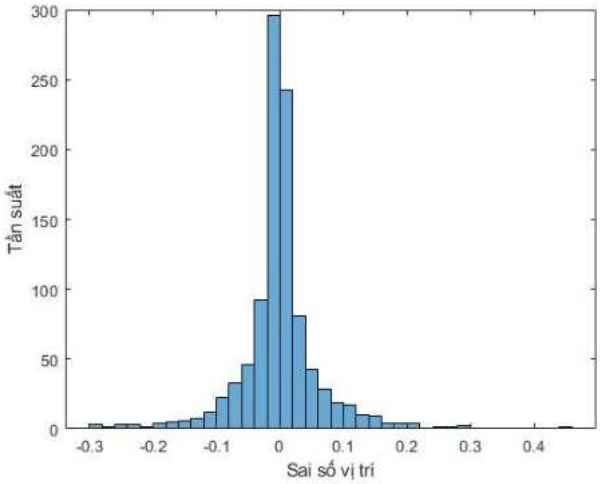
Để đánh giá tính bền vững đối với các thành phần không chắc chắn của bộ điều khiển trượt đã tổng hợp, luận văn sử dụng phương pháp Monte Carlo để thực hiện mô phỏng bao gồm 1000 mẫu chạy cho mỗi trường hợp kiểm tra. Đối với từng trường hợp kiểm tra, các giá trị ngẫu nhiên $m, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ và giá trị các trạng thái ban đầu được mô tả như trong Bảng 7.

Hình 13 cho biết phân phối sai số xác lập giữa các lần kiểm tra với giá trị chuẩn (bay treo ở độ cao 50m).

Hệ thống có tỉ lệ ổn định là 95,6% với ngưỡng sai số cho phép là 0,15.

Bảng 7. Thành phần không chắc chắn của hệ thống

TT	Thành phần không chắc chắn	Loại phân bố ngẫu nhiên	Lấy mẫu
1	Khối lượng: m	Phân bố chuẩn	$\mu = 0,5; \sigma = 0,05$
2	Mô men quán tính: $I_{xx}; I_{yy}$ I_{zz}	 Phân bố chuẩn Phân bố chuẩn	 $\mu = 0,02; \sigma = 0,002$ $\mu = 0,04; \sigma = 0,002$
3	Trạng thái ban đầu	Phân bố chuẩn	$\mu = 0; \sigma = 0,1$
4	Thành phần nhiễu loạn	Phân bố đều	$[0; 0,0001]$



Hình 13. Phân phối sai số vị trí

Nhận xét: Qua thử nghiệm Monte-Carlo, bộ điều khiển trượt đã xây dựng có khả năng làm việc tốt ngay cả khi UAV có các thành phần không chắc chắn.

5. Thảo luận

Kết quả mô phỏng và phân tích cho thấy cả hai bộ điều khiển PID và điều khiển trượt (SMC) đều có khả năng điều khiển và ổn định tư thế UAV dạng quadrotor. Trong đó, bộ điều khiển PID được xây dựng có chất lượng đủ tốt để làm cơ sở so sánh, đánh giá chất lượng cho bộ điều khiển trượt. Bộ điều khiển trượt là một phương pháp điều khiển phi tuyến có khả năng hoạt động ổn định ngay cả khi hệ thống có bất định và chịu tác động của nhiễu. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển trượt giúp UAV đạt được thời gian đáp ứng nhanh hơn, sai số xác lập nhỏ hơn và đặc biệt có khả năng chống chịu tốt với nhiễu. Bên cạnh đó, luật cập nhật mặt trượt được đề xuất cũng đã làm tốt nhiệm vụ giảm hiện tượng chattering vốn là điểm yếu cố hữu của bộ điều khiển trượt nói chung.

So với các nghiên cứu trước đây, kết quả thu được trong bài báo phù hợp với kết luận của nhiều nghiên cứu về UAV dạng quadrotor. Nhìn chung, kết quả nghiên cứu cho thấy bộ điều khiển trượt đã xây dựng có nhiều ưu điểm trong điều khiển và ổn định tư thế UAV dạng quadrotor.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp mô hình toán; tổng hợp bộ điều khiển và ổn định tư thế cho UAV dạng Quadrotor. Kết quả thu được cho thấy các bộ điều khiển được xây dựng đảm bảo các yêu cầu chất lượng bay. Trong đó, bộ điều khiển PID giúp hiểu rõ việc thiết lập một bộ điều khiển điển hình; bộ điều khiển trượt làm tăng chỉ tiêu chất lượng cũng như tính ổn định của hệ thống. Kết quả so sánh, đánh giá cho thấy bộ điều khiển trượt điều khiển và ổn định tư thế cho UAV dạng quadrotor có những ưu điểm hơn so với bộ điều khiển PID thông thường. Với đề xuất lựa chọn mặt trượt (12) và các tham số mặt trượt ở (14) và (20), bộ điều khiển trượt cho kết quả với thời gian quá độ nhanh hơn, độ quá chỉnh thấp hơn, sai số xác lập nhỏ hơn; và đặc biệt, bộ điều khiển trượt cho thấy khả năng chống chịu tốt với nhiễu và sự không chắc chắn trong các thành phần của hệ thống. Bên cạnh đó, việc lựa chọn các tham số mặt trượt và tốc độ trượt khác nhau sẽ có hiệu quả khác nhau, khi nâng cao chất lượng một

chỉ tiêu sẽ phải đánh đổi bằng một chỉ tiêu khác, do đó cần cân bằng giữa các chỉ tiêu chất lượng để lựa chọn một tham số mặt trượt đảm bảo nhất.

Tài liệu tham khảo

[1]. Hamel T., Mahoney R., Lozano R., Et Ostrowski J. (2002). Dynamic modelling and configuration stabilization for an X4-flyer. *The 15éme IFAC world congress*.

[2]. A. Mokhtari, A. Benallegue, A. Belaidi. (2005). Polynomial linear quadratic Gaussian and sliding mode observer for a Quadrotor unmanned aerial vehicle. *Journal of Robotics and Mechatronics*.

[3]. A. Mokhtari, N. K. M'sirdi, K. Meghriche, A. Belaidi. (2006). Feedback linearization and linear observer for a Quadrotor unmanned aerial vehicle. *Advanced Robotics.*

[4]. Ludwig Horvath, Martin Petré. (2023). Quadcopter Control System Design and Implementation with LQR assisted by Kalman Filter: An Experimental Study. *KTH Royal Institute Of Technology*.

[5]. Nguyễn Ngọc Tuấn, Trần Xuân Tình, Trần Hồng Phú, Nguyễn Văn Dương. (2024). Thiết kế bộ điều khiển trượt cho UAV kiểu Quadrotor. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.*

Research on the Development of a Kinematic Model and Attitude Control System Synthesis for Quadrotor UAVs

Abstract:

This paper presents the kinematic model, controller design, and attitude stabilization for a quadrotor UAV. Two separate controllers are proposed: a PID controller and a sliding mode controller, serving as the basis for comparison and performance evaluation. The newly developed controller demonstrates the capability to control and stabilize the quadrotor UAV with a high stability margin. Simulation results in Matlab-Simulink and Monte Carlo testing show that the sliding mode controller has advantages over the conventional PID controller, including faster transient response, lower overshoot, smaller steady-state error, and better robustness against disturbances and uncertainties in the quadrotor UAV components. The quality criteria indicate that the controller meets the flight performance requirements.

Keywords: Attitude control; Quadrotor; PID control; Sliding mode control.

Tổng hợp bộ điều khiển ổn định đường ngắm cho pháo 23mm-2M trên tàu cảnh sát biển hoạt động đến sóng cấp 3 dựa trên RISE

Vũ Xuân Huy[1], Hoàng Mạnh Tưởng[1], Vũ Quốc Huy[2]

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự; [2]Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự/Viện KH-CNQS

**Email: vxhuy1788@gmail.com.vn*

Tóm tắt:

Bài báo nghiên cứu tổng hợp thuật toán điều khiển thích nghi bền vững cho pháo 23mm-2M trên cơ sở ứng dụng vòng hồi tiếp vi phân độ lợi cao. Phát triển thuật toán tích phân của hàm dấu sai lệch góc bám (RISE – Robust of Integral of Sign of Error), luật điều khiển được tổng hợp dựa trên việc hiệu chỉnh mô hình động lực học hệ truyền động tầm, hướng của pháo, đảm bảo không có sự gián đoạn trong tín hiệu điều khiển. Dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov, hệ thống được đảm bảo sai lệch bám hội tụ về 0. Mô phỏng được thực hiện trong điều kiện sóng cấp 3 đối với tàu CV-01 để minh chứng tính hiệu quả của luật điều khiển.

Từ khoá: *Ổn định đường ngắm, điều khiển RISE, pháo 23mm.*

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, để nâng cao khả năng chiến đấu và sẵn sàng chiến đấu trong tình hình mới, bên cạnh việc nhập các trang thiết bị vũ khí mới hiện đại, việc cải tiến trang thiết bị vũ khí, nâng cao khả năng tác chiến cho các vũ khí trang bị hiện có đang được Quân đội ta hết sức chú trọng. Một trong các nội dung được nhiều đơn vị nghiên cứu quan tâm đó là hệ thống ổn định đường ngắm cho hệ thống hoả lực lắp đặt trên phương tiện cơ động [1], [2], trong đó có hệ thống pháo trên tàu cảnh sát biển [3]. Các hệ thống ổn định đường ngắm trên tàu biển thường sử dụng cơ hệ quay quét, trong đó khối tầm thực hiện chuyển động quét trong mặt phẳng đứng, khối hướng thực hiện chuyển động quay trong mặt phẳng ngang [1-3]. Trong [1], động lực học của cơ hệ quay quét sử dụng để ổn định đường ngắm trong hệ thống quang điện tử trên phương tiện cơ giới đường bộ đã được nghiên cứu. Công trình [4] đã nghiên cứu dao động của tàu Hải quân HQ-331 khi lắp đặt dàn phóng tên lửa rải nhiễu PK16 có kể đến ảnh hưởng của sóng biển. Công trình [5] nghiên cứu ảnh hưởng của sóng biển đối với tàu CV-01. Kết quả tính toán trong [2], [4], [5] là cơ sở tính toán thiết kế hệ thống ổn định khi đóng mới hoặc lắp đặt các loại vũ khí lên tàu. Mặc dù vậy, chuyển động lắc của tàu HQ-331, CV-01 chưa đưa vào một bệ ổn định nào để đánh giá, đặc biệt là đối với pháo 23mm-2M. Đặc tính chuyển động của sóng biển có dạng trơn, do vậy khi nghiên cứu hệ thống ổn định đường ngắm cho pháo 23mm-2M lắp trên tàu biển sẽ cần những thuật toán đảm bảo tín hiệu điều khiển liên tục.

Với cách tiếp cận như vậy, bài báo nghiên cứu động hình học và động lực học cho hệ truyền động tầm hướng của pháo 23mm-2M trên tàu biển. Luật điều khiển thích nghi bền vững cho pháo 23mm-2M trên cơ sở ứng dụng vòng hồi tiếp vi phân có độ lợi cao được tổng hợp trên cơ sở hiệu chỉnh mô hình phù hợp nhằm ứng dụng và làm sâu sắc thêm thuật toán tích phân của hàm dấu sai lệch góc bám (RISE – Robust of Integral of Sign of Error); luật điều khiển đảm bảo không có sự gián đoạn trong tín hiệu điều khiển. Dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov các trạng thái của hệ thống được đảm bảo hội tụ, sai lệch bám sát tiến đến 0.

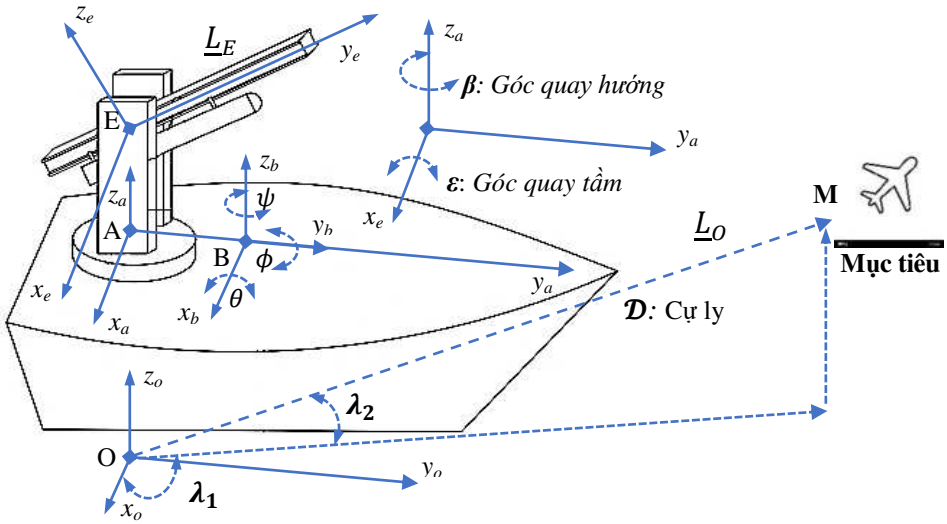
Mô phỏng được thực hiện với mục tiêu cố định và mục tiêu di chuyển trong điều kiện sóng cấp 3 đối với tàu CV-01 [5] để minh chứng tính hiệu quả của thuật toán.

2. Mô hình toán học hệ thống ổn định đường ngắm cho pháo 23mm-2M

2.1. Động lực học hệ ổn định đường ngắm cho pháo 23mm-2M

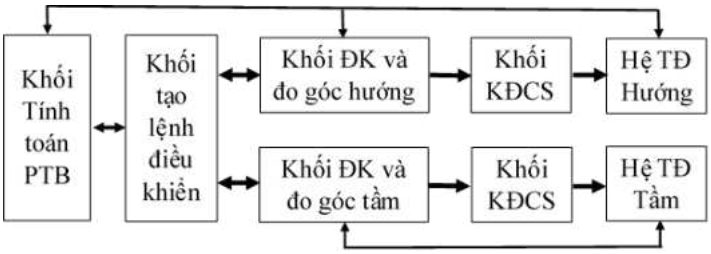
Các hệ tọa độ (HTĐ) gắn với cơ hệ quay quét được biểu diễn trên Hình 1. Gọi O là gốc HTĐ chuẩn. HTĐ chuẩn là HTĐ di động song song với HTĐ cố định mặt đất nhưng gốc tọa độ gắn với sàn tàu. Gọi B là gốc HTĐ gắn liền với sàn tàu, có trục By_b trùng với trục dọc của tàu và hướng về phía trước tàu; Bx_b vuông góc với By_b và nằm trên mặt phẳng song song với sàn tàu; trục Bz_b hướng lên trên và hợp với Bx_b, By_b tạo thành một tam diện thuận. Gọi A là gốc HTĐ chuyển động gắn với khối quay, có Az_a trùng với trục quay và hướng lên trên; Ay_a hướng về phía mục tiêu, vuông góc với Az_a trên mặt phẳng đối xứng của cơ hệ; Ax_a nằm trên mặt phẳng khối quay và tạo với các trục Az_a, Ay_a thành một tam diện thuận. Gọi E là gốc HTĐ chuyển động gắn với khối quét, có Ey_e trùng với véc tơ đường ngắm của pháo; Ez_e hướng lên trên, vuông góc với Ey_e trong mặt phẳng đối xứng của pháo; Ex_e trùng với trục quay tầm và có chiều sao cho chính nó hợp với các trục Ez_e, Ey_e tạo thành một tam diện thuận. Để cho trực quan, Hình 1 biểu diễn tách rời các HTĐ A và E cho dễ nhận biết, tuy nhiên, về bản chất, hai HTĐ này có cùng gốc tọa độ và được đặt tại E. Sau đây, gọi tắt các HTĐ là O, B, A và E. Như vậy các HTĐ O, B, A và E có cùng gốc tọa độ và đều được đặt tại E.

Như vậy góc trục hướng β là góc quay của HTĐ A so với HTĐ B quanh trục Az_a; góc trục tầm ε là góc quay của HTĐ E so với HTĐ A quanh trục Ex_e. Các góc tầm ε và hướng β hoàn toàn đo được trong HTĐ liên kết gắn liền với phương tiện mang. Mục tiêu điều khiển là ổn định góc của đường ngắm $\underline{L_E}$ trong HTĐ chuẩn trước những ảnh hưởng của sóng biển tác động lên thân tàu.



Hình 1. Cơ hệ quay quét và các hệ tọa độ sử dụng.

Thuật toán điều khiển bám trong hệ thống điều khiển hỏa lực thực hiện trong thời gian thực với tọa độ của mục tiêu (thường là tọa độ cầu). Tọa độ mục tiêu được tính toán làm đầu vào cho hệ thống điều khiển với hai tham số chính là góc tầm ε và góc hướng β. Vì vậy, tâm quay của cơ hệ cũng là tâm của hệ hỏa lực (đặt tại E). Hình 2 thể hiện cấu trúc của hệ truyền động điện điều khiển hỏa lực rút gọn [3].



Hình 2. Cấu trúc hệ điều khiển ổn định đường ngắm cho pháo 23mm-2M.

Trong Hình 2, khối tính toán phần tử bắn (PTB) nhận giá trị góc từ trung tâm điều khiển cùng giá trị các cảm biến đo nghiêng và đo góc hướng để tính toán đưa ra góc phần tử bắn cho kênh tầm và kênh hướng; khối tạo lệnh điều khiển nhận giá trị góc từ khối tính toán PTB so sánh với giá trị góc đo được từ kênh tầm và kênh hướng tạo lệnh điều khiển để hệ truyền động thông qua khối điều khiển công suất (ĐKCS) luôn bám theo giá trị góc nhận được theo thời gian thực. Khối điều khiển truyền động bám thực hiện triệt tiêu sai lệch giữa giá trị góc nhận được với giá trị góc phản hồi từ hệ truyền động trong thời gian ngắn nhất.

Định nghĩa véc tơ tốc độ góc của HTĐ E, A, B như sau [1]:

$$\underline{\omega_B} = [\omega_{Bx} \quad \omega_{By} \quad \omega_{Bz}]^T;\ \underline{\omega_A} = [\omega_{Ax} \quad \omega_{Ay} \quad \omega_{Az}]^T;\ \underline{\omega_E} = [\omega_{Ex} \quad \omega_{Ey} \quad \omega_{Ez}]^T \tag{1}$$

Trên thực tế ta chỉ đo được $\underline{\omega_B}$. Tuy nhiên nhờ các phép biến đổi tọa độ từ B sang A và từ A sang E ta hoàn toàn xác định được $\underline{\omega_A}$ và $\underline{\omega_E}$ theo $\underline{\omega_B}$.

Gọi J_A và J_E là ma trận mô men quán tính của khối tầm và khối hướng. Ta chỉ xét ảnh hưởng của mô men quán tính trục chính nên J_A và J_E có dạng ma trận đường chéo.

$$J_A = \text{diag}[J_{Ax} \quad J_{Ay} \quad J_{Az}]^T;\ \ J_E = \text{diag}[J_{Ex} \quad J_{Ey} \quad J_{Ez}]^T \tag{2}$$

Theo nghiên cứu [1], mô men ngoại lực M_{Ex} tác động lên kênh tầm là:

$$M_{Ex} = J_{Ex}\ddot{\varepsilon} + \frac{1}{2}(J_{Ez} - J_{Ey})\dot{\beta}^2 \sin 2\varepsilon + M_{Ed} \tag{3}$$

Với M_{Ed} là nhiễu chuyển động do sóng biển đánh vào thân tàu tạo nên. Nhiễu này được tổng hợp từ việc đo gián tiếp các chuyển động lắc của thân tàu nhờ cảm biến đo lường quán tính (IMU), qua đó nhận được các vận tốc góc $(\omega_{Bx}, \omega_{By}, \omega_{Bz})$ từ IMU và các vận tốc góc tính toán $(\omega_{Ax}, \omega_{Ay}, \omega_{Az})$, $(\omega_{Ex}, \omega_{Ey}, \omega_{Ez})$ thông qua các phép quay HTĐ.

$$\begin{aligned} M_{Ed} = {} & \dot{\omega}_{Ax} J_{Ex} + (\omega_{Bz}\omega_{Ay} + \dot{\beta}\omega_{Ay})(J_{Ez} - J_{Ey})\cos 2\varepsilon \\ & + \frac{1}{2}(\omega_{Bz}^2 + 2\omega_{Bz}\dot{\beta} - \omega_{Ay}^2)(J_{Ez} - J_{Ey})\sin 2\varepsilon \end{aligned} \tag{4}$$

Khi bỏ qua ma sát nhớt và ma sát Coulomb, mô men ngoại lực M_{Ex} chỉ bao gồm mô men sinh ra từ cơ cấu chấp hành (CCCH) M_{Ew}. Gọi tỉ số truyền và hiệu suất truyền mô men tương ứng là $i_E,\ \eta_E$. Gọi mô men đầu trục động cơ là M_{Em}. Mô men sinh ra từ CCCH M_{Ew} tác động lên cơ hệ khối tầm: $M_{Ex} = M_{Ew} = i_E \eta_E M_{Em}$. Mô hình động lực kênh tầm nhận được:

$$\frac{J_{Ex}}{i_E \eta_E}\ddot{\varepsilon} + \left(\frac{J_{Ez} - J_{Ey}}{2 i_E \eta_E}\dot{\beta}^2 \sin 2\varepsilon + \frac{M_{Ed}}{i_E \eta_E}\right) = M_{Em} \tag{5}$$

Tương tự đối với kênh hướng, mô men ngoại lực tác động lên khối hướng:

$$M_{Az} = J_{Az_\Sigma}\ddot{\beta} - \left(J_{Ez} - J_{Ey}\right)\dot{\beta}\dot{\varepsilon}\sin 2\varepsilon + M_{Ad} \quad (6)$$

Với M_{Ad} là nhiễu chuyển động do sóng biển đánh vào thân tàu gây ra.

$$\begin{aligned} M_{Ad} = &-\omega_{Bz}\dot{\varepsilon}\left(J_{Ez} - J_{Ey}\right)\sin 2\varepsilon + \left(J_{Az} + J_{Ey}\sin^2\varepsilon + J_{Ez}\cos^2\varepsilon\right)\dot{\omega}_{Bz} \\ &-\frac{1}{2}\dot{\omega}_{Ay}\left(J_{Ez} - J_{Ey}\right)\sin 2\varepsilon - \omega_{Ay}\dot{\varepsilon}\left(J_{Ez} - J_{Ey}\right) \\ &-\omega_{Ay}\left(\omega_{Ax}J_{Ax} + \omega_{Ex}J_{Ex}\right) + \omega_{Ax}\left(\omega_{Ay}J_{Ay} + \omega_{Ey}J_{Ey}\cos\varepsilon - \omega_{Ez}J_{Ez}\sin\varepsilon\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Khi bỏ qua mô men ma sát nhớt, mô men ma sát Coulomb, mô men ngoại lực M_{Az} tác động lên khối hướng sẽ tỉ lệ với mô men đầu trục động cơ M_{Am}. Gọi tỉ số truyền và hiệu suất truyền mô men tương ứng là $i_A,\ \eta_A$. Từ đó ta có $M_{Az} = M_{Aw} = i_A\eta_A M_{Am}$ và nhận được mô hình động lực kênh hướng:

$$\frac{J_{Az} + J_{Ey}\sin^2\varepsilon + J_{Ez}\cos^2\varepsilon}{i_A\eta_A}\ddot{\beta} + \left(\frac{J_{Ey} - J_{Ez}}{i_A\eta_A}\dot{\beta}\dot{\varepsilon}\sin 2\varepsilon + \frac{M_{Ad}}{i_A\eta_A}\right) = M_{Am} \quad (8)$$

2.2. Động hình học hệ ổn định đường ngắm cho pháo 23mm-2M

Mục tiêu điều khiển là ổn định được góc λ_1, λ_2 dưới tác động của sóng biển. Trong [2] đã nghiên cứu quy luật chuyển động của cơ hệ truyền động tầm hướng thấy rằng, khi mũi tàu chúc xuống, để ổn định được góc tầm trong HTĐ cố định mặt đất thì kênh tầm cần phải nâng lên. Tương tự đối với các chuyển động của kênh hướng, khi mũi tàu xoay sang trái thì kênh hướng cần phải xoay sang phải để bù cho chuyển động ngược pha góc hướng. Gọi cự ly $\mathcal{D}$ là khoảng cách từ tâm pháo đến mục tiêu M (Hình 1). Từ Hình 1, véc tơ đường ngắm $\underline{L}_E$ trong HTĐ gắn với khối tầm là:

$$\underline{L}_E = [0\ \ \mathcal{D}\ \ 0]^T \quad (9)$$

Khi đó véc tơ đường ngắm $\underline{L}_O$ trong HTĐ chuẩn:

$$\underline{L}_O = [\mathcal{D}\cos\lambda_2\cos\lambda_1\ \ \mathcal{D}\cos\lambda_2\sin\lambda_1\ \ \mathcal{D}\sin\lambda_2]^T \quad (10)$$

Vì $\underline{L}_E$ nhận được từ các phép biến đổi góc quay Euler (theo thứ tự Roll, Pitch, Yaw) $R_{xyz}(\phi,\theta,\psi)$ và các phép quay $R_z(\beta)$, $R_x(\varepsilon)$ nên:

$$\underline{L}_\mathrm{E} = R_x(\varepsilon)R_z(\beta)R_{xyz}(\phi,\theta,\psi)\underline{L}_O \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \underline{L}_O &= \left[R_{xyz}(\phi,\theta,\psi)\right]^{-1}[R_z(\beta)]^{-1}[R_x(\varepsilon)]^{-1}\underline{L}_E \\ &= \left[R_{xyz}(\phi,\theta,\psi)\right]^T[R_z(\beta)]^T[R_x(\varepsilon)]^T\underline{L}_E \end{aligned} \quad (12)$$

Đặt R_{LOS} là phép biến đổi tổng quát:

$$R_{LOS} = \left[R_{xyz}(\phi,\theta,\psi)\right]^T[R_z(\beta)]^T[R_x(\varepsilon)]^T \overset{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Đối với các phần tử của các ma trận trong R_{LOS}, viết tắt $\sin \overset{\text{def}}{=} s$; $\cos \overset{\text{def}}{=} c$, và ký hiệu các đối số $\phi, \theta, \psi, \beta, \varepsilon$ tương ứng với các chỉ số dưới theo thứ tự là 1, 2, 3, 4, 5. Theo đó, nhận được các ma trận (14), (15) như sau:

$$\left[R_{xyz}(\phi,\theta,\psi)\right]^T = \begin{bmatrix} c_2c_3 & s_1s_2c_3 - c_1s_3 & c_1s_2c_3 + s_1s_3 \\ c_2s_3 & s_1s_2s_3 + c_1c_3 & c_1s_2s_3 - s_1c_3 \\ -s_2 & c_2s_1 & c_2c_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[R_z(\beta)]^T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [R_x(\varepsilon)]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_5 & -s_5 \\ 0 & s_5 & c_5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Vì $\underline{L}_E$ gắn với trục *Ey* nên $\underline{L}_O$ chỉ phụ thuộc vào các phần tử ở cột thứ 2 của ma trận R_{LOS}.

$$\underline{L}_O \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathcal{D} \\ 0 \end{bmatrix} = [r_{12}\ \ r_{22}\ \ r_{32}]^T \quad (16)$$

Với: $r_{12} = \mathcal{D}[-c_2c_3s_4c_5 + (s_1s_2c_3 - c_1s_3)c_4c_5]$ (17)

$$r_{22} = \mathcal{D}[-c_2s_3s_4c_5 + (s_1s_2s_3 + c_1c_3)c_4c_5 + (c_1s_2s_3 - s_1c_3)s_5] \quad (18)$$

$$r_{32} = \mathcal{D}[s_2s_4c_5 + s_1c_2c_4c_5 + c_1c_2s_5] \quad (19)$$

Đồng nhất (10) và (16) nhận được góc đường ngắm của pháo trong HTĐ chuẩn:

$$\lambda_1 = \begin{cases} \text{arctg}\left(\dfrac{r_{22}}{r_{12}}\right): r_{12} \neq 0 \\ \pi/2: r_{12} = 0,\ r_{22} < 0 \\ -\pi/2: r_{12} = 0,\ r_{22} > 0 \end{cases}; \qquad \lambda_2 = \arcsin(r_{32}) \quad (20)$$

Như vậy bài toán đặt ra là cần phải điều khiển các góc trục ε, β với mô hình động lực (5), (8) trong HTĐ chuyển động để sao cho ổn định được góc λ_1, λ_2 trong HTĐ chuẩn.

3. Tổng hợp thuật toán điều khiển cho hệ ổn định đường ngắm dựa trên RISE

Hệ truyền động ổn định (hoặc bám) của pháo 23mm-2M gồm 2 kênh điều khiển tầm và hướng. Đây là một hệ phi tuyến bất định điển hình, chịu tác động của nhiễu. Tính bất định của hệ thống liên quan đến sự tác động xuyên chéo giữa các kênh. Nếu xem thành phần mô men quán tính của khối tầm với trục quay hướng như là một thành phần nhiễu bất định thì ta hoàn toàn có thể tổng hợp bộ điều khiển độc lập cho từng kênh chuyển động tầm, hướng.

Xem xét động lực học của các kênh tầm hướng mô tả dưới dạng tổng quát (21):

$$D(q)\ddot{q} + f = u \quad (21)$$

Trong (21), tọa độ suy rộng q đại diện cho các góc quay β, ε; biến u đại diện cho tín hiệu điều khiển mô men đầu trục động cơ M_{Am}, M_{Em}; biến f đại diện cho tổng nhiễu phụ thuộc thời gian và trạng thái. Đặt trạng thái sai lệch vị trí e_1 và sai lệch phụ e_2, trạng thái trung gian r như (22), với q_d là vị trí mong muốn trong HTĐ chuẩn, α_1, α_2 là các hằng số thực dương.

$$e_1 = q_d - q; \ \ e_2 = \dot{e}_1 + \alpha_1 e_1; \ \ \ r = \dot{e}_2 + \alpha_2 e_2 \quad (22)$$

Kết hợp (21) và (22) ta có: $D(q)(\ddot{q}_d - \ddot{e}_1) + f = u$

$$\Longrightarrow D(q)r = D(q)(\ddot{q}_d + \alpha_1\dot{e}_1 + \alpha_2 e_2) + f - u \quad (23)$$

Để có thể áp dụng nguyên lý điều khiển RISE được phát triển trong [6-8], ta cần đưa mô hình (23) về dạng chuẩn tắc (24) bằng cách lấy đạo hàm theo thời gian hai vế của (23):

$$D(q)\dot{r} = -\frac{1}{2}\dot{D}(q)r - e_2 - \dot{u} + N \tag{24}$$

$$N = \dot{D}(q)(\ddot{q}_d + \alpha_1\dot{e}_1 + \alpha_2 e_2) - D(q)(\ddot{q}_d + \alpha_1\ddot{e}_1 - \alpha_2\dot{e}_2) - \frac{1}{2}\dot{D}(q)r + e_2 + \dot{f} \tag{25}$$

Trong (25), nhiễu N phụ thuộc trạng thái và là hàm trơn. Nhiễu N gồm 2 thành phần: Thành phần danh định N_d gồm đại lượng biết trước và thành phần sai lệch $\widetilde{N}$ gồm các đại lượng phụ thuộc vào các biến trạng thái chưa biết.

$$N_d = N|_{(q=q_d,\ \dot{q}=\dot{q}_d,\ \ddot{q}=\ddot{q}_d)} = \dot{D}(q_d)\ddot{q}_d - D(q_d)\ddot{q}_d + \dot{f}(q_d, \dot{q}_d) \tag{26}$$

$$\widetilde{N} = N - N_d \tag{27}$$

Vì là hàm trơn nên các thành phần $N_d, \widetilde{N}$ bị chặn theo (28), (29):

$$|N_d| \le \xi_1; \quad |\dot{N}_d| \le \xi_2 \tag{28}$$

$$|\widetilde{N}| \le (\xi_3 + \xi_4\|\underline{x}\|)\|\underline{x}\| \tag{29}$$

Trong đó: $\underline{x} = [e_1 \quad e_2 \quad r]^T$ và ξ_j là hằng số thực dương, $j = 1, \dots, 4$.

Dựa trên kết quả phân tích tích ổn định, chọn luật điều khiển có dạng (30) [8]:

$$u = ke_2(t) + ke_2(0) + \int_0^t \left[k\alpha_2 e_2(\tau) + \gamma \mathrm{sgn}\big(e_2(\tau)\big)\right]d\tau \tag{30}$$

Trong đó: k, γ là các tham số thực dương. Từ (30) ta thấy luật điều khiển được lựa chọn thoả mãn tính chất (31). Việc tích phân hàm $\mathrm{sgn}(*)$ sẽ đảm bảo cho u liên tục.

$$\dot{u} = kr + \gamma \mathrm{sgn}(e_2) \tag{31}$$

Tìm điều kiện để hệ thống điều khiển ổn định

Chọn hàm Lyapunov:

$$V(e_1, e_2, r, P, t) = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}r^2 D(q) + P(t) \tag{32}$$

Trong đó hàm $P(t)$ được định nghĩa như (33), là hàm của các biến trạng thái.

$$P(t) = [\gamma|e_2(0)| - e_2(0)N_d(0)] - \int_0^t L(\tau)d\tau \tag{33}$$

$$L(t) = r[N_d - \gamma \mathrm{sgn}(e_2)];\ \gamma \ge \xi_1 + \frac{\xi_2}{\alpha_2} \tag{34}$$

Với việc chọn γ theo điều kiện (34), nghiên cứu [8] đã chứng minh $P(t)$ là hàm thực dương. Như vậy $V(e_1, e_2, r, P, t) > 0$ với $\forall\, e_1, e_2, r, P$.

Từ (33) ta tính được đạo hàm của $P(t)$:

$$\dot{P}(t) = -L(t) = -r[N_d - \gamma \mathrm{sgn}(e_2)] \tag{35}$$

Lấy vi phân hàm Lyapunov dọc theo quỹ đạo các trạng thái e_1, e_2, r, P:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + rD\dot{r} + \frac{1}{2}\dot{D}r^2 + \dot{P}(t) \\ &= e_1(e_2 - \alpha_1 e_1) + e_2(r - \alpha_2 e_2) \end{aligned} \tag{36}$$

$$+ r\left(-\frac{1}{2}\dot{D}r + \tilde{N} + N_d - e_2 - \dot{u}\right) + \frac{1}{2}\dot{D}r^2 - r[N_d - \gamma \text{sgn}(e_2)]$$
$$= e_1 e_2 - \alpha_1 e_1^2 + r e_2 - \alpha_1 e_1^2 + r\tilde{N} + r N_d - r e_2$$
$$- r[kr + \gamma \text{sgn}(e_2)] - r N_d + r\gamma \text{sgn}(e_2)$$
$$\Rightarrow \dot{V}(t) = e_1 e_2 - \alpha_1 e_1^2 - \alpha_1 e_1^2 - k r^2 + r\tilde{N} \quad (37)$$

Sử dụng bất đẳng thức Cauchy đối với e_1^2, e_2^2 và xét điều kiện $r\tilde{N} \le |r||\tilde{N}|$ ta có:

$$\dot{V}(t) \le \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 - (\alpha_1 e_1^2 + \alpha_1 e_1^2) - k r^2 + |r||\tilde{N}|$$
$$\le -\left(\alpha_1 - \frac{1}{2}\right)e_1^2 - \left(\alpha_2 - \frac{1}{2}\right)e_2^2 - k r^2 + |r|\left(\xi_3\|\underline{x}\| + \xi_4\|\underline{x}\|^2\right) \quad (38)$$

Từ (38) ta thấy rằng nếu chọn λ theo (39):

$$\lambda = \min\left[\left(\alpha_1 - \frac{1}{2}\right), \left(\alpha_2 - \frac{1}{2}\right), k_1\right];\ k_1 = k - k_2 > 0 \quad (39)$$

Thì:

$$\dot{V}(t) \le -\left(\lambda - \frac{\xi_3 + \xi_4\|\underline{x}\|^2}{4k_2}\right)\|\underline{x}\|^2 \quad (40)$$

Như vậy, nếu chọn $\gamma \ge \xi_1 + \frac{\xi_2}{\alpha_2}$; $\alpha_1 > \frac{1}{2}$; $\alpha_2 > \frac{1}{2}$ và k_2 đủ lớn thì $\dot{V}(t) \le -c\|\underline{x}\|^2$ với c là một số thực dương. Khi đó hệ thống ổn định toàn cục, $\underline{x} = [e_1 \quad e_2 \quad r]^T \to 0$.

4. Mô phỏng và bình luận

Mô men quán tính danh định của khối tầm và khối hướng:

$$J_A = \text{diag}[0{,}49 \quad 1{,}05 \quad 1{,}25]^T;$$
$$J_E = \text{diag}[0{,}42 \quad 0{,}92 \quad 1{,}16]^T \quad (41)$$

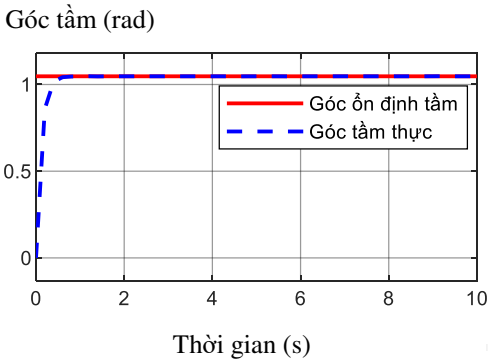
Tỉ số truyền kênh tầm, hướng: $i_E = 160,\ i_A = 160$; hiệu suất: $\eta_E = \eta_A = 100\%$.

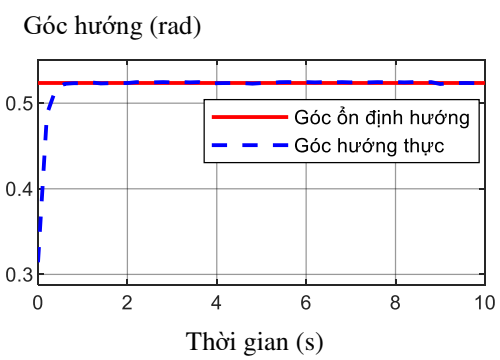
Các tham số của bộ điều khiển (29) được chọn như (42):

$$\alpha_1 = 25; \alpha_2 = 6{,}5; \xi_1 = 0{,}1; \xi_2 = 1{,}5;$$
$$k_1 = 2{,}2; k_2 = 3{,}1; k = 5{,}3; \gamma = 0{,}5 \quad (42)$$

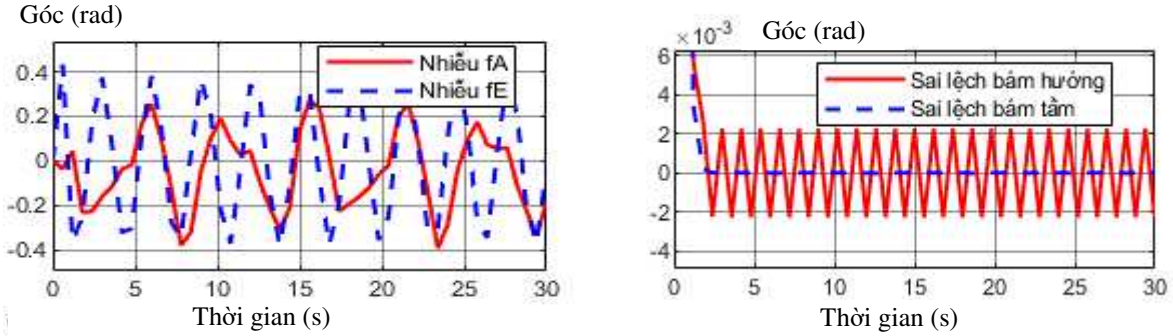
Xem xét ảnh hưởng của chuyển động lắc của tàu như (43) được tham khảo từ các nghiên cứu [2], [5]. Đây là chuyển động của tàu CV-01 hoạt động trong điều kiện sóng cấp 3.

$$\Phi = \frac{9{,}3^0\pi}{180^0}\sin\left(\frac{2\pi}{3{,}1}t\right); \theta = \frac{12{,}3^0\pi}{180^0}\sin\left(\frac{2\pi}{3{,}1}t\right); \psi = \frac{\psi_m\pi}{180^0}\sin\left(\frac{2\pi}{5{,}2}t\right) \quad (43)$$



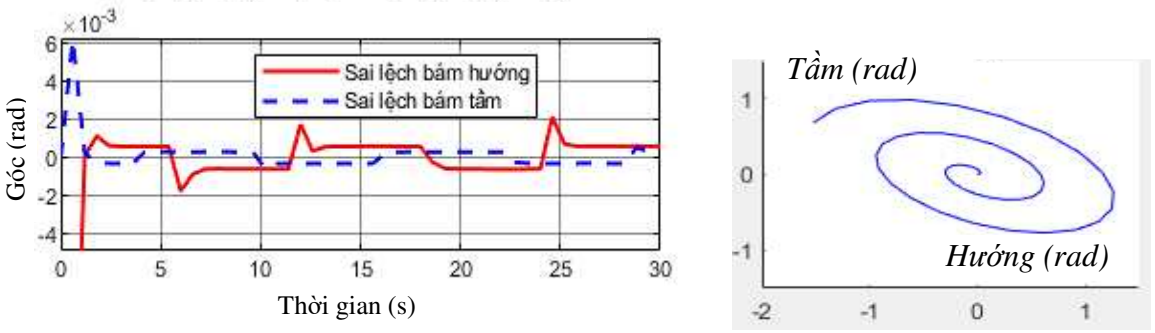


Hình 3. Mô phỏng ổn định góc tầm 60^0 và ổn định góc hướng 30^0.



a) Nhiễu tổng hợp *b) Sai lệch góc bám tầm, hướng*

Hình 4. Nhiễu và sai lệch góc bám phần tử bắn không thay đổi.



a) Sai lệch bám tầm, hướng *b) Chuyển động của đường ngắm*

Hình 5. Mô phỏng với phần tử bắn thay đổi dạng xoắn trôn ốc.

Nhận xét: Hình 3 thể hiện kết quả mô phỏng bám mục tiêu ở vị trí cố định ở góc tầm 60^0 và góc hướng 30^0. Dưới tác động của nhiễu tổng (Hình 4a) hệ truyền động bám đảm bảo sai lệch góc tầm, hướng trong dải ± 2mrad (Hình 4b), đáp ứng chỉ tiêu đặt ra đối với hệ thống điều khiển hỏa lực trong thực tế đã đề cập trong [3]. Hình 5 cho thấy khi phần tử bắn thay đổi dưới dạng xoắn trôn ốc (Hình 5b), dưới tác động của nhiễu tổng hệ thống vẫn ổn định và hệ truyền động tầm, hướng vẫn đảm bảo sai lệch trong phạm vi ± 2mrad (Hình 5a). Trong cả hai trường hợp mô phỏng, sai lệch bám tầm nhỏ hơn sai lệch bám hướng cho thấy tác động của lắc mạn và chuyển đảo mũi lái ảnh làm cho kênh hướng chịu ảnh hưởng nhiều hơn.

5. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu động hình học và động lực học của hệ truyền động tầm, hướng cho pháo 23mm-2M trên tàu biển, ứng dụng thuật toán điều khiển thích nghi bền vững dựa trên vòng hồi tiếp vi phân độ lợi cao RISE cho hệ thống. Tính ổn định của hệ truyền động tầm, hướng được đảm bảo chặt chẽ trên cơ sở lý thuyết Lyapunov. Quá trình mô phỏng được thực hiện trong điều kiện thuận sóng biển cấp 3. Kết quả mô phỏng đã thể hiện sai lệch bám đáp ứng được chỉ tiêu chất lượng đặt ra cho hệ thống này.

Tài liệu tham khảo

1. Vũ Quốc Huy (2017), *"Nghiên cứu tổng hợp hệ thống tự động bám sát mục tiêu cho đài quan sát trên phương tiện cơ động"*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Viện KH-CNQS, Hà Nội.

2. Trương Tất Thuấn, Lê Việt Hồng, and Vũ Quốc Huy, "Research on the Motion Rules of the Pan-Tilt Electromechanical System in the Launch Platform Stabilization System on Ships". *Journal of Military Science and Technology*, No. CAPITI, Apr. 2024, pp. 49-55, doi:10.54939/1859-1043.j.mst.CAPITI.2024.49-55.
3. Phạm Tiến Dũng, Nguyễn Vũ, "Xây dựng hệ thống điều khiển hỏa lực cho ZU23-2N phục vụ biển đảo", *Tạp chí Nghiên cứu KH-CNQS*, Đặc san TĐH, T4-2014, tr. 155-160.
4. Nguyễn Lạc Hồng (2014), "Khảo sát dao động lắc của tàu hải quân khi bắn tên lửa rải nhiễu PK-16"*, Tạp chí Nghiên cứu KH-CN quân sự*, Số 52, tr. 247-255.
5. Tăng Xuân Long (2021), *"Về một giải pháp xác định nội lực liên kết các khâu của bệ phóng vũ khí phá vật cản FMV-T2-HQ đặt trên xuồng CV-01",* Tạp chí Nghiên cứu KH-CN quân sự, Số Đặc san Cơ học và Điều khiển thiết bị bay, tr. 184-190.
6. Baris Bidikli, Enver Tatlicioglu, Alper Bayrak, Erkan Zergeroglu, "A new robust integral of sign of error feedback controller with adaptive compensation gain", *2014 American Control Conference*, pp. 3782-3787, 2014.
7. Baris Bidikli, Enver Tatlicioglu, Erkan Zergeroglu, "A selftuning RISE controller formulation", *2014 American Control Conference*, pp. 5608-5613, 2014.
8. B. Xian, D. M. Dawson, M. S. de Queiroz and J. Chen, "A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems", in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 7, pp. 1206-1211, July 2004.

Synthesis of the light-of-sight stabilization controller for 23mm-2M turret on coast guard ships operating up to 3-level wave based on RISE

Abstract: *The paper studied and synthesized a robust and adaptive control algorithm for the 23mm-2M turret based on the application of high-gain differential feedback loops. Developing the Robust of the Integral of the Sign of Error (RISE), the control law was synthesized based on the correction of the dynamic model of the turret's elevation and azimuth drive system, ensuring no interruption in the control signal. Based on the Lyapunov stability theory, the system was guaranteed to have a tracking error that converged to 0. Simulations were performed in 3-level wave conditions for the CV-01 ship to demonstrate the effectiveness of the control law.*

Keywords: Line-of-sight stabilization, RISE control, 23mm-2M turret.

Nghiên cứu nâng cao chất lượng hệ thống ổn định đầu tự dẫn sử dụng bộ điều khiển kết hợp LQR – Modal

Vũ Quốc Phi[1*], Hoàng Mạnh Tưởng[1], Lê Văn Hùng[2]

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Khoa Vũ khí dưới nước /Học viện Hải quân

*Email: vuquocphi2731@gmail.com, Số điện thoại : 0387524062

Tóm tắt:

Việc nâng cao chất lượng hệ thống ổn định đầu tự dẫn là bài toán quan trọng trong kỹ thuật quân sự. Trong bài báo đưa ra phương án kết hợp bộ điều khiển LQR với bộ điều khiển Modal cho hệ thống ổn định đầu tự dẫn. Việc sử dụng kết hợp hai bộ điều khiển này cho phép nâng cao chất lượng của hệ thống ổn định như đảm bảo được thời gian quá độ, độ quá chỉnh và mô men sinh ra ở động cơ chấp hành nhỏ. Bài báo thực hiện mô phỏng đánh giá phương án kết hợp hai bộ điều khiển LQR – Modal cho hệ thống ổn định đầu tự dẫn trên Matlab Simulink. Kết quả mô phỏng thể hiện được hiệu quả của phương án kết hợp giữa bộ điều khiển Modal và bộ điều khiển LQR.

Từ khoá: *ổn định đường ngắm; điều khiển Modal; điều khiển LQR.*

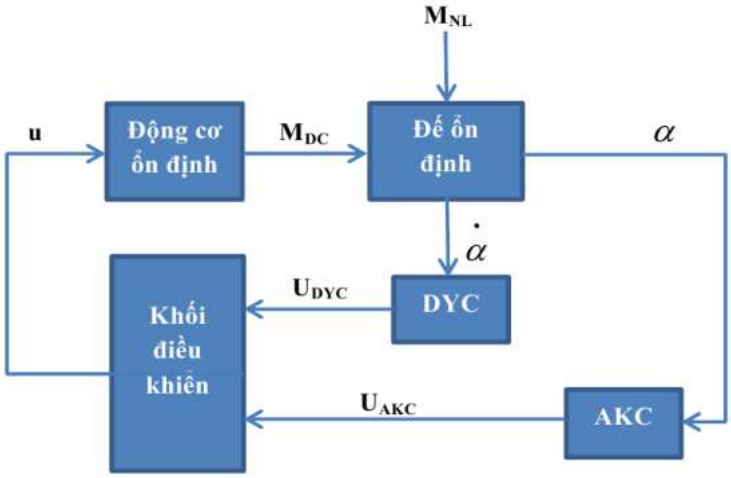
1. Đặt vấn đề

Trên các thiết bị bay không người lái hay tên lửa, đầu tự dẫn được sử dụng để đưa ra thông tin phục vụ cho bài toán điều khiển các thiết bị này đến mục tiêu [1]. Để xác định vị trí mục tiêu đầu tự dẫn sử dụng thiết bị quan sát là radar hoặc thiết bị quang học. Trong quá trình đo trục của các thiết bị quan sát này luôn được điều khiển sao cho nó luôn bám sát mục tiêu. Độ chính xác bám sát mục tiêu của các trục thiết bị quan sát sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của đầu tự dẫn. Để đảm bảo độ chính xác bám sát mục tiêu trên đầu tự dẫn sử dụng hệ thống ổn định. Hệ thống này có tác dụng ổn định đường ngắm thiết bị quan sát khi có tác động nhiễu loạn tác động trong thời gian đầu tự dẫn hoạt động. Chất lượng hoạt động của hệ thống ổn định này không chỉ phụ thuộc vào chất lượng các thành phần chức năng mà còn phụ thuộc vào đặc điểm các bộ điều khiển được sử dụng. Do đó việc nghiên cứu sử dụng các phương pháp điều khiển khác nhau cho hệ thống ổn định trên đầu tự dẫn có tính cấp thiết cao.

Ngày nay, trong hệ thống ổn định đầu tự dẫn có thể sử dụng các phương pháp tổng hợp bộ điều khiển khác nhau như phương pháp sử dụng bộ điều khiển Modal, PID, LQR [2]. Bộ điều khiển Modal đảm bảo được các chỉ tiêu chất lượng động học của hệ thống ổn định với mức tiêu hao năng lượng nhỏ, còn bộ điều khiển LQR lại đáp ứng tốt khi hệ thống có nhiễu loạn. Tuy nhiên, bộ điều khiển Modal chịu ảnh hưởng nhiều bởi nhiễu loạn, còn bộ điều khiển LQR lại đòi hỏi năng lượng điều khiển lớn. Nhằm nâng cao chất lượng cho hệ thống ổn định đầu tự dẫn trong bài báo nghiên cứu phương án kết hợp hai bộ điều khiển này.

2. Nâng cao chất lượng hệ thống ổn định đầu tự dẫn

Đối tượng cần ổn định là thiết bị quang học, có trục quang cần ổn định trong quá trình hoạt động. Để ổn định hướng của trục quang hệ thống ổn định gồm kênh hướng và kênh gật. Cơ chế ổn định trục quang học của đầu tự dẫn đối với hai kênh là như nhau và nguyên lý ổn định là theo hai vòng hồi tiếp khép kín: theo vận tốc góc và theo góc. Trong bài báo này sẽ nghiên cứu hệ thống ổn định kênh gật.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống ổn định đầu tự dẫn quang học

Khi có tác động của mô men nhiễu loạn đối với trục thì đế ổn định quay lệch đi góc α. Gia tốc kế đo góc nghiêng trục thiết bị quan sát so với phương ngang, cảm biến tốc độ góc sẽ đo tốc độ góc quay của thiết bị này. Tín hiệu từ hai cảm biến này tương ứng là U_{DYC} và U_{AKC} được đưa đến khối điều khiển để tạo tín hiệu điều khiển cấp cho động cơ ổn định. Động cơ ổn định sinh ra mô men ổn định để ổn định vị trí của thiết bị quang.

Phương trình vi phân mô tả chuyển động hệ thống ổn định đế quanh trục ổn định [3]:

$$J\ddot{\alpha} = M_t sign(\dot{\alpha}) - M_{DC}(U_{DYC}, U_{AKC}) - b\dot{\alpha} + M_{NL} \quad (1)$$

Trong đó:

- J – Momen quán tính của thiết bị quang đầu tự dẫn quanh trục quay;
- α – Góc lệch của trục thiết bị quay so với phương ngang;
- M_t – Hệ số momen ma sát khô trên trục quay thiết bị quang;
- M_{DC} - Momen ổn định do động cơ ổn định sinh ra;
- M_{NL} – Momen nhiễu loạn tác động lên trục quay thiết bị quang;
- b – Hệ số momen ma sát nhớt.

Hàm truyền động cơ ổn định, gia tốc kế và cảm biến tốc độ góc có dạng tương ứng sau [3] :

$$W_{DC}(s) = \frac{K_{DC}}{T_{DC}s + 1} \quad (2)$$

$$W_{AKC}(s) = \frac{U_{AKC}}{\alpha(s)} = \frac{K_{AKC}}{T_{AKC}s + 1} \quad (3)$$

$$W_{DYC}(s) = \frac{U_{DYC}}{\dot{\alpha}(s)} = \frac{K_{DYC}}{T_{DYC}s + 1} \quad (4)$$

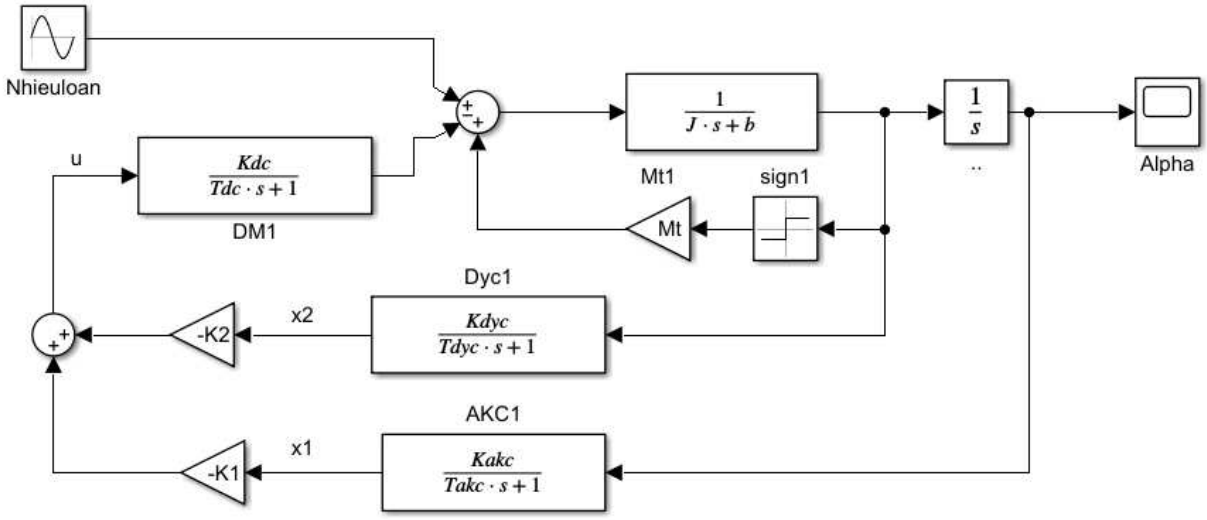
Khi đó biến đổi Laplace phương trình vi phân (1) ta nhận được:

$$Js^2\alpha(s) = M_T sign(s\alpha(s)) - \frac{K_{DC}}{T_{DC}s + 1}u(s) - bs\alpha(s) + M_{NL}(s) \quad (5)$$

Biến đổi tương đương ta nhận được:

$$(Js+b)s\alpha(s) = M_T sign(s\alpha(s)) - \frac{K_{DC}}{T_{DC}s+1}u(s) + M_{NL}(s) \quad (6)$$

Sơ đồ mô phỏng hệ thống ổn định theo phương trình (6) được thể hiện trên Hình 2:



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng hệ thống ổn định đầu tự dẫn quang

Biến trạng thái $x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T$ là tín hiệu đầu ra của gia tốc kế vi cơ và cảm biến tốc độ góc.

Để thuận tiện cho việc xây dựng phương trình không gian trạng thái của hệ thống ổn định đầu tự dẫn thì ta coi hằng số thời gian của động cơ ổn định, hằng số thời gian con quay, hằng số thời gian gia tốc kế rất nhỏ và bỏ qua. Khi đó ma trận của đối tượng điều khiển có dạng:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

Ma trận A, B, C được tính như sau:

Tín hiệu đầu ra: $y = \frac{x_1}{K_{akc}} \Rightarrow C = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_{akc}} & 0 \end{bmatrix}$ (7)

Từ sơ đồ có: $\frac{x_2}{K_{dyc}} = \frac{x_1}{K_{akc}} \Rightarrow x_1 = \frac{K_{akc}}{K_{dyc}} x_2$ (8)

Coi $M_t sign(\dot{\alpha})$ là hàm phi tuyến nhỏ và bỏ qua thì ta có:

$$\frac{x_2}{K_{dyc}} = \frac{1}{J.s+b}(-uK_{dc})$$

Biến đổi tương đương ta nhận được:

$$J\,x_2 + bx_2 = -K_{dc}K_{dyc}u$$

$$x_2 = -\frac{K_{dyc}K_{dc}}{J}u - \frac{b}{J}x_2 \quad (9)$$

Từ các phương trình (7), (8), (9) suy ra:

$$A=\begin{pmatrix} 0 & \frac{K_{akc}}{K_{dyc}} \\ 0 & -\frac{b}{J} \end{pmatrix};\ B=\begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{K_{dyc}K_{dc}}{J} \end{pmatrix};\ C=\begin{bmatrix} \frac{1}{K_{akc}} & 0 \end{bmatrix};$$

Để đảm bảo các chỉ tiêu chất lượng hệ thống ổn định có thể sử dụng bộ điều khiển Modal.-Với bộ điều khiển này, việc xác định tín hiệu điều khiển ở dạng ma trận liên hệ ngược u = -Kx được thực hiện trên cơ sở giải hệ phương trình Sivetra:

$$\begin{cases} MG - AM = BH \\ K = -HM^{-1} \end{cases}$$

Trong đó: $G=\begin{pmatrix} 0 & -2256.25 \\ 1 & -95 \end{pmatrix};\ H=(0 \quad 1)$ là các ma trận tham số của mô hình mẫu [3];

M là ma trận biến đổi và K là ma trận phản hồi tuyến tính dừng cần tìm.

Tuy nhiên, khi sử dụng bộ điều khiển Modal có nhược điểm là chịu ảnh hưởng lớn bởi tác động của nhiễu loạn ngoại lực.

Trong các hệ thống điều khiển sử dụng bộ điều khiển LQR có ưu điểm là khả năng thích ứng tốt với tác động của nhiễu loạn.

Khi sử dụng bộ điều khiển tối ưu LQR tín hiệu tìm được ở dạng u = -Kx trong đó K là ma trận hằng số đối xứng xác định dương và được xác định từ phương trình đại số Riccati:

$$-\overline{K}A - A^T\overline{K} + \overline{K}BR^{-1}B^T\overline{K} - Q = 0$$

Với Q và R là các ma trận xác định dương.

Tín hiệu điều khiển tối ưu có dạng:

$$u^* = -R^{-1}B^T\overline{K}x$$

Việc lựa chọn ma trận Q, R phù hợp sẽ đảm bảo được các chỉ tiêu chất lượng động học yêu cầu cho hệ thống ổn định đầu tự dẫn.

Để tận dụng được ưu điểm của cả bộ điều khiển Modal và bộ điều khiển tối ưu LQR ta thực hiện phương án kết hợp với hệ số phản hồi K(K1, K2) được tính theo biểu thức sau:

$$K = \alpha.K_{Modal} + (1 - \alpha).K_{LQR}$$

Trong đó: α – là trọng số kết hợp do người thiết kế lựa chọn nằm trong khoảng [0-1]. Hệ số kết hợp α sẽ được tính toán cho mỗi hệ thống cụ thể để đảm bảo được tính chất mong muốn của hệ thống.

3. Mô phỏng đánh giá khả năng kết hợp bộ điều khiển Modal và bộ điều khiển LQR

Để khảo sát và tính toán phương án kết hợp cụ thể ta giả sử các thành phần của hệ thống ổn định có hàm truyền như sau:

$$W_{DC}(s) = \frac{K_{DC}}{T_{DC}s+1} = \frac{0,255}{0,00065s+1} \quad (10)$$

$$W_{AKC}(s) = \frac{U_{AKC}}{\alpha(s)} = \frac{K_{AKC}}{T_{AKC}s+1} = \frac{0,936}{0,002s+1} \quad (11)$$

$$W_{DYC}(s) = \frac{U_{DYC}}{\dot{\alpha}(s)} = \frac{K_{DYC}}{T_{DYC}s+1} = \frac{0,487}{0,002s+1} \quad (12)$$

Để đảm bảo các chỉ tiêu chất lượng hệ thống ổn định gồm: thời gian quá độ không lớn hơn 0.1s, độ quá chỉnh không quá 5%, độ rộng dải thiết lập tín hiệu Δ bằng 5% sử dụng bộ điều khiển Modal với các hệ số K1=-3.422; K2=-0.2689 [3].

Khi sử dụng bộ điều khiển tối ưu LQR tính toán được các hệ số K1=-70.7107; K2=-3.9659.

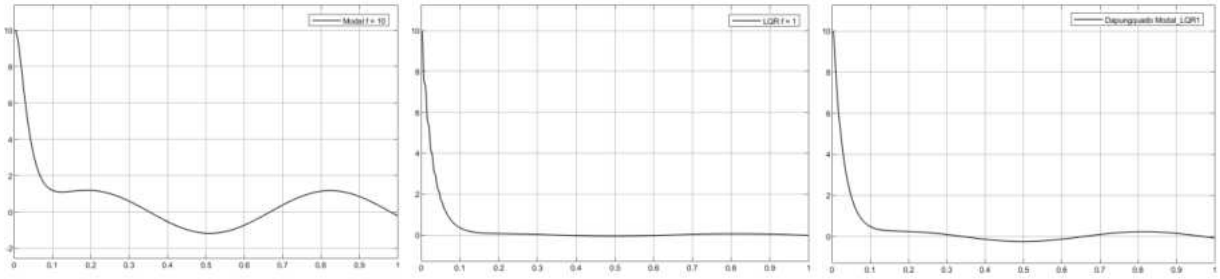
Để xác định được hệ số kết hợp thực hiện mô phỏng đánh giá chất lượng hệ thống với các giá trị α khác nhau và giả thiết momen nhiễu loạn ngoại lực tác động vào hệ thống dạng hình sin với biên độ bằng 1 [N.m] và tần số bằng 10 [Hz]. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả mô phỏng chất lượng hệ thống khi thay đổi hệ số alpha

Hệ số α	**Thời gian quá độ [s]**	**Độ quá chỉnh [%]**	**Độ lớn mô men điều khiển cực đại [N.m]**
0.1	0.0883	0.6306	69.69
0.2	0.0889	0.7047	64.78
0.3	0.0892	0.7986	59.33
0.4	0.0899	0.9213	53.33
0.5	0.0907	1.0887	46.76
0.6	0.0920	1.3302	39.62
0.7	0.0942	1.7096	32.84
0.8	0.0986	2.3914	25.45
0.9	0.1159	3.9769	16.55

Dựa vào bảng kết quả nhận được ta thấy với α =0,8 là hệ số kết hợp đảm bảo chất lượng hệ thống ổn định vừa đảm bảo được thời gian quá độ không lớn hơn 0.1s, độ quá chỉnh không quá 5% và mô men điều khiển sinh ra ở động cơ nhỏ.

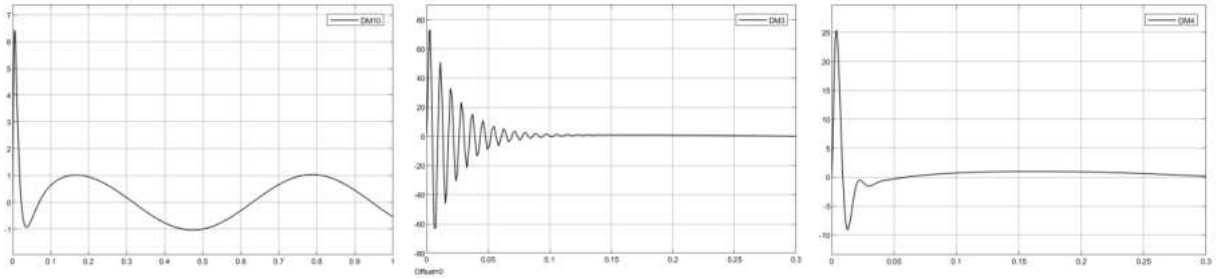
Trên Hình 3 thể hiện quá độ của góc lệch trục quang đầu tự dẫn so với phương ngang.



(a) (b) (c)

Hình 3. Độ lệch trục quang đầu tự dẫn so với phương ngang
a) Độ lệch trục quang đầu tự dẫn khi sử dụng bộ điều khiển Modal; b) Độ lệch trục quang đầu tự dẫn khi sử dụng bộ điều khiển LQR; c) Độ lệch trục quang đầu tự dẫn khi sử dụng kết hợp bộ điều khiển Modal - LQR

Đặc điểm mô men điều khiển sinh ra ở trục của động cơ được thể hiện trên Hình 4.



(a) (b) (c)

Hình 4. Mô men điều khiển sinh ra ở động cơ
a) Mô men điều khiển sinh ra ở động cơ khi sử dụng bộ điều khiển Modal; b) Mô men điều khiển sinh ra ở động cơ khi sử dụng bộ điều khiển LQR; c) Mô men điều khiển sinh ra ở động cơ khi sử dụng kết hợp bộ điều khiển Modal - LQR

Kết quả mô phỏng cho thấy việc sử dụng kết hợp hai bộ điều khiển Modal và bộ điều khiển tối ưu LQR có thể cho phép xây dựng bộ điều khiển vừa đảm bảo được các đặc tính về chất lượng ổn định, vừa đảm bảo mô men sinh ra ở động cơ chấp hành có giá trị nhỏ. Từ đó có thể kết luận rằng việc kết hợp giữa hai bộ điều khiển này có thể làm nâng cao chất lượng của hệ thống ổn định đầu tự dẫn.

4. Kết luận

Nội dung bài báo nghiên cứu, khảo sát phương án kết hợp bộ điều khiển Modal với bộ điều khiển LQR cho hệ thống ổn định đầu tự dẫn quang. Việc kết hợp bộ điều khiển Modal – LQR đã kết hợp được ưu điểm của cả hai bộ điều khiển, vừa đảm bảo các chỉ tiêu chất lượng động học, lại đảm bảo tiêu chí mô men sinh ra ở động cơ nhỏ. Tham số bộ điều khiển kết hợp Modal – LQR được xác định thông qua giá trị trọng số của từng bộ điều khiển. Hệ số kết hợp được lựa chọn thông qua kết quả mô phỏng với các tham số của hệ thống được giả định trước. Kết quả mô phỏng thể hiện hiệu quả của phương án kết hợp bộ điều khiển Modal – LQR.

Tài liệu tham khảo

[1] Rafael Yanushevsky (2007), *Modern Missile Guidance*, CRC Press, 29-30.

[2] George M. Siouris (2004), *Missile Guidance And Control Systems*, Springer, 235-256.

[3] М.Г. Погорелов, Е.И. Понитков (2019), “Модальный синтез гиростабилизатора полезной нагрузки” *Известия ТулГУ. Технические науки,* Вып. 8, 197-210.

[4] В.В. Григорьев, Н.В. Журавлёва, Г.В. Лукьянова, К.А. Сергеев (2007), *Синтез систем автоматического управления методом модального управления*, СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург.

[5] Phạm Trung Dũng, Vũ Xuân Đức (2012), *Cơ sở điều khiển tối ưu trong các hệ thống kỹ thuật*, Hà Nội, 74-78.

Research on improving the quality of the stabilization system for missile seekers using a combined LQR-Modal controller

Abstract: *Improving the quality of the stabilization system for missile seekers is a critical issue in military engineering. This paper proposes a method to combine the LQR controller with the Modal controller for the stabilization system of missile seekers. The integration of these two controllers enhances the system's stability performance and ensures the required dynamic characteristics. The paper also implements a simulation of the combined LQR-Modal controllers for the missile seeker stabilization system using MATLAB Simulink. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach.*

Keywords: line-of-sight stabilization, Modal control; LQR control.

Xây dựng mô hình mô phỏng và xác định các đặc trưng khí động của mẫu máy bay không người lái dạng Heron

Trần Văn Nam[1 *], Bùi Văn Tiến[2], Trần Thế Hùng[3], Phạm Chung[3]

[1]*Hệ QLHVSĐH, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

[2]*Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

[3]*Khoa Hàng không vũ trụ, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

Email: namtrieuqchq@gmail.com; Tel: 033.557.4042

Tóm tắt:

Bài báo trình bày phương pháp xây dựng mô hình tính toán khí động và kết quả tính toán các đặc trưng khí động cho thiết bị bay không người lái (UAV) dạng Heron. Bài báo đưa ra thuật toán mô phỏng khí động sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn bằng phần mềm thương mại Ansys Fluent. Kết quả tính toán các đặc trưng khí động của mô hình được so sánh với kết quả tính toán nhận được từ phầm mềm Missile Datcom và cho thấy sự tương đồng về đặc tính thay đổi của các đặc trưng khí động. Trong bài báo cũng đưa ra và phân tích ảnh hưởng của góc tấn công tới các đặc tính khí động và đặc tính của dòng chảy bao quanh mô hình. Kết quả nghiên cứu của bài báo có thể làm cơ sở và tài liệu tham khảo trong việc nghiên cứu bài toán động lực học và tổng hợp bộ điều khiển chuyển động của thiết bị bay không người lái dạng Heron. Ngoài ra, nghiên cứu cũng là cơ sở để lựa chọn sử dụng cấu hình khí động UAV dạng cánh kép đối với từng nhiệm vụ cụ thể mà UAV đảm nhiệm như trinh sát, vận chuyển, cũng như việc xây dựng bộ ngân hàng dữ liệu về khí động phục vụ cho quá trình thiết kế, chế tạo sau này. Các tham số khí động mở rộng bằng phần mềm Missile Datcom nhằm phục vụ cho các quá trình tính toán động lực và điều khiển tiếp theo.

Từ khóa: *Lực khí động; UAV dạng Heron; Dòng chảy; Missile Datcom; Mô phỏng số.*

1. Đặt vấn đề

Máy bay không người lái (UAV) là dạng phương tiện bay được điều khiển và kiểm soát từ xa. Hiện nay, UAV đang ngày càng trở thành một thành phần quan trọng trong các lĩnh vực quân sự, dân sự và nghiên cứu khoa học nhờ khả năng thực hiện các nhiệm vụ phức tạp, linh hoạt và tiết kiệm chi phí. Đặc điểm chung của máy bay dạng này là cấu trúc đơn giản, khối lượng, kích thước đa dạng, hoạt động rộng rãi, linh hoạt và có thể phát triển thành dạng bầy đàn. Tuy được phát triển mạnh mẽ trong giai đoạn gần đây, các tham số khí động đặc trưng của UAV riêng biệt thường không được công bố. Điều này dẫn tới nhiều khó khăn cho người thiết kế trong việc tiếp cận, phát triển và chế tạo các UAV tương tự [1]. Trong số các loại UAV mới được phát triển gần đây, UAV dạng Heron được phát triển bởi Israel cho thấy nhiều ưu điểm. Đây là UAV cỡ nhỏ, mang hệ thống cảm biến phục vụ trinh sát từ xa, nổi bật với tầm hoạt động rộng và ổn định. Việc tính toán các tham số lực và mô men khí động, nghiên cứu hiểu sâu hơn về cấu trúc dòng chảy, các đặc tính khí động của UAV dạng Heron có vai trò quan trọng, giúp cung cấp dữ liệu cần thiết nhằm phục vụ cho quá trình cải tiến, chế tạo sau này.

Hiện nay, các nghiên cứu về khí động học của máy bay không người lái đang phát triển mạnh mẽ, nhằm cải thiện hiệu suất bay, khả năng điều khiển và tiết kiệm nhiên liệu. Các nghiên cứu này thường tập trung vào việc tối ưu hóa thiết kế khí động học, đặc biệt là cánh và

thân máy bay để giảm lực cản, tăng lực nâng và tăng hiệu quả bay ở nhiều điều kiện bay khác nhau. Các phương pháp nghiên cứu khí động học hiện nay thường gồm sử dụng các công nghệ cảm biến khí động học cho mô hình thật, nghiên cứu mô hình thu nhỏ trong hầm gió hoặc mô phỏng đối tượng đặt trong dòng khí bằng các phần mềm mô phỏng tiên tiến đã giúp hiểu rõ hơn về các tính chất khí động học của UAV. Đối với máy bay không người lái Heron, mặc dù được ứng dụng trong quân sự của nhiều nước, tuy nhiên các nghiên cứu về tham số khí động đặc trưng công bố chưa rộng rãi và đầy đủ trong các điều kiện bài toán khác nhau.

Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng và khảo sát các đặc tính khí động học của UAV dạng Heron để cung cấp cơ sở dữ liệu cho quá trình tính toán động lực học, điều khiển. Bằng sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn, các tham số khí động chính gồm hệ số lực nâng, lực cản được tính toán tại các góc tấn công khác nhau. Dòng chảy trên và quanh mô hình, phân bố áp suất được phân bố giúp giải thích nguyên nhân hình thành lực khí động và hiện tượng thất tốc tại góc tấn lớn. Từ đó, nghiên cứu đưa ra một số kết luận, khuyến cáo liên quan tới UAV để đạt hiệu suất bay cao nhất, tăng khả năng điều khiển và nhằm phục vụ cho việc chế tạo và cải tiến sau này.

2. Xác định các đặc trưng khí động của UAV dạng Heron

2.1. Xây dựng mô hình mô phỏng và miền tính toán

Hình vẽ nguyên mẫu 2D được sử dụng lấy từ tài liệu thuyết minh kỹ thuật của hệ thống Heron cung cấp cho đơn vị trang bị tổ hợp hệ thống Heron [2]. Trên cơ sở đó, chúng tôi đã xây dựng lại mô hình 3D từ Solidworks tương ứng với các tham số hình học của UAV thực. Hình vẽ 3D của mô hình UAV được đưa ra trên Hình 1.



Hình 1. Mô hình 3D dựng từ Solidworks

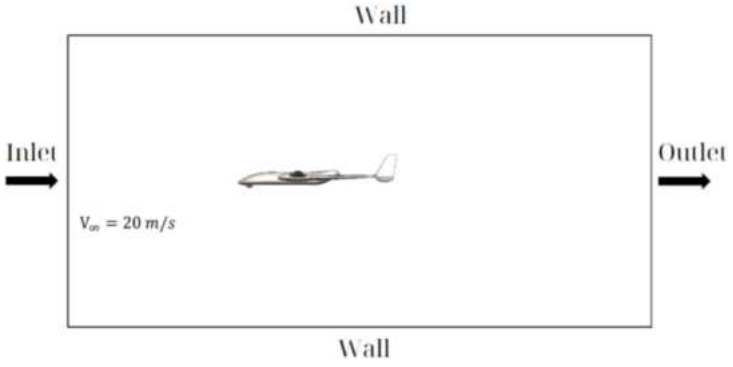
Một trong các thành phần quan trọng là cánh nâng và cánh ổn định của UAV, vì các thành phần này quyết định tới việc hình thành lực nâng và lực cản. Do không có thông số chính xác về biên dạng cánh, nên bài báo dựa trên hình ảnh về các biên dạng cánh [1,2] và lý thuyết về NACA bốn số. Cụ thể, biên dạng cánh được vẽ lại trên phần mềm và từ đó tìm ra mô hình cánh NACA gần giống nhất. Từ các kết quả tính toán, cánh chính và cánh ổn định

ngang của máy bay có biên dạng giống cánh NACA 5323, trong khi cánh ổn định đứng có biên dạng giống cánh NACA 0012. Các cánh này được lựa chọn cho bài toán tính toán khí động. Tham số hình học trong không gian ba chiều của mô hình tính toán được mô tả như trong Bảng 1.

Bảng 1. Bảng tham số hình học của UAV dạng Heron

Tham số khí động	Giá trị
Sải cánh	16,60 m
Diện tích cánh	13,12 m²
Biên dạng cánh và cánh ổn định ngang	NACA 5323
Biên dạng cánh ổn định đứng	NACA 0012
Dây cung gốc cánh	1 m
Dây cung đầu cánh	0,5 m
Sải cánh ổn định ngang	3,02 m
Diện tích cánh ổn định ngang	2,3 m^2
Dây cung cánh ổn định ngang	0,76 m
Chiều cao cánh ổn định đứng	0,663 m
Diện tích cánh ổn định đứng	0,833 m^2

Miền tính toán được xây dựng dạng hình hộp chữ nhật có kích thước dài, rộng và cao là 90 m × 60 m × 40 m. Vùng tính toán lớn giúp mô tả được đầy đủ các hiện tượng dòng chảy quanh mô hình. Kích thước vùng tính toán được mô tả trên Hình 2. Đầu vào được lựa chọn vận tốc bằng 20 m/s (và 60 m/s), đầu ra lựa chọn là pressure outlet (áp suất), các mặt còn lại lựa chọn là tường.



Hình 2. Vùng tính toán xung quanh UAV trong Ansys Fluent

2.2. Phương pháp tính toán đặc trưng khí động

Các tham số khí động được tính toán bằng hai phương pháp, bao gồm tính toán trên Ansys Fluent và bằng sử dụng phần mềm Missile Datcom. Mô hình hóa và tính toán bằng hai phương pháp này được trình bày cụ thể như sau:

a. Sử dụng phần mềm Ansys Fluent

Ansys Fluent là phần mềm cung cấp các công cụ mạnh mẽ để mô phỏng các loại dòng chảy khác nhau. Nó hỗ trợ phân tích dòng chảy với nhiều hình dạng và cấu hình khác nhau, từ dòng chảy trong ống, qua cánh quạt, cho đến các cấu trúc khí động học phức tạp như cánh máy bay. Ansys Fluent cung cấp nhiều mô hình dòng chảy rối khác nhau, bao gồm RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation), và DES (Detached Eddy Simulation), giúp phân tích dòng chảy trong các điều kiện phức tạp.

Phương pháp trung bình Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) được sử dụng trong tính toán phân bố trường vận tốc, dòng chảy và áp suất trung bình quanh mô hình. Phương pháp này dựa trên trung bình phương trình Navier-Stocks và bỏ qua ảnh hưởng của thời gian lên đặc tính của dòng chảy. Mặc dù hạn chế trong phân tích cụ thể đặc tính không dừng của dòng chảy, mô hình RANS cho kết quả tương đối chính xác đối với dòng chảy trung bình, đồng thời giúp giảm thời gian tính toán và được sử dụng rất rộng rãi trong nghiên cứu gần đây [3,4]. Phương pháp RANS dựa trên trung bình hóa phương trình Navier-Stockes (1) được viết như sau [5]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \\ \dfrac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \dfrac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\dfrac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) + \dfrac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i^{"} u_j^{"}) \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó *i, j* = 1,2,3; μ là độ nhớt động học, u_i là thành phần vận tốc trung bình; $u_i^{"}$ là thành phần dao động vận tốc trung bình; *p* là áp suất; ρ là mật độ không khí; x_i là tọa độ, *t* là thời gian.

Để tính tới ảnh hưởng rối, mô hình chảy rối *k-ε* được sử dụng. Đây là mô hình rối hoàn chỉnh đơn giản nhất và có phạm vi ứng dụng rộng rãi được đề xuất bởi B. Launder và đồng nghiệp [6]. Mô hình này được sử dụng cho dòng chảy trên bề mặt phẳng hoặc có tính đến tách hợp dòng tại vùng gradient áp suất nhỏ. Hai phương trình bổ sung cho động năng chảy rối *k* và độ tiêu tán năng lượng *ε* được thể hiện trong công thức dưới đây:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho\varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

Trong đó các hệ số được xác định như sau:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; C_\mu = 0{,}0845; \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0{,}72$$

μ_t là độ nhớt xoáy động học; C_μ là hệ số mô hình; σ_k, σ_ε là các hệ số nhiễu loạn.

Thuật toán SIMPLE cho dòng không nén, dưới âm được áp dụng. Đạo hàm của vận tốc, áp suất và các tham số khác được lựa chọn dạng bậc hai. Mô phỏng được thực hiện ở trạng thái ổn định (*steady simulation*) cho dòng khí không nén được.

Tham số được lưu là các tham số vật lý về dòng chảy và tham số khí động gồm hệ số lực nâng và hệ số lực cản. Kết quả được lấy bằng cách lấy trực tiếp dữ liệu trên Fluent Results mục Forces và mục Graphics. Các tham số điều kiện được tóm tắt trong Bảng 2.

Bảng 2. Các tham số điều kiện mô phỏng

Tham số	**Giá trị**
Vận tốc dòng chảy	20 m/s và 60 m/s
Góc tấn công	Từ 0º đến 22º, bước 2º
Cường độ rối đầu ra	10 %
Áp suất đầu ra	0
Dạng tường	Rắn tuyệt đối có nhớt
Độ hội tụ của bài toán	Dưới 10^{-5}
Số bước dừng của bài toán	Tối thiểu 1000

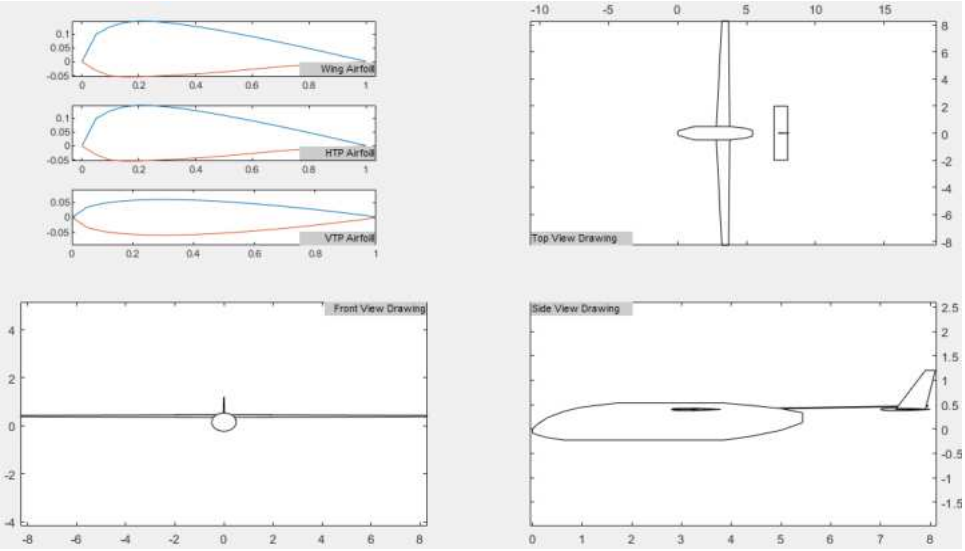
b. Sử dụng phần mềm Missile Datcom

Missile DATCOM là một phần mềm được phát triển bởi Không quân Hoa Kỳ để tính toán các đặc tính khí động học của các tên lửa đạn đạo và các loại thiết bị bay khác. Các tham số của mô hình được thể hiện trong Bảng 1. Các tham số điều kiện được sử dụng cho mô phỏng được tóm tắt trong Bảng 3.

Bảng 3. Các tham số điều kiện mô phỏng

Tham số	**Giá trị**
Vận tốc	20 m/s và 60 m/s
Góc tấn công	Từ 0º đến 22º, bước 2º
Trọng lượng	1150 kg
Dạng động cơ	Cánh quạt

Mô hình UAV được thiết lập bằng Missile Datcom như Hình 3.



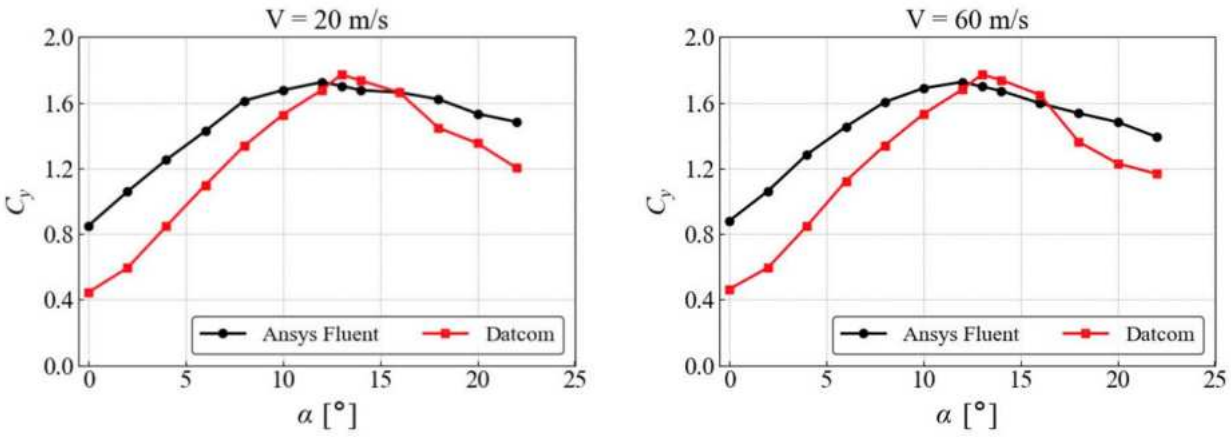
Hình 3. Mô hình xây dựng bằng Missile Datcom

Tuy nhiên, Missile Datcom có những hạn chế về xây dựng mô hình, đặc biệt các mô hình phức tạp nên chúng tôi lược bỏ xà dọc bên phải và trái, đồng thời dịch chuyển cánh ổn định đứng về mặt phẳng trục dọc của UAV để đảm bảo khảo sát được.

3. Kết quả và thảo luận

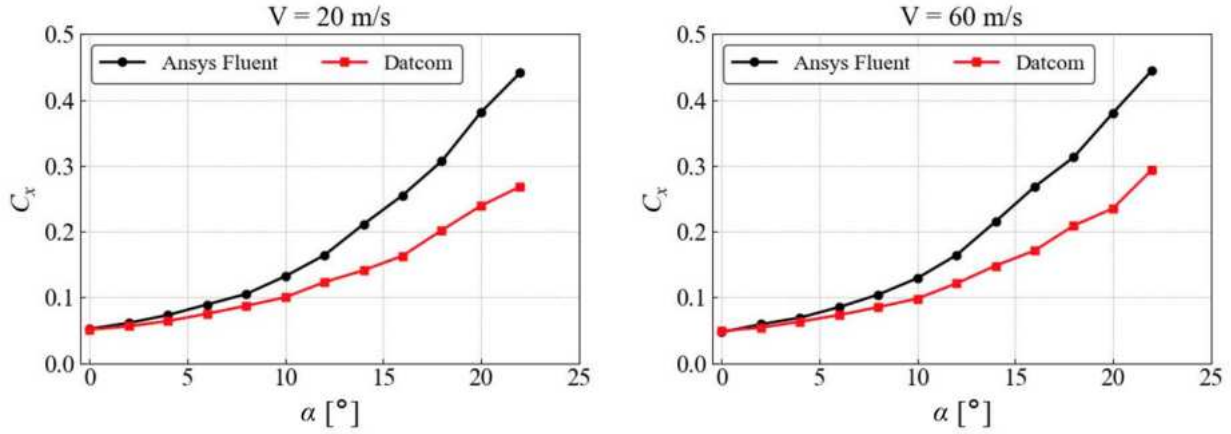
3.1. Lực và tham số khí động

Kết quả xác định các hệ số khí động của UAV dạng Heron ở vận tốc thấp 20 m/s và vận tốc cao 60 m/s cùng các góc tấn công khác nhau khi sử dụng phần mềm Ansys Fluent và Missile Datcom được thể hiện thông qua Hình 4 và Hình 5. Có thể thấy rằng kết quả hệ số lực cản và hệ số lực nâng khác nhau nhưng xu hướng thay đổi tương đối giống nhau. Đối với hệ số lực nâng được thể hiện trong Hình 4, kết quả cho thấy điểm chung là hệ số đều tăng khi góc tấn công tăng tới góc trong phạm vi 12º và sau đó xảy ra hiện tượng thất tốc, hệ số lực nâng giảm sau khi góc tấn công lớn hơn quá 13º. Các hệ số tính toán được từ góc tấn 10º đến 18º tương đối giống nhau với sai số dưới 10 %, trong đó tại góc tấn 16º (vận tốc 20 m/s) có độ chính xác gần như tuyệt đối với sai số 0,06 %. Tuy nhiên, các góc tấn công còn lại có biên độ sai lệch lớn, lớn nhất là tại góc tấn 0º của cả hai vận tốc với sai lệch 47 %. Lý giải cho điều này có thể do sự khác biệt về mô phỏng khi phần mềm Ansys Fluent được tính toán trên mô hình 3D còn Missile Datcom được tính toán trên 2D gây ra độ chính xác của các phần mềm khác nhau. Cùng với đó, việc xây dựng không hoàn toàn chính xác với mô hình thật của Missile Datcom cũng ảnh hưởng tới kết quả tính toán.



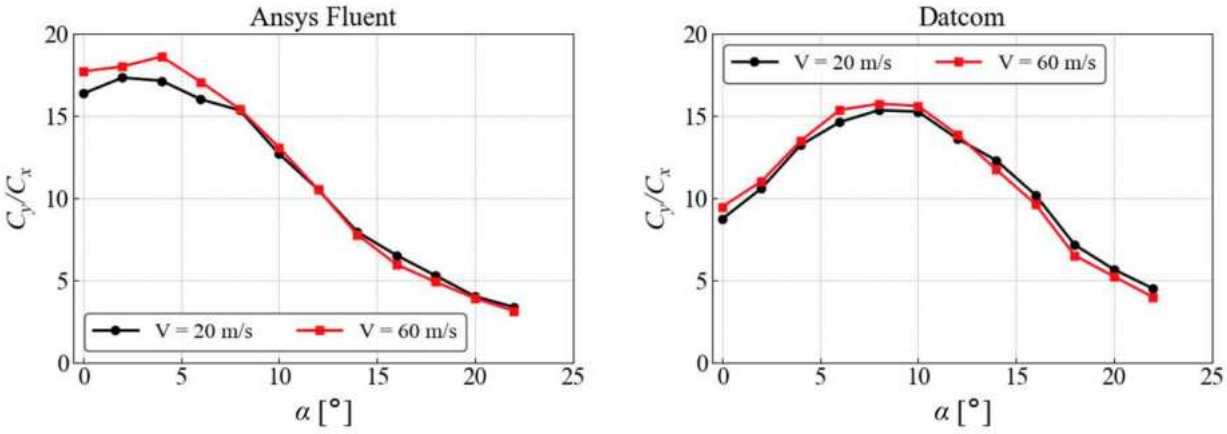
Hình 4. Sự thay đổi của $C_y(\alpha)$ theo góc tấn với vận tốc 20 m/s và 60 m/s

Đối với hệ số lực cản được thể hiện trong Hình 5, kết quả cho thấy điểm chung về xu hướng thay đổi khi hệ số tăng cùng với góc tấn. Các hệ số tính toán được từ góc tấn 0º đến 4º tương đối giống nhau với sai số dưới 10 %, trong đó tại góc tấn 0º (vận tốc 20 m/s) có sai số ít nhất là 1,9 %. Tuy nhiên, sai lệch của 2 phần mềm có xu hướng tăng dần khi góc tấn công tăng, lớn nhất là tại góc tấn 22º (vận tốc 20 m/s) với sai lệch 39 %. Nguyên nhân sai số cũng được giải thích do sự khác biệt về mô hình tính toán của hai phần mềm và việc cắt giảm cánh ổn định đứng của mô hình Missile Datcom. Phần mềm Datcom cho thấy ưu việt khi tính toán nhanh các tham số khí động và xác định góc thất tốc tuy nhiên độ chính xác có sự hạn chế.



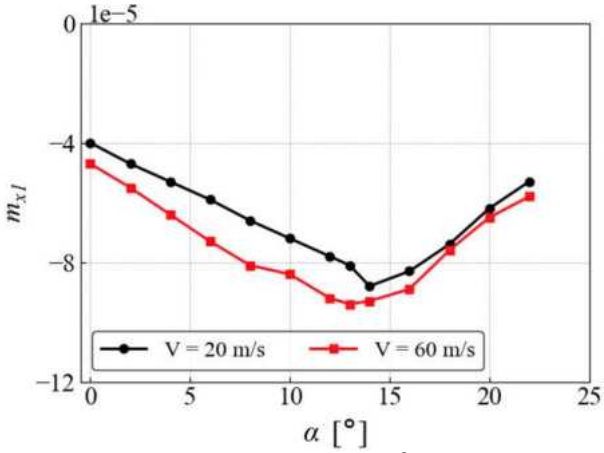
Hình 5. Sự thay đổi của $C_x(\alpha)$ theo góc tấn với vận tốc 20 m/s và 60 m/s

Chất lượng khí động (C_y/C_x) của hai mô hình được thể hiện trong Hình 6. Kết quả tính toán trên hai phần mềm cho thấy vận tốc 20 m/s và 60 m/s không ảnh hưởng quá nhiều đến hiệu suất của UAV. Mô hình Ansys Fluent hoạt động với hiệu suất cao nhất với góc tấn từ 2º đến 4º trong khi mô hình của Missile Datcom là 8º. Nguyên nhân là kết quả tính toán có sự sai lệch của các hệ số lực nâng và lực cản ở trên.

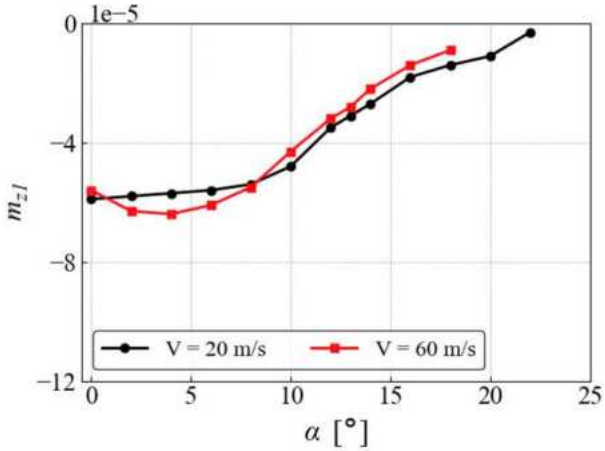


Hình 6. Chất lượng khí động của hai mô hình

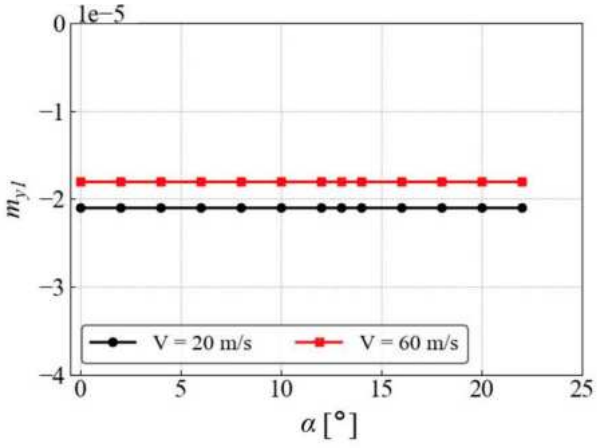
Ngoài các tham số khí động hệ số lực cản và hệ số lực nâng, phần mềm Missile Datcom còn tính toán các tham số khí động đặc trưng quan trọng khác nhằm phục vụ cho quá trình xây dựng mô hình và khảo sát động lực học chuyển động của UAV. Các tham số bao gồm đạo hàm hệ số mô-men gật m_{z1}, đạo hàm hệ số mô-men hướng m_{y1}, đạo hàm hệ số mô-men liệng m_{x1} được thể hiện trong Hình 7. Nhận thấy rằng, tốc độ 20 m/s và 60 m/s không làm thay đổi nhiều các tham số khí động đạo hàm hệ số mô-men. Đạo hàm hệ số mô-men gật m_{z1} có xu hướng giảm dần khi tăng giá trị góc tấn, đạo hàm hệ số mô-men hướng m_{y1} không thay đổi còn đạo hàm hệ số mô-men liệng m_{x1} biến thiên giảm dần đến góc tấn công 13° thì đảo chiều thay đổi theo xu hướng tăng dần.



a) Đạo hàm hệ số m_{x1}



b) Đạo hàm hệ số m_{z1}

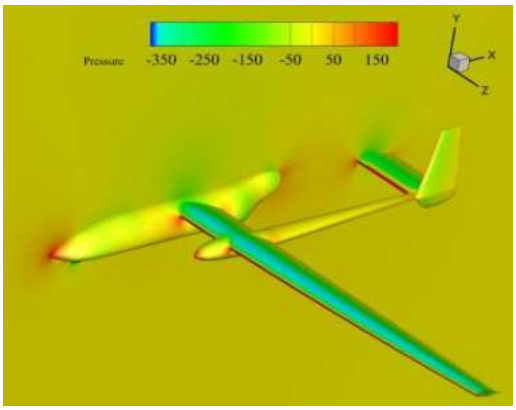


c) Đạo hàm hệ số mô-men hướng m_{y1}

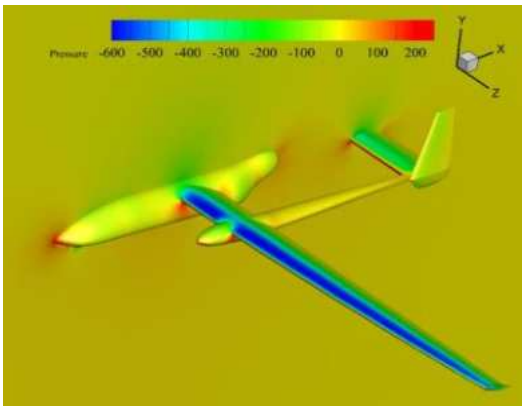
Hình 7. Tham số đạo hàm hệ số mô-men

3.2. Phân bố áp suất xung quanh UAV

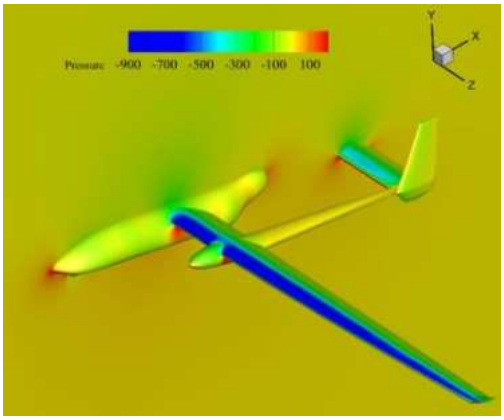
Hình 8 chỉ ra phân bố áp suất trên UAV tại các góc tấn khác nhau với vận tốc 20 m/s. Có thể thấy rằng tại góc tấn lớn từ 12º trở lên xuất hiện vùng áp suất thấp trên tại vùng cánh đuôi ngang. Điều này tạo ra cấu trúc xoáy không ổn định ảnh hưởng tới độ bền và tính ổn định của mô hình. Vùng áp suất thấp này cũng phát triển tại mặt trên của cánh chính điều này dẫn đến sự tăng của các hệ số lực. Với các góc tấn lớn hơn 12º, áp suất trên mặt trên của cánh nhỏ đi và có sự phân bố không đồng đều dẫn đến hiện tượng thất tốc khiến UAV có thể mất ổn định.



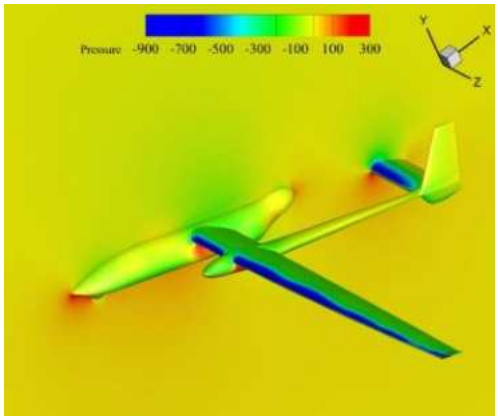
a) 0º



b) 6º



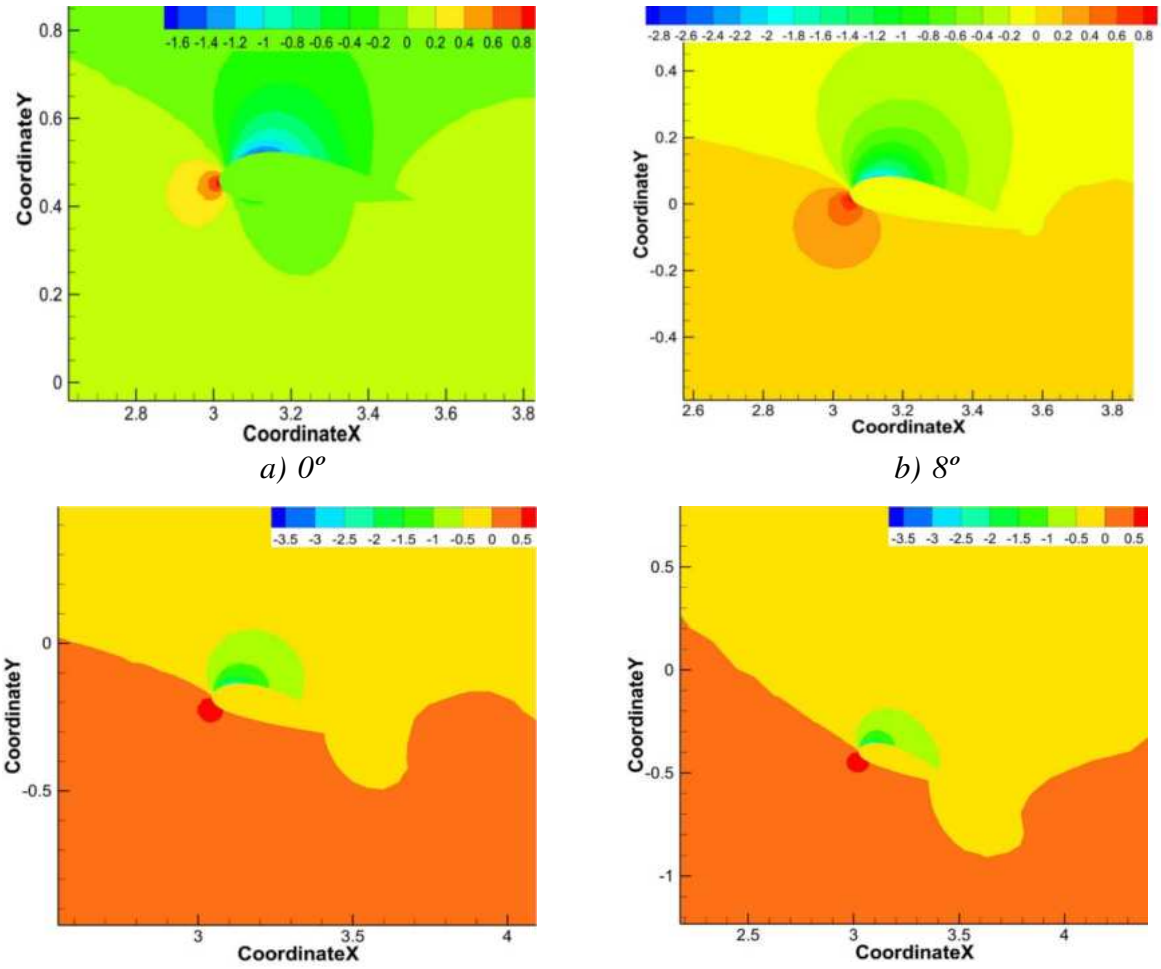
c) 12º



d) 14º

Hình 8. Trường phân bố áp suất trên và xung quanh mô hình UAV

Hình 9 chỉ ra phân bố áp suất tại một mặt cắt dọc trên cánh nâng. Kết quả là khi góc tấn của cánh máy bay thay đổi, trường áp suất xung quanh cánh cũng thay đổi tương ứng. Tại các góc tấn lớn, áp suất ở mặt trên của cánh có xu hướng giảm mạnh hơn so với khi cánh ở góc tấn thấp. Điều này chỉ ra rằng vận tốc không khí di chuyển qua phía trên cánh đã tăng lên đáng kể. Phía dưới cánh, cho thấy rằng áp suất ở đây tăng lên do không khí di chuyển chậm hơn. Sự chênh lệch áp suất giữa mặt trên và mặt dưới là nguyên nhân chính hình thành lực nâng của cánh.



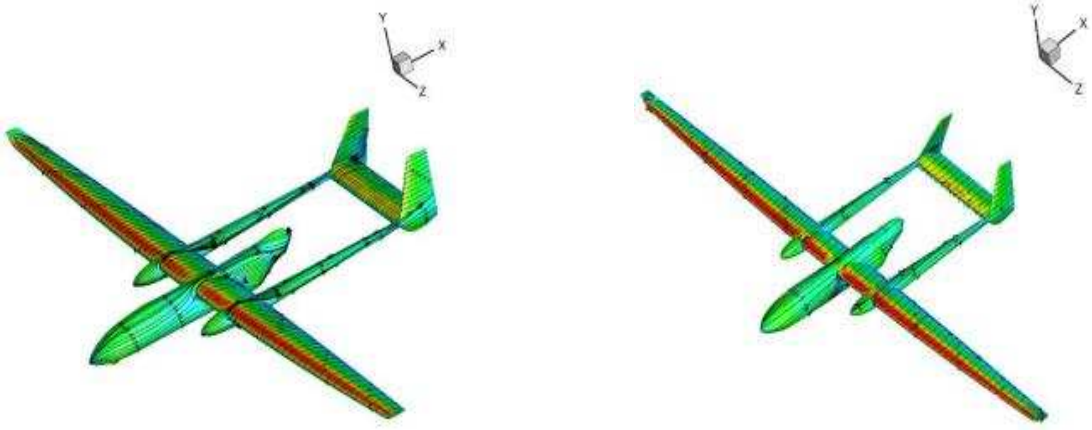
a) 0º *b) 8º*

d) 12º *e) 16º*

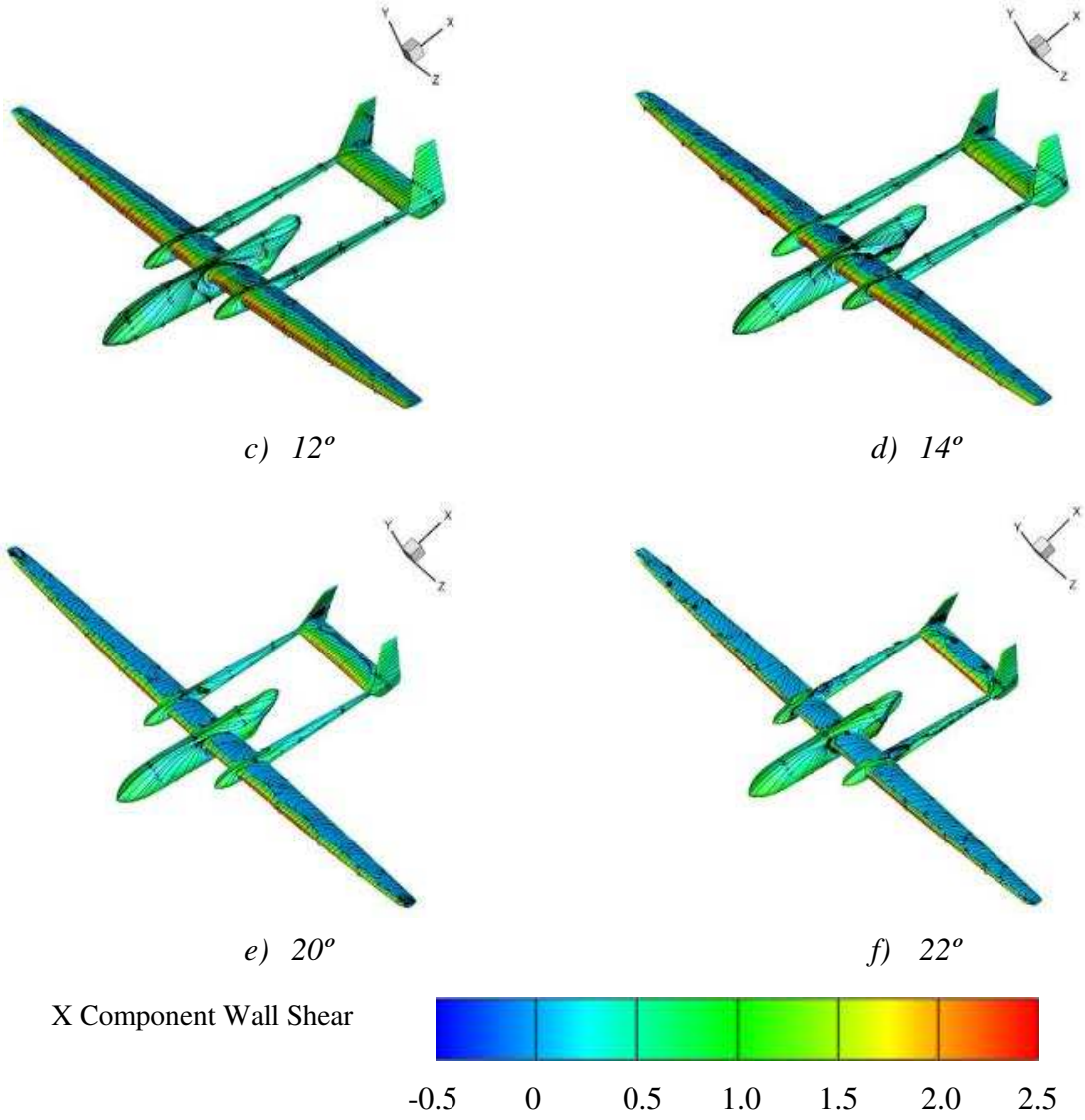
Hình 9. Trường áp suất tại mặt cắt dọc trên cánh tại các góc tấn khác nhau

3.3. Dòng chảy xung quanh UAV

Để hiểu rõ hơn về đặc tính dòng chảy, Hình 10 đưa ra phân bố trường ma sát và đường dòng tạo ra bởi ma sát trên thân.



a) 0º *b) 6º*

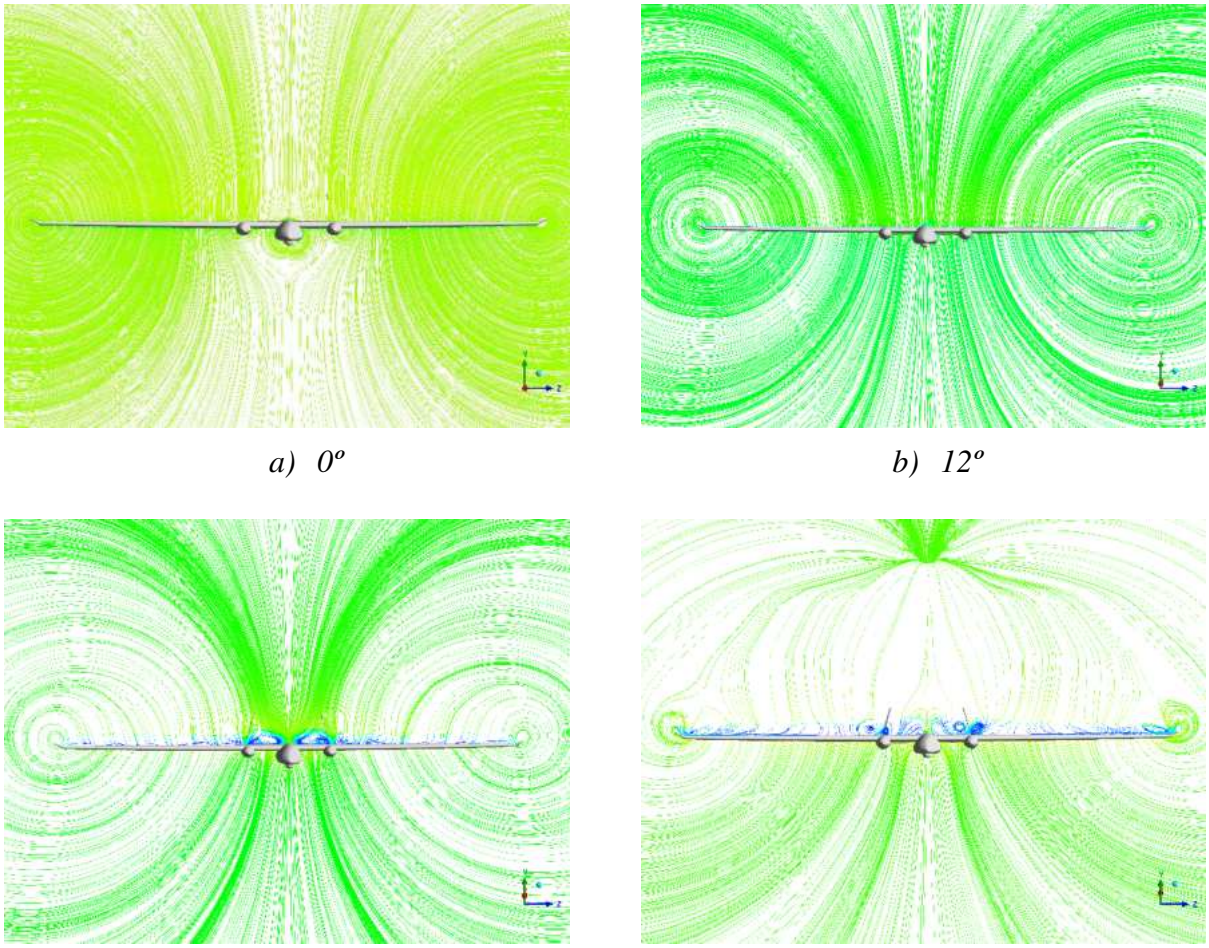


Hình 10. Trường ma sát trên bề mặt mô hình tại các góc tấn khác nhau

Các kết quả chỉ ra rằng tại góc tấn 12º xuất hiện các vùng tách dòng cục bộ. Vùng tách dòng cục bộ này đầu tiên xuất hiện ở gốc cánh sau đó xuất hiện tại vùng tiếp xúc giữa thân và cánh. Do ảnh hưởng của dòng tới, sự giao thoa giữa thân và cánh cũng là nguyên nhân dẫn tới sự thay đổi dòng chảy trên cánh và thân [1]. Tại góc tấn lớn, vùng xoáy trở nên rõ rệt hơn cùng với sự thay đổi cấu trúc dòng trên thân. Tại mặt trên mép sau của cánh chính, chúng ta có thể quan sát thấy có các dòng xoáy tại các góc tấn lớn, các xoáy này phát triển dần lên mặt trên của mép trước của cánh, tuy nhiên góc tấn lớn dòng xoáy này trở hỗn loạn hơn từ đó gây ảnh hưởng lớn tới tính ổn định trong quá trình chuyển động trên không và kết cấu của máy bay [7].

Hình 11 mô tả dòng chảy tại mặt phẳng ngay phía sang cánh chính. Ở góc tấn công 0º, dòng chảy tương đối ổn định, ít nhiễu loạn. Dòng khí ở phía sau cánh UAV thường theo hướng tương đối thẳng và chỉ có sự xoáy nhẹ ở khu vực đầu và đuôi cánh. Hiện tượng xoáy đầu cánh vẫn tồn tại nhưng không mạnh mẽ. Khi góc tấn tăng, dòng chảy phía sau cánh UAV trở nên rất nhiễu loạn và dần mất ổn định. Các vùng xoáy lớn xuất hiện rõ rệt hơn, đặc biệt là

hiện tượng dòng chảy tách ra khỏi cánh xuất hiện mạnh mẽ và có xu hướng rối loạn, lớn nhất với góc tấn 30º. Lực nâng giảm đi do hiện tượng này, trong khi lực cản gia tăng rất nhiều. UAV có thể bị mất ổn định khi vượt qua góc thất tốc 12º trong điều kiện này.



a) 0º *b) 12º*

c) 20º *d) 30º*

Hình 11. Dòng chảy tại mặt phẳng ngay phía sau cánh

4. Kết luận

Bài báo đưa ra các kết quả tính toán cho mô hình UAV Heron ở hai vận tốc thấp 20 m/s và vận tốc cao 60 m/s dựa trên phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm Ansys Fluent và phần mềm Missile Datcom cho thấy kết quả có sự chênh lệch do độ chính xác của các phần mềm nhưng xu hướng thay đổi của các tham số khí động tương đối giống nhau với góc tấn từ 0 tới 22º. Các kết quả tính toán cho thấy hệ số lực nâng tăng khi góc tấn công tăng tới 12º, sau đó xảy ra hiện tượng thất tốc. Cấu trúc dòng chảy trên thân và cánh nâng có sự thay đổi rõ rệt tại góc tấn lớn. Các kết quả khuyến cáo máy bay dạng Heron này nên bay ở góc tấn từ 0 tới 12º để tránh các bất lợi sinh ra do sự hình thành vùng áp suất thấp. Mặc dù mới chỉ dừng lại ở mô phỏng số, các kết quả nghiên cứu có thể dùng làm cơ sở ngân hàng dữ liệu phục vụ cho quá trình thiết kế, chế tạo UAV sau này. Các nghiên cứu cho mô hình thực phục vụ cho việc chế tạo, thử nghiệm sẽ được thực hiện trong thời gian tiếp theo.

Tài liệu tham khảo

[1] Nguyễn Trọng Khuyên, Phạm Văn Duy, Trần Thế Hùng (2024), Nghiên cứu đặc tính khí động của mẫu máy bay không người lái, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.*

[2] Tài liệu kỹ thuật mô tả hệ thống Heron.

[3] C. D. Argyropoulos, N. C. Markatos (2014), Recent Advances On The Numerical Modelling Of Turbulent Flows, *Appl. Math. Model.*, *39, 2*, 693-732, 2015. doi: 10.1016/j.apm.2014.07.001.

[4] Trần Thế Hùng (2022), Numerical Study for Flow Behavior and Drag of Axisymmetric Boattail Models at Different Mach Number*, Springer Nature Singapore*, Singapore.

[5] M. S. Genç, I. Karasu, H. Hakan Açikel (2012), An Experimental Study On Aerodynamics Of NACA2415 Aerofoil At Low Re Numbers, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, *39,* 252-264, 2012. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.029.

[6] B. Launder, D. Spalding (1998), The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289.

[7] Menter, F. R. (1994), Two-equation Eddy-Viscosity Turbulence Models For Engineering Applications, *AIAA Journal 32(8):* 1598-1605.

Development of a Simulation Model and Determination of Aerodynamic Characteristics of a Heron Unmanned Aerial Vehicle

Abstract: *This paper presents the method for building an aerodynamic calculation model and the results of calculating the aerodynamic characteristics for the Heron Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The paper proposes an aerodynamic simulation algorithm using the finite volume method with the commercial software Ansys Fluent. The results of calculating the aerodynamic characteristics of the model are compared with the results obtained from the Missile Datcom software, showing a similarity in the variation characteristics of the aerodynamic properties. The paper also presents and analyzes the impact of the angle of attack on the aerodynamic characteristics and the flow properties around the model. The research results of this paper can serve as a basis and reference for studying the dynamics problem and synthesizing a motion control system for the UAV Heron. Additionally, the research serves as a foundation for selecting and using the twin-wing UAV aerodynamic configuration for specific missions such as reconnaissance, transportation, as well as building a database of aerodynamic properties for future design and manufacturing processes. Extended aerodynamic parameters using Missile Datcom software aim to support subsequent dynamics and control calculations.*

Keywords: Aerodynamic forces; UAV Heron; Flow; Missile Datcom; Numerical simulation.

Nghiên cứu ứng dụng điều khiển bền vững trong bài toán điều khiển tư thế của quadrotor

Kiều Bích Sơn[1*], Trần Đình Hưng[2], Vũ Hỏa Tiễn[3], Cao Hữu Tình[3]

[1] *Hệ 2, Học viện Kỹ thuật quân sự*

[2] *Viện Kỹ thuật Phòng không-Không quân, Quân chủng Phòng không-Không quân*

[3] *Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự*

[*]*Email: kbichson@gmail.com*

Tóm tắt:

Quadrotor ngày càng được sử dụng nhiều trong cả lĩnh vực dân sự và quân sự nhờ khả năng cơ động và dễ dàng triển khai của nó. Các thuật toán điều khiển không ngừng được phát triển để nâng cao chất lượng điều khiển quadrotor đáp ứng với các điều kiện hoạt động khác nhau ví dụ như điều khiển bám theo một quỹ đạo phức tạp, điều khiển trong điều kiện gió thay đổi lớn, điều khiển khi quadrotor thay đổi khối lượng trong quá trình bay. Điều khiển bền vững là một trong các phương pháp điều khiển được áp dụng để giải quyết các vấn đề trên. Bài báo trình bày khả năng ứng dụng điều khiển bền vững tuyến tính dạng Loop Shaping Design Procedure (LSDP) 2 bậc tự do để giải quyết bài toán điều khiển tư thế của quadrotor. So với các phương pháp điều khiển bền vững thông thường ở đó các hệ số của các hàm trọng số được xác định bằng phương pháp thử nghiệm mô phỏng, bài báo này sử dụng lý thuyết tối ưu hóa để xác định các hệ số của các hàm trọng số.

Từ khóa: *Điều khiển bền vững, tối ưu hóa toán học, điều khiển PID, điều khiển Gauss toàn phương tuyến tính, điều khiển thích nghi, điều khiển dự báo mô hình.*

1. Mở đầu

Máy bay không người lái (UAV) kích thước nhỏ dạng cánh quạt được phân loại trong [1] là những loại có trọng tải tối đa dưới 10 kg và thời gian bay dưới 50 phút. Quadrotor và các máy bay cánh quạt khác sử dụng trong các ứng dụng thương mại chủ yếu sử dụng bộ điều khiển dựa trên bộ điều khiển PID [2] vì chúng mang lại sự ổn định và dễ thực hiện. Sự ổn định và khả năng điều khiển của UAV cánh quạt là một chủ đề đã được nghiên cứu rộng rãi trong vài thập kỷ qua [1], [3]. Các chiến lược điều khiển thông thường như bộ điều khiển PID [4], bộ điều khiển thích nghi [5], bộ điều khiển Gauss toàn phương tuyến tính (LQG) [6], bộ điều khiển dự báo mô hình (MPC) [7] cũng như hệ thống dựa trên trí tuệ nhân tạo (AI) ví dụ như bộ điều khiển dựa trên mạng nơ ron nhận tạo [8] và giải thuật di truyền [9] là một vài trong số các kỹ thuật được áp dụng rộng rãi trong bài toán điều khiển bám quỹ đạo của quadrotor.

Bộ điều khiển PID thỏa mãn các chỉ tiêu chất lượng và ổn định danh định nhưng thiếu đi các thuộc tính bền vững và tối ưu khi xuất hiện bất định mô hình đáng kể [10]. Bộ điều khiển thích nghi có thể áp dụng cho các hệ thống có mô hình bất định tham số ở mức độ nhất định tuy nhiên hệ thống dựa trên bộ điều khiển này có thể mất ổn định khi bộ điều khiển được yêu cầu hội tụ tới ước lượng tham số chính xác trong khi bám một đầu vào tham chiếu hằng [11].

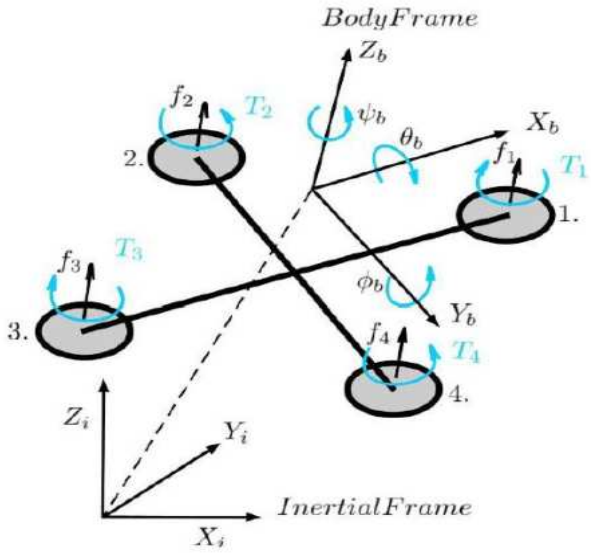
Việc thiếu đi dự trữ ổn định được cung cấp bởi bộ điều khiển LQG trong khi xem xét các bất định mô hình được chỉ ra trong [12]. Bộ điều khiển MPC và kỹ thuật điều khiển dựa trên AI tập trung chủ yếu vào giải quyết bài toán lập kế hoạch đường đi và bám quỹ đạo tham chiếu. Sự không có khả năng để đảm bảo dự trữ ổn định bền vững cho đối tượng có bất định hình là đặc điểm chung của các chiến lược điều khiển này.

Các chiến lược điều khiển bền vững sẽ tập trung giải quyết bài toán ổn định và chất lượng tốt hơn trong sự hiện diện của bất định mô hình, các chiến lược này được áp dụng trong phát triển các bộ điều khiển quadrotor [13]. Các bộ điều khiển bền vững còn được sử dụng kết hợp với chiến lược điều khiển tối ưu, ở đó bài toán bám tư thế và độ cao được giải quyết trước, còn bài toán bám vị trí được giải quyết sau [14]. Vấn đề bất định mô hình quadrotor được mô tả bởi lý thuyết điều khiển bền vững tuyến tính sử dụng một trong ba cách tiếp vận khác nhau là tối ưu hóa độ nhạy trộn lẫn (MSO), thủ tục thiết kế tạo hình vòng lặp (LSDP) và tổng hợp μ.

Trong bài báo này sẽ đề xuất thiết kế bộ điều khiển bền vững tuyến tính dạng LSDP cho điều khiển tư thế của quadrotor. Khác với phương pháp điều khiển bền vững truyền thống ở đó các hệ số của các hàm trọng số được xác định dựa trên mô phỏng thử nghiệm, ở đây ta sử dụng chiến lược điều khiển tối ưu để xác định các hệ số của các hàm trọng số.

2. Mô hình động lực học quadrotor

Quadrotor là một hệ thống gồm 4 động cơ lai 4 cánh quạt tương ứng, có thể được bố trí theo sơ đồ '+' hoặc 'X'. Quadrotor hoạt động với bốn đầu vào điều khiển trên các động cơ và đầu ra sáu bậc tự do (DOF) như trên Hình 1 [15]. Ở đây vị trí của quadrotor (x, y, z) được đo trong hệ tọa độ (HTĐ) quán tính còn tư thế ϕ, θ, ψ tương ứng là góc liệng, góc gật, góc hướng được đo trong hệ tọa độ liên kết. Các cặp cánh 1-3 quay theo chiều kim đồng hồ còn cặp cánh 2-4 quay theo chiều ngược chiều kim đồng hồ. Hướng của các mô men tương ứng được sinh ra được thể hiện bởi các chỉ thị vòng tròn. Lực nâng được sinh ra bởi mỗi động cơ được thể hiện bởi f_i, đây i là chỉ số động cơ.



Hình 1: Mô hình động lực học quadrotor

Như ta nhìn thấy trên Hình 1, hai HTĐ tham chiếu khác nhau được gắn với quadrotor. HTĐ liên kết gắn liền với quadrotor dùng để mô tả chuyển động quay còn hệ tọa độ quán tính cố định được sử dụng để mô tả chuyển động tịnh tiến của quadrotor. Động lực học chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay có liên kết với nhau và có thể phân tách bằng cách định nghĩa vector đầu vào như sau và tuyến tính hóa đối tượng tại điểm cân bằng, được thể hiện bởi phương trình (1).

Các phương trình chuyển động có thể được dẫn xuất sử dụng cách tiếp cận Newton-Euler hoặc Euler-Lagrange. Các phương trình mô tả chuyển động quay của quadrotor dựa trên

cách tiếp cận Newton-Euler được thể hiện ở phương trình (2).

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \tag{1}$$

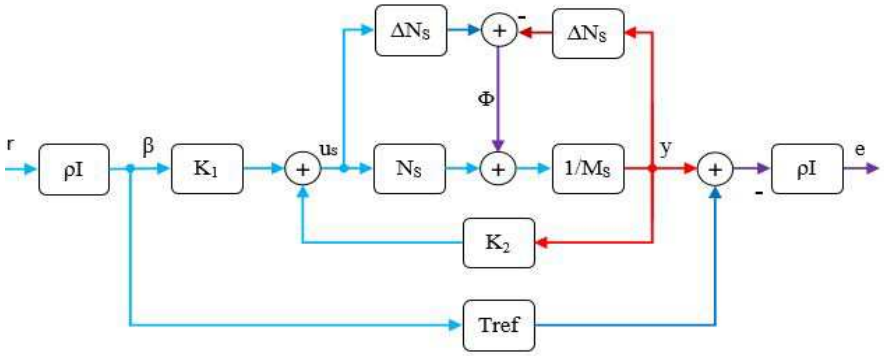
$$\begin{aligned} \dot{f} &= p + q\sin(f)\tan(q) + r\cos(f)\tan(q) \\ \dot{q} &= q\cos(f) - r\sin(f) \\ \dot{y} &= q\frac{\sin(f)}{\cos(q)} + r\frac{\cos(f)}{\sin(q)} \\ \dot{p} &= \frac{I_{YY} - I_{ZZ}}{I_{XX}} qr - \frac{k_r p}{I_{XX}} + \frac{Lu_1}{I_{XX}} \\ \dot{q} &= \frac{I_{ZZ} - I_{XX}}{I_{YY}} pr - \frac{k_r q}{I_{YY}} + \frac{Lu_2}{I_{YY}} \\ \dot{r} &= \frac{I_{XX} - I_{YY}}{I_{ZZ}} pq - \frac{k_r r}{I_{ZZ}} + \frac{du_3}{I_{ZZ}} \end{aligned} \tag{2}$$

ở đây *p, q* và *r* thể hiện vận tốc góc quanh các trục x, y, z tương ứng được đo trong HTĐ liên kết; *L* là khoảng cách giữa tâm của động cơ và trọng tâm quadrotor; *d* là tỉ số giữa hệ số lực đẩy và lực cản; k_r và k_t tương ứng là hệ số lực cản quay và tịnh tiến; I_{XX}, I_{YY}, I_{ZZ} là mô men quán tính theo các trục x, y, z tương ứng.

3. Thiết kế bộ điều khiển tư thế quadrotor sử dụng bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do kết hợp với chiến lược điều khiển tối ưu

3.1 Bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do tổng quát

Bộ điều khiển LSDP hai bậc tự đo được áp dụng rộng rãi trong trường khợp mô hình đối tượng có tính bất định cao [16]. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do được thể hiện trên Hình 2 [15].



Hình 2: Bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do

Ở đây biểu diễn hệ số nguyên tố cùng nhau của đối tượng bất định có hàm truyền $G_S = \left\{ \left(M_S + \Delta_{M_S} \right)^{-1} \left(N_S + \Delta_{N_S} \right) \right\} : \left\| \Delta_{M_S} \ \Delta_{N_S} \right\|_\infty \le \varepsilon$, còn bộ điều khiển K được tìm để cực tiểu hàm chỉ tiêu chất lượng (3):

$$\gamma_K = \left\| \begin{bmatrix} K_s \\ I \end{bmatrix} \left(I - G_S K \right)^{-1} M_S^{-1} \right\| \tag{3}$$

Ở đây $\Delta_{M_S}, \Delta_{N_S}$ là các hàm truyền ổn định không biết thể hiện lượng bất định trong mô hình đối tượng. Ký hiệu 'S' thể hiện đối tượng được tạo hình. Để xác nhận các yêu cầu chất lượng thì các giá trị suy biến của vòng hở được biến đổi sử dụng các trọng số bù trước W_1 và bù sau W_2. Một bộ tiền lọc được sử dụng để loại trừ sai số trạng thái dừng. Các trọng số W_1, W_2 được sử dụng để tạo hình đối tượng vòng hở theo một dạng nhất định. W_1 thông thường là một bộ lọc thông thấp được mô tả dưới dạng sau

$$W_1 = \frac{s/S_s + \omega_B^*}{s + \omega_B^* A} \text{ hoặc đơn giản là } \frac{\omega_1(s+\omega_2)}{s+\omega_3} \text{ với } \omega_2 > \omega_3$$

Trong đó, S_s thể hiện độ nhạy đỉnh, ω_B^* xấp xỉ dải thông yêu cầu và A là giới hạn trên độ nhạy. Điều kiện ràng buộc $\omega_2 > \omega_3$ để đảm bảo W_1 là bộ lọc thông thấp. Các trọng số bậc cao hơn có thể được sử dụng trong trường hợp độ dốc sườn xuống tại tần số cao của hàm trọng số được yêu cầu. W_2 và bộ tiền lọc được thể hiện dưới dạng hằng số và đối tượng tạo hình cuối cùng là W_2GW_1. Các tham số của các hàm trọng số, bộ tiền lọc có thể thu được bằng việc sử dụng chiến lược điều khiển tối ưu để cực tiểu một hàm chỉ tiêu chất lượng liên quan đến các chỉ tiêu chất lượng vòng lặp kín.

Bộ điều khiển 2 bậc tự do K_1, K_2 cực tiểu chuẩn H_∞ của ma trận hàm truyền từ $[r \ \phi]^T$ tới $[u_s \ y \ e]^T$ (Hình 2) cho đối tượng tạo hình $G_S = GW_1$ với biểu diễn hệ số nguyên tố cùng nhau $M_S^{-1}N_S$. Với $G_S = [A_S B_S; C_S D_S]^T$ và $T_{ref} = [A_r B_r; C_r D_r]^T$ là mô hình tham chiếu. Thể hiện hàm truyền này trong dạng chuẩn của điều khiển bền vững được biểu diễn bởi ma trận đối tượng P

$$\begin{bmatrix} A_S & 0 & 0 & (B_S D_S^T + Z_S C_S^T) R_S^{-1/2} & B_S \\ 0 & A_R & B_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ C_S & 0 & 0 & R_S^{-1/2} & D_S \\ \rho C_S & -\rho^2 C_R & -\rho^2 D_R & \rho R_S^{-1/2} & \rho D_S \\ 0 & 0 & \rho I & 0 & 0 \\ C_S & 0 & 0 & R_S^{-1/2} & D_S \end{bmatrix} \quad (4)$$

là ma trận hệ thống từ $[r \quad \phi \quad : u_s]^T$ tới $[u_s \ y \ e : \beta \ y]^T$. Ở đây $R_S = I + D_S D_S^T, S_S = I + D_S^T D_S$ và Z_S có thể thu được bằng việc giải phương trình Riccati (5):

$$(A_S - B_S S_S^{-1} D_S^T C_S) Z_S + Z_S (A_S - B_S S_S^{-1} D_S^T C_S)^{-1} - Z_S C_S R^{-1} C_S Z_S + B_S S_S^{-1} B_S^T = 0 \quad (5)$$

Bộ điều khiển K_2 đáp ứng yêu cầu cho tính ổn định bền vững, còn bộ điều khiển K_1 cho phép so khớp mô hình tham chiếu bằng cách đảm bảo:

$$\left\| I - GK_2^{-1} GK_1 - T_{ref} \right\|_\infty \le \gamma \rho^{-2} \quad (6)$$

ở đây T_{ref} là chất lượng hệ kín ta cố gắng để đạt được và ρ là tham số được lựa chọn để thỏa hiệp giữa tính bền vững và so khớp mô hình tham chiếu.

3.2 Lựa chọn hàm chỉ tiêu chất lượng

Hàm chỉ tiêu chất lượng được đề xuất là một hàm có các đối số là bộ điều khiển K và các trọng số thiết kế được đưa ra bởi:

$$J(K, W) = W_{J1}.\gamma + W_{J2}.ITSE + W_{J3}.J_u + W_{J4}.order(K) \quad (7)$$

Hàm chi phí có ba thành phần gồm có:

- $J_1 = W_{J1}.\gamma$: phản ánh một lượng phạt do thiếu tính bền vững trong thiết kế, γ là chuẩn H_∞ của hàm truyền hệ kín

- $J_2 = W_{J2}.ITSE + W_{J3}.J_u$: liên quan đến tính tối ưu của bộ điều khiển được thiết kế, thể hiện ở lượng phạt do sai số bám sát và tín hiệu điều khiển. ITSE thể hiện tích phân sai số bình phương theo thời gian, trong khi J_u biểu diễn vùng phía dưới đường cong đầu vào.

- $J_3 = W_{J4}.order(K)$: phạt do chi phí tính toán để thực hiện bộ điều khiển.

Thủ tục thiết kế bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do

Bước 1: Đối với đối tượng điều khiển G ta định nghĩa dạng của các trọng số W_1, W_i, ρ và chọn giá trị khởi tạo cho các tham số. Chọn một mô hình tham chiếu T_{ref} dạng đơn giản phản ánh đáp ứng hệ kín mong đợi.

Bước 2: Định nghĩa hàm chỉ tiêu thể hiện ở phương trình (7) và khởi tạo các trọng số.

Bước 3: Thực hiện bài toán tối ưu hóa ràng buộc. Các giới hạn dưới và trên được xác nhận cho các tham số của W_1, W_i và T_{ref} (hình thành các ràng buộc tuyến tính) và γ (hình thành ràng buộc phi tuyến).

Bước 4: Phụ thuộc vào yêu cầu tính bền vững ta cần thay đổi dạng của trọng số W_1 và W_i để đạt mức yêu cầu chất lượng. Nếu giá trị của $1/\gamma$ là nhỏ hơn 0.25 ta cần tăng thay đổi các trọng số cũng như là thay đổi giới hạn dưới và trên của các ràng buộc tuyến tính trong bước 3.

Bước 5: Khi điều kiện bước 4 dừng lại ta thu được bộ điều khiển $K = [K_1 \; K_2]$.

3.3 Thiết kế bộ điều khiển bền vững LSDP hai bậc tự do áp dụng cho điều khiển tư thế của quadrotor

a. Các bất định trong mô hình quadrotor

Mô hình quadrotor được sử dụng được lấy ở [17]. Bất định trong mô hình quadrotor thể hiện dưới dạng tham số. Các giá trị danh định và phạm vi thay đổi các tham số được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1: Bất định tham số mô hình quadrotor

Tham số	% bất định	Phạm vi thay đổi
I_{XX}, I_{YY}	$0.04339 \pm 10\%$ kg.m^2	$0.0391 \le I_{XX}, I_{YY} \le 0.0477$
I_{ZZ}	$0.0705 \pm 10\%$ kg.m^2	$0.0634 \le I_{ZZ} \le 0.0775$
m	$1.27 \pm 50\%$ kg	$0.6350 \le m \le 1.9050$
d_r	$0.194 \pm 30\%$ m	$0.1358 \le d_r \le 0.2522$
c_t	$0.1 \pm 50\%$	$0.0500 \le c_t \le 0.1500$

c_p	$0.045 \pm 30\%$	$0.0315 \le c_p \le 0.0585$

b. Phạm vi thay đổi của các biến trạng thái trong mô hình tuyến tính hóa

Phạm vi thay đổi của các biến trạng thái được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2: Phạm vi thay đổi của các biến trạng thái

Biến	Phạm vi cho tuyến tính hóa mô hình
ϕ_i, θ_i, ψ_i	$[-0.35, 0.35]$ rad
$\dot{\phi}_b, \dot{\theta}_b, \dot{\psi}_b$	$[-0.2, 0.2]$ rad/s
u_1, u_2, u_3, u_4	$[4590, 4790]$ RPM

c. Các đặc trưng chất lượng yêu cầu đối với bài toán điều khiển tư thế của quadrotor

Đối với bộ điều khiển kênh liệng và gật: với tín hiệu tham chiếu $r(t) = 0.25$ rad/s

- Độ quá chỉnh: < 8%
- Thời gian sườn lên: < 0.1s
- Thời gian xác lập: < 0.25s
- Dải thông vòng lặp kín: > 10 rad/s

Đối với bộ điều khiển kênh hướng: với tín hiệu tham chiếu r(t)=0.5 rad/s

- Độ quá chỉnh: < 10%
- Thời gian sườn lên: < 0.1s
- Thời gian xác lập: < 0.3s
- Dải thông vòng lặp kín: > 10 rad/s

d. Mô phỏng và khảo sát bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do

Quadrotor được khảo sát với bộ tham số mô tả ở Bảng 1, phạm vi thay đổi các biến trạng thái thể hiện ở Bảng 2, các đặc trưng chất lượng yêu cầu thể hiện ở mục (c). Bằng cách tuyến tính hóa các phương trình động lực học mô tả chuyển động quay của quadrotor trong phương trình (2) xung quanh điểm cân bằng, ta sẽ tổng hợp bộ điều khiển LSDP tuyến tính hai bậc tự do cho điều khiển tư thế của quadrotor. Do tính đối xứng ta có thể coi kênh liệng và gật là như nhau.

Chọn mô hình tham chiếu kênh liệng và gật: $T_{ref}^{roll,pitch} = \dfrac{1}{0.0567s + 1}$

Chọn mô hình tham chiếu kênh hướng: $T_{ref}^{yaw} = \dfrac{1}{0.0315s + 1}$

Các trọng số của bộ điều khiển kênh liệng và gật được xác định là:

$$W_1 = \frac{23.03s + 11.38}{169.3s + 47.68}, W_i = 1.5007, \rho^* = 1.7349$$

Các trọng số của bộ điều khiển kênh hướng được xác định là:

$$W_1 = \frac{36.5s + 152}{227.9s + 50.94}, W_i = 5.2, \rho^* = 1.0$$

Bộ điều khiển kênh liệng và gật:

$$K_1^{roll,pitch} = \frac{3402.3945s^2 + 81309.5853s + 39348.3691}{s^3 + 6986.2025s^2 + 126345.0343s + 60716.7234}$$

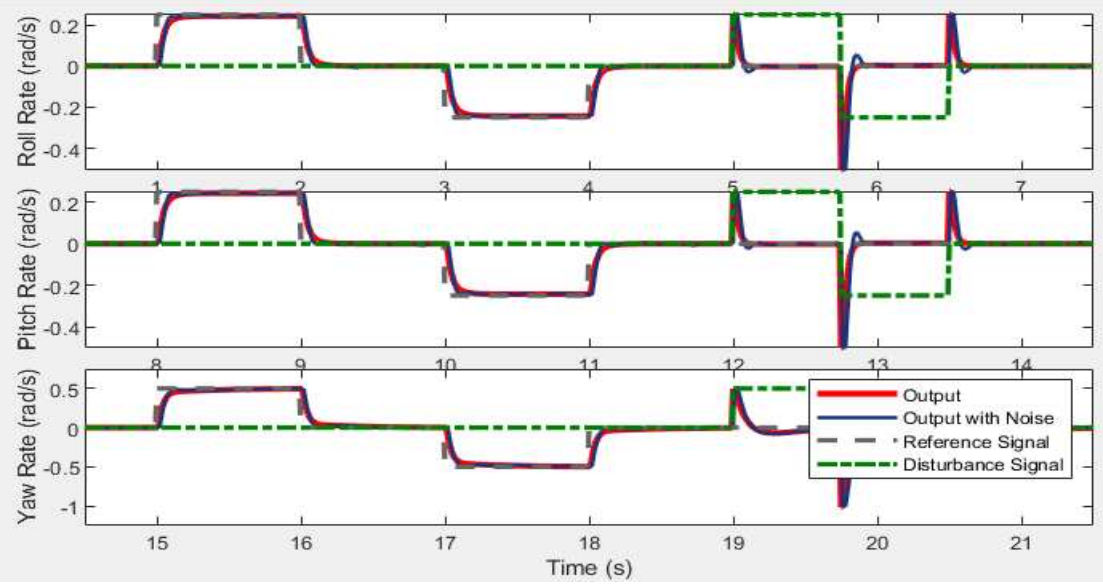
$$K_2^{roll,pitch} = \frac{7006.3497s^2+126992.4295s+60381.8513}{s^3+6986.2025s^2+126345.0343s+60716.7234}$$

Bộ điều khiển kênh hướng:

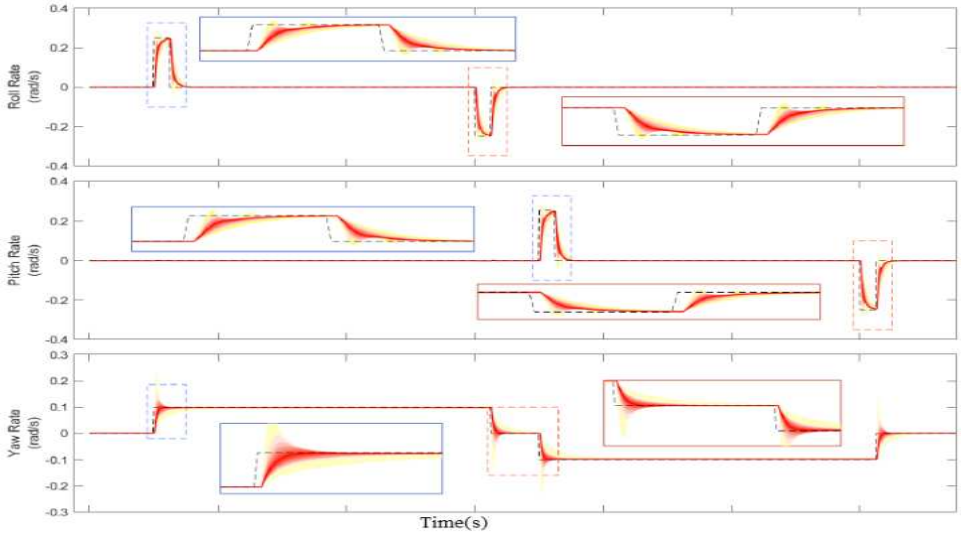
$$K_1^{yaw} = \frac{2417.7504s^2+32713.6757s+100611.0419}{s^3+4676.4533s^2+166340.5167s+599666.3996}$$

$$K_2^{yaw} = \frac{5933.3829s^2+204856.2647s+523647.6378}{s^3+4676.4533s^2+166340.5167s+599666.3996}$$

Đáp ứng theo thời gian của quadrotor với tham số danh định khi sử dụng bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do được thể hiện trên hình 3. Kết quả trên hình 4 thể hiện đáp ứng theo thời gian khi tính tới các bất định tham số mô hình và lệnh tham chiếu thay đổi phức tạp. Kết quả thể hiện trên hình 4 cho thấy bộ điều khiển vẫn đáp ứng tốt khi có bất định mô hình.

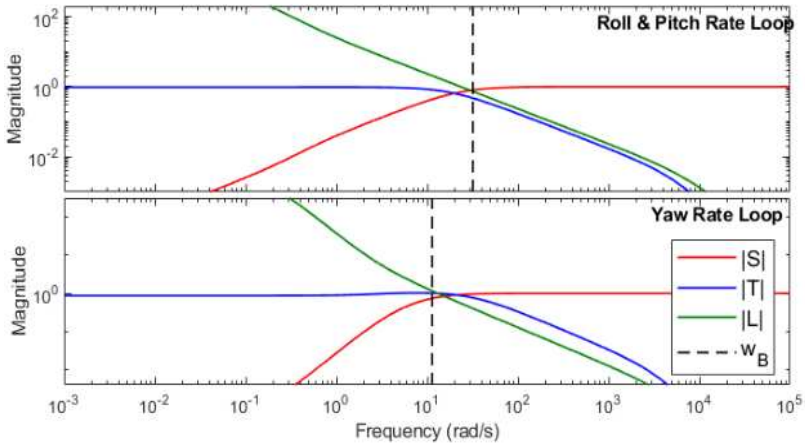


Hình 3: Đáp ứng thời gian của các bộ điều khiển



Hình 4: Đáp ứng của quadrotor dựa trên bộ điều khiển LSDP hai bậc tự do với bất định mô hình và lệnh tham chiếu thay đổi phức tạp

Hình 5 thể hiện đặc trưng biên độ tần số của trọng số độ nhạy S, trọng số độ nhạy bù T và vòng lặp hở của các kênh điều khiển.



Hình 5: Hàm độ nhạy, độ nhạy bù, vòng lặp kín của các kênh điều khiển

Các đặc trưng chất lượng yêu cầu và đáp ứng của các kênh điều khiển được thể hiện trên Bảng 3. Kết quả cho ta thấy các đặc trưng đáp ứng của các kênh điều khiển thỏa mãn các yêu cầu đặt ra.

Bảng 3: Các đặc trưng chất lượng yêu cầu và đáp ứng.

Đặc trưng	Yêu cầu đối với kênh liệng/gật	Đáp ứng của kênh liệng/gật	Yêu cầu đối với bộ kênh hướng	Đáp ứng của kênh hướng
Độ quá chỉnh	< 8%	0.0%	< 10%	0.0%
Thời gian sườn lên	< 0.1s	0.096s	< 0.1s	0.102s
Thời gian xác lập	< 0.25s	0.167s	< 0.3s	0.305s
Dải thông hệ kín	>10 rad/s	31.90	>10 rad/s	11.38

Tiếp theo ta tiến hành phân tích tính bền vững. Dự trữ ổn định nguyên tố cùng nhau chuẩn hóa được tính cho mỗi kênh điều khiển cùng với giới hạn dưới của dự trữ ổn định (SM) và dự trữ pha cổ điển (PM). Từ quan điểm của lý thuyết điều khiển bền vững, nếu dự trữ ổn định nguyên tố cùng nhau chuẩn hóa lớn hơn 0.25 thì việc thiết kế bộ điều khiển được xem là thành công. Kết quả được thể hiện trên Bảng 4.

Bảng 4: Các thành phần dự trữ ổn định

Các đặc trưng đáp ứng	Kênh điều khiển liệng/gật	Kênh điều khiển hướng
Dự trữ ổn định nguyên tố cùng nhau chuẩn hóa	0.479	0.505
Giới hạn dưới dự trữ ổn định cổ điển	2.836	3.040
Giới hạn dưới dự trữ pha cổ điển	57.199	60.656

Bậc của các bộ điều khiển các kênh trong trường hợp này là như nhau.

4. Kết luận

Việc áp dụng lý thuyết điều khiển bền vững để giải quyết các bài toán điều khiển quadrotor hoạt động trong các điều kiện phức tạp là hoàn toàn có khả năng. Đối với quadrotor có bất định tham số lớn thì bộ điều khiển bền vững LSDP hai bậc tự do được áp dụng. Việc đưa hàm chỉ tiêu chất lượng có liên quan đến các đặc trưng chất lượng theo miền thời gian và tần số, cũng như tính tới yếu tố chi phí thực hiện bộ điều khiển cho phép ta xác định các hệ số của các hàm trọng số mà không cần dựa trên các kết quả mô phỏng thử nghiệm nhiều lần như ở các phương pháp thiết kế bộ điều khiển bền vững truyền thống. Phân tích chất lượng bền vững là bước quan trọng trước khi triển khai bộ điều khiển vào ứng dụng thực tế.

Tài liệu tham khảo

[1] Kendoul, Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems, *Journal of Field Robotics* 29.2 (2012), pp. 315-378.

[2] Chao H, Cao Y, and Chen Y, Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation and Systems* 8.1 (2010), pp. 36-44.

[3] Cai G, Dias J, and Seneviratne L, A survey of small-scale unmanned aerial vehicles: Recent advances and future development trends. *Unmanned Systems* 2.02 (2014), pp. 175-199.

[4] Z. Mustapa, S. Saat, S. H. Husin and N. Abas, Altitude controller design for multi-copter UAV, *2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, Langkawi, Malaysia, 2014, pp. 382-387, doi: 10.1109/I4CT.2014.6914210.

[5] Fernando T, Chandiramani J, Lee T, and Gutierrez H, Robust adaptive geometric tracking controls on SO(3) with an application to the attitude dynamics of a quadrotor UAV. *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, 2011 50th IEEE Conference on. IEEE. 2011,pp. 7380-7385.

[6] Schioler H, Leth J, Leth T, and Totu L, Stochastic design of switching controller for quadrotor UAV under intermittent localization. *2016 Australian Control Conference (AuCC).* 2016, pp. 243-248. doi: 10.1109/AUCC. 2016.7868196.

[7] Tanveer M, Hazry D, Ahmed S, Joyo M, Warsi F, Kamaruddin H, Razlan Z, Wan K and Shahriman A, NMPC-PID based control structure design for avoiding uncertainties in attitude and Altitude tracking control of quad-rotor (UAV). *Signal Processing & its Applications (CSPA),* 2014 IEEE 10th International Colloquium on. IEEE. 2014, pp. 117-122.

[8] Hercus R, Kong H, and Ho K, Control of an unmanned aerial vehicle using a neuronal network. *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB)*. 2013, pp. 73-79. doi: 10.1109/CCMB.2013.6609168.

[9] Roberge V, Tarbouchi M, and Labonte G, Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path plannin. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 132-141, Feb. 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2198665.

[10] Bolandi, H. , Rezaei, M. , Mohsenipour, R. , Nemati, H. and Smailzadeh, S. (2013) Attitude Control of a Quadrotor with Optimized PID Controller. *Intelligent Control and Automation*, **4**, 335-342. doi: 10.4236/ica.2013.43039.

[11] Min, BC, Hong J, and Matson E, Adaptive robust control (ARC) for an altitude control of a quadrotor type UAV carrying unknown payload. *2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems*, Gyeonggi-do, Korea (South), 2011, pp. 1147-1151.

[12] Doyle J, Guaranteed margins for LQG regulators. *IEEE Transactions on automatic Control* 23.4 (1978), pp. 756-757.

[13] Basak H and Prempain E, Switching recovery control of a quadcopter UAV. *Control Conference (ECC)*, 2015 European. IEEE. 2015, pp. 3641-3646.

[14] Cai G, Chen B, and Lee T, Design and implementation of robust flight control system for a small-scale UAV helicopter. *Asian Control Conference*, 2009. ASCC 2009. 7th. IEEE. 2009, pp. 691-697.

[15] Jonathan Currie, Joseph Thomas, and David Wilson, Loop Shaping Design Procedure for Quadrotor Control with Weights Designed by Resolving a Constrained Non-linear Optimization Problem, *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation 2017*, University of Technology Sydney.

[16] D. J. Hoyle, R. A. Hyde and D. J. N. Limebeer, An H∞ approach to two degree of freedom design, *Proceedings of the 30th IEEE Conference* on, pages 1581-1585. IEEE, 1991.

[17] Chowdhary G.V, Integrated Guidance Navigation and Control for a Fully Autonomous Indoor UAS, *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*.Washington, D.C: AIAA, 2011.

Applying robust control theory to the attitude problem of a quadrotor

Abstract: *Quadrotors are increasingly used in both civil and military fields based on its mobility and ease of deployment. Control algorithms are constantly being developed to improve control performance of quadrotor in response to different operating conditions, such as tracking a complex trajectory, wind highly varies, the quadrotor changes mass during flight. Robust control is one of the control methods applied to solve the above problems. This article presents the possibility of applying robust control to solve attitude control problem of the quadrotor. Compared to conventional robust control methods where coefficients of weighting functions are determined by simulation testing, in this article we use mathematical optimization theory to determine the coefficients.*

Keywords: Robust control, mathematical optimization, PID control, Linear Quadratic Gaussian control, Adaptive control, Model predictive control.

Một thuật toán phát hiện UAV thời gian thực kích thước nhỏ cho các thiết bị nhúng

Nguyễn Tiến Tài[1*], Nguyễn Quang Anh[1]

1: Đại học kỹ thuật Lê Quý Đôn

**Email:nguyentientai2511@gmail.com*

Tóm tắt:

Hiện nay, với sự phổ biến rộng rãi của drone, nhiệm vụ phát hiện drone là một yếu tố quan trọng và mang tính quyết định trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là an ninh và quốc phòng. Tuy nhiên, nhiệm vụ này đặt ra những thách thức đặc thù như tốc độ cao của drone, kích thước nhỏ, và khả năng hòa lẫn vào môi trường xung quanh, làm ảnh hưởng đến hiệu quả phát hiện. Bài báo này giới thiệu các cải tiến đối với mô hình YOLO-v8 nhằm nâng cao khả năng phát hiện drone thời gian thực, đặc biệt khi triển khai trên các thiết bị có tài nguyên hạn chế. Chúng tôi đề xuất mô hình cải tiến YOLORep, tối ưu hóa cả tốc độ xử lý (processing speed) và kích thước mô hình (model size) trong khi vẫn duy trì mức độ chính xác chấp nhận được. Bằng cách thay thế các module C2f trong Backbone bằng module RepConv, số lượng phép tính đã được giảm đáng kể, dẫn đến tăng 10,27% tốc độ xử lý (FPS) và giảm 80,84%% kích thước mô hình. Mặc dù độ chính xác trung bình giảm so với YOLO-v8 gốc, mô hình vẫn duy trì hiệu quả trong việc phát hiện drone thời gian thực. Các thí nghiệm trên tập dữ liệu TIB-Net xác nhận rằng mô hình này rất phù hợp để triển khai trên các thiết bị có tài nguyên hạn chế, chẳng hạn như hệ thống nhúng nhỏ gọn (compact embedded systems).

Từ khoá: *YOLORep; UAVs; YOLO-v8*

1 .Giới thiệu

Hiện nay, việc ứng dụng các tiến bộ khoa học và công nghệ trong sản xuất máy bay không người lái (drone) ngày càng trở nên phổ biến. Bên cạnh những lợi thế vượt trội, điều này cũng mang đến những hậu quả khó lường. Trong những năm gần đây, các loại drone nhỏ xuất hiện ngày càng nhiều với đa dạng mẫu mã, đảm nhận nhiều nhiệm vụ khác nhau. Điều này trực tiếp đe dọa an ninh của nhiều quốc gia khi các drone có thể thực hiện các nhiệm vụ gián điệp, giám sát và tấn công cảm tử, được trang bị vũ khí để tấn công các mục tiêu quan trọng với ý định có chủ đích, hình thành các phương thức chiến tranh phi truyền thống mới [1]. Do đó, để đối phó với các mối đe dọa từ drone, nhiệm vụ phát triển và tạo ra các hệ thống chống drone (anti-drone) đã trở nên cực kỳ cấp thiết trong lĩnh vực quốc phòng và an ninh hiện đại.

Nhiệm vụ phát hiện và cung cấp cảnh báo sớm cho các mục tiêu là drone đã nhận được sự quan tâm lớn từ nhiều nhóm nghiên cứu và được nghiên cứu rộng rãi. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng các mô hình học sâu (deep learning) để phát hiện drone. Các nghiên cứu sử dụng thị giác máy tính (computer vision) và các mô hình học sâu như YOLOv3[2], YOLOv5 [7], YOLOv8 [5] và YOLOv9 [14] đã cho thấy những kết quả đầy hứa hẹn.

2. Nghiên cứu liên quan

Nhiệm vụ phát hiện đối tượng liên quan đến việc nhận diện các đối tượng trong một khung hình cụ thể. Một trong những phương pháp phổ biến nhất là sử dụng mạng nơ-ron tích chập (Convolutional Neural Networks - CNN) để trích xuất đặc trưng và phát hiện đối tượng. Từ những năm 2010, cùng với sự tiến bộ của học sâu (deep learning), chất lượng của các thuật toán phát hiện đối tượng liên tục được nâng cấp, với những thuật toán nổi bật như Region-Based Convolutional Neural Network (RCNN) và Faster RCNN. Mặc dù các mạng này có hiệu suất vượt trội về độ chính xác so với các thuật toán truyền thống, cấu trúc phức

tạp của chúng lại cản trở khả năng đạt được tốc độ xử lý thời gian thực – một yêu cầu thiết yếu cho các ứng dụng thực tế. Do đó, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc phát triển các mô hình cân bằng giữa tốc độ và độ chính xác để đảm bảo khả năng ứng dụng rộng rãi [6, 16, 17] .

Hiện tại, dòng mô hình YOLO đã giải quyết hiệu quả vấn đề này. Qua chín phiên bản cải tiến, dòng mô hình này đạt được hiệu suất vượt trội cả về tốc độ và độ chính xác [12]. Các mô hình YOLO được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như y tế, giao thông vận tải, công nghiệp và hệ thống cảnh báo phát hiện UAV. Nhiều nhóm nghiên cứu đã thực hiện các nghiên cứu ứng dụng YOLO trong phát hiện UAV, thu được các kết quả đáng khích lệ.Từ năm 2023, các mô hình cải tiến từ YOLOv8 đã được phát triển mạnh mẽ cho ứng dụng phát hiện UAV. Ví dụ, nghiên cứu "Drone Detection in Low-light Conditions with YOLOv8" [18] cải thiện hiệu suất của YOLOv8 trong điều kiện ánh sáng yếu bằng cách tích hợp các kỹ thuật tăng cường dữ liệu (data augmentation) cho điều chỉnh độ sáng và màu sắc. Mô hình này cũng cải tiến các lớp trích xuất đặc trưng (feature extraction layers) để tối ưu hóa độ chính xác và tốc độ phát hiện, giúp hiệu quả hơn trong việc giám sát UAV thời gian thực trong điều kiện ánh sáng phức tạp.

Tuy nhiên, một thách thức lớn trong việc ứng dụng học sâu vào các hệ thống chống drone là kích thước mô hình và tốc độ xử lý thời gian thực. Các hệ thống thực tế đòi hỏi kích thước nhỏ gọn, khả năng lắp đặt trong không gian hạn chế, và phần cứng đơn giản, hiệu quả. Mặc dù YOLO-v8 đã được cải tiến đáng kể về hiệu suất phát hiện đối tượng, tốc độ xử lý trên các thiết bị nhúng (embedded devices) có tài nguyên tính toán hạn chế vẫn là một điểm yếu so với các phiên bản trước.

Để giải quyết vấn đề này, bài báo đề xuất mô hình YOLORep được phát triển trên nền tảng YOLO-v8. Mô hình này sử dụng phương pháp tái tham số hóa (re-parameterization) [13], giúp tích hợp các thành phần tính toán vào một bước suy luận duy nhất, chuyển đổi một mô hình có cấu trúc phức tạp trong giai đoạn huấn luyện thành cấu trúc đơn giản hơn khi triển khai trên phần cứng. YOLORep thay thế một số lớp trong kiến trúc YOLO-v8 để tạo ra mô hình có tính năng phù hợp hơn với yêu cầu nhiệm vụ, đạt được sự cân bằng giữa tốc độ và độ chính xác.

3. Phương pháp

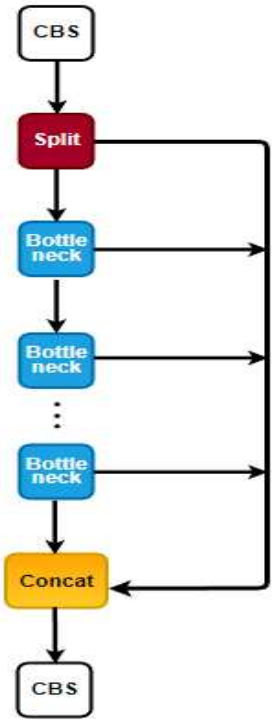
3.1. Kiến trúc mô hình YOLO-v8

YOLO-v8 là phiên bản cải tiến của dòng mô hình YOLO, tập trung vào việc nâng cao tốc độ và độ chính xác trong phát hiện đối tượng thời gian thực. Mô hình gồm ba thành phần chính: Backbone: Sử dụng mạng CNN để trích xuất đặc trưng từ hình ảnh đầu vào, học cả đặc trưng mức thấp và cao; Neck: Kết hợp đặc trưng ở nhiều cấp độ bằng các kỹ thuật như Feature Pyramid Network (FPN) và Path Aggregation Network (PAN), cải thiện khả năng phát hiện, đặc biệt với đối tượng nhỏ; Head: Dự đoán bounding boxes và nhãn đối tượng, áp dụng Non-Maximum Suppression (NMS) để giảm sự chồng lấn giữa các dự đoán. Các thành phần này phối hợp để tối ưu hóa hiệu suất và độ chính xác của YOLO-v8.

Tuy nhiên, đối với các nhiệm vụ cụ thể như phát hiện UAV thời gian thực, YOLO-v8 bộc lộ một số hạn chế, đặc biệt trong việc phát hiện các đối tượng nhỏ và không đáp ứng đầy đủ các yêu cầu thời gian thực trên các thiết bị nhúng. Hạn chế này xuất phát từ sự không hiệu

quả trong tính toán của C2f block, vốn vẫn còn cồng kềnh và kém tối ưu về hiệu quả thời gian. Kiến trúc của C2f được minh họa trong Hình 1.

Xét một lớp với bốn tham số đặc trưng (w, h, C_{in}, C_{out}, K), trong đó: h: Chiều cao của feature map; w: Chiều rộng của feature map; C_{in}: Độ sâu của đầu vào featuremap (with $C_{out} \geq C_{in}$); C_{out}: Độ sâu của đầu ra featuremap; K: Kích thước Kernel của lớp tích chập.



Hình 1. Kiến trúc C2f (YOLO-v8)

Chi phí tính toán của C2f được tính bằng (1):

$$\begin{aligned} Cost_{C2f} &= Cost_{Conv1} + n*Cost_{BottleNeck} + Cost_{Conv2} \\ &= h*w*C_{in}*C_{out}*K_1^2 \\ &+ n*(h*w*\frac{C_{out}}{2}*\frac{C_{out}}{4} + h*w*\frac{C_{out}}{2}*\frac{C_{out}}{4})*K_2^2 \\ &+ h*w*(2+n)*\frac{C_{out}}{2}*C_{out}*K_2^2 \end{aligned} \quad (1)$$

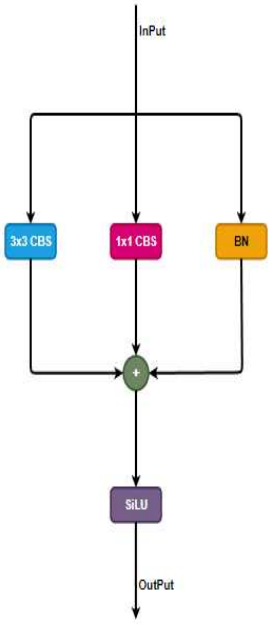
(n là một tham số của C2f, đại diện cho số lần lặp lại của khối BottleNeck, với $n \geq 1$, K_1 và K_2 là kích thước tiêu chuẩn của 2 lớp CBS, trong đó tương ứng lần lượt là: $K_1 = 1$ và $K_2 = 3$)

Giả sử $C_{in} = 3, C_{out} = 32, h = 640$, $w = 640$ (kích thước tiêu chuẩn của ảnh đầu vào), Chi phí tính toán được xác định bởi: $Cost_{C2f} = 192675840 + n*4718592000 \geq 6645350400$ (tham số) .

Như vậy, ngay cả với kích thước hình ảnh đầu vào và số vòng lặp $n = 1$, lượng tính toán cần thiết cho C2f vẫn tương đối lớn.

3.2. Cải tiến kiến trúc mô hình YOLO-v8n

Đối với nhiệm vụ phát hiện UAV thời gian thực, mô hình cần đáp ứng một số yêu cầu: mô hình phải nhẹ (lightweight) phù hợp với các thiết bị nhúng và đảm bảo nhận diện chính xác các đối tượng nhỏ trong thời gian thực.



Hình 2. Kiến trúc RepConv

Dựa trên các đề xuất và kết quả từ các nghiên cứu trước [4, 8, 12], để giảm kích thước mô hình, cần giảm số lượng tính toán trong các lớp convolutional. Do đó, module C2f được thay thế bằng một module đơn giản hơn.

Liên quan đến vấn đề phát hiện đối tượng nhỏ, một số thách thức cần được giải quyết bao gồm: không được bỏ sót bất kỳ đối tượng nào và đối tượng phải được phân biệt rõ ràng với nền. Các nghiên cứu đã chứng minh rằng lớp convolutional 3x3 hiệu quả trong việc thu thập thông tin cục bộ, đồng thời yêu cầu chi phí tính toán thấp hơn so với các lớp convolutional lớn hơn [3, 10, 11]. Hiện nay, các phương pháp chính để phát hiện đối tượng nhỏ chủ yếu dựa vào kiến trúc Vision Transformer (ViT) [3, 15-17]. Tuy nhiên, nghiên cứu cho thấy rằng mặc dù ViT mang lại những lợi thế đáng kể trong việc thu thập thông tin toàn

cục, chi phí tính toán lại rất cao do việc sử dụng cơ chế Self-Attention.

Do đó, trong bài báo này, một kiến trúc block chủ yếu dựa trên các lớp convolutional 3x3 và 1x1 được đề xuất để duy trì mức độ thông tin tương đương với C2f block trong YOLO-v8, nhưng với kích thước mô hình nhỏ hơn. Lớp C2f trong Backbone được thay thế bằng RepConv nhằm tạo ra một Backbone nhẹ hơn, đồng thời vẫn đảm bảo cung cấp đủ thông tin cho Neck.

Như đã trình bày ở trên, trong phần này, chúng tôi đề xuất một khối kiến trúc gọi là RepConv (kiến trúc của RepConv được minh họa trong Hình 2).

So sánh giữa RepConv và khối C2f. Xét một lớp với bốn tham số đặc trưng (w, h, C_{in}, C_{out}, K), Trong đó:

Chi phí tính toán với RepConv được tính bằng (2):

$$Cost_{RepConv} = h*w*C_{in}*C_{out}*K_1^2 + h*w*C_{in}*C_{out}*K_2^2 \quad (2)$$

$$Cost_{RepConv} = 10*h*w*C_{in}*C_{out} \quad (3)$$

Ngoài ra, ta có:

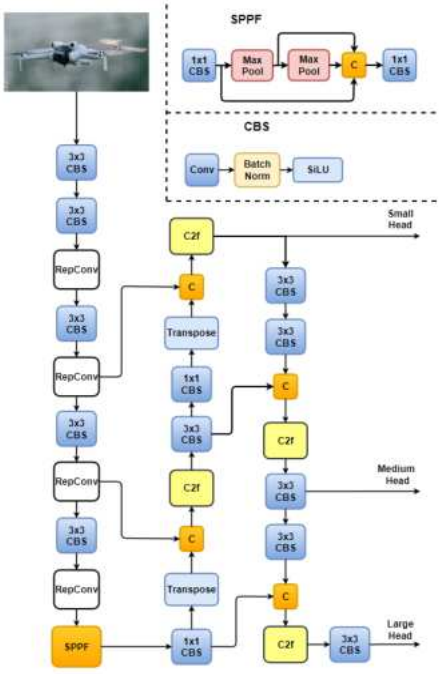
$$\begin{aligned} Cost_{c2f} &= h*w*C_{in}*C_{out} + 9*n*h*w*C_{out}*\frac{C_{out}}{2} + 9*h*w*(2+n)*\frac{C_{out}^2}{2} \\ &\geq h*w*C_{in}*C_{out} + 9*n*h*w*C_{out}*\frac{C_{out}}{2} + 27*h*w*\frac{C_{out}^2}{2} \\ &> 10*h*w*C_{out}^2 > 10*h*w*C_{in}*C_{out} \end{aligned} \quad (4)$$

Vậy $Cost_{RepConv} < Cost_{C2f}$

Như đã trình bày ở phần trên, lớp 3x3 convolutional có khả năng nắm bắt thông tin cục bộ trong một vùng không gian nhỏ hơn so với các lớp convolutional lớn hơn, chẳng hạn như 5x5 hoặc 7x7. Trong nhiệm vụ phát hiện drone, đối tượng chỉ chiếm một phần rất nhỏ trong toàn bộ không gian ảnh. Do đó, việc cho phép lớp convolutional quan sát một vùng không gian lớn khiến việc phát hiện các đặc trưng của đối tượng trở nên khó khăn.

Ngoài ra, việc bổ sung một nhánh 1x1 giữ nguyên thông tin gốc của đối tượng, sau đó được tổng hợp, giúp làm nổi bật các đặc trưng chính được trích xuất bởi lớp 3x3 layer.

Điều này cho thấy rằng RepConv hoạt động hiệu quả như mong đợi, với đối tượng mục tiêu nổi bật so với khu vực xung quanh. RepConv có khả năng thay thế C2f trong Backbone để đáp ứng các yêu cầu thời gian thực.



Hình 3. Kiến trúc của mô hình YOLORep

3.2. Kiến trúc mô hình YOLORep

Dựa trên nền tảng lý thuyết được trình bày trong phần 3.2, các khối C2f đã được thay thế bằng RepConv, như minh họa trong Hình 4. Kiến trúc trong Hình 4 chủ yếu minh họa rằng các khối C2f là thành phần chính được thay thế. Ngoài ra, phương pháp upscaling của mô hình cũng được chỉnh sửa, cụ thể là sử dụng một lớp convolutional thay vì phương pháp interpolation được sử dụng trong kiến trúc gốc. Các kỹ thuật như anchor-free design, Feature Pyramid architecture, CIoU loss, DFL, và BCE vẫn được giữ nguyên.

4. Kết quả và thực nghiệm

Trong bài báo này, tập dữ liệu UAV, được sử dụng để huấn luyện mô hình TIB-net [9], được áp dụng để huấn luyện mô hình YOLORep. Các kết quả thu được sau khi huấn luyện được sử dụng để đánh giá hiệu suất của mô hình, thực hiện các thí nghiệm ablation, và so sánh với các mô hình khác.

4.1. Tập dữ liệu

Tập dữ liệu TIB-Net UAV [9] bao gồm 2850 hình ảnh, ghi lại nhiều loại phương tiện bay không người lái (UAV), bao gồm multi-rotor UAVs và fixed-wing UAVs. Những hình ảnh này được thu thập bằng một camera đặt trên mặt đất ở khoảng cách 500 mét so với các UAV đang bay, với độ phân giải 1920 × 1080 pixel. Khung cảnh trong các hình ảnh bao gồm các cảnh quan ở độ cao thấp như bầu trời, cây cối và các tòa nhà, được ghi lại vào các thời điểm khác nhau trong ngày và dưới nhiều điều kiện thời tiết. Phân tích cho thấy UAVs chiếm chưa đến 1% diện tích trong mỗi hình ảnh.

4.2. Thiết lập và huấn luyện Mạng

Trong thí nghiệm này, dữ liệu từ TIB-net [9] được sử dụng để huấn luyện các mô hình YOLO-v8 và YOLOXpress. Thí nghiệm được thực hiện trên phần cứng gồm hai giai đoạn. Trong giai đoạn huấn luyện mô hình, nền tảng Google Colab với GPU Tesla V100 đã được sử dụng. Sau khi hoàn tất quá trình huấn luyện, mô hình được triển khai trên phần cứng Jetson Orin Nano. Bộ công cụ phát triển NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB Developer Kit được sử dụng cho các ứng dụng xử lý AI, với cấu hình gồm CPU 6-core Arm® Cortex®-A78AE v8.2 64-bit có bộ nhớ đệm 1.5MB L2 và 4MB L3, cùng GPU kiến trúc NVIDIA Ampere với 1024 CUDA cores và 32 Tensor cores. Cấu hình này cung cấp sức mạnh xử lý AI lớn hơn tới 80 lần so với thế hệ trước đó là Jetson Nano.

Bảng 1. Cấu hình huấn luyện mạng

Parameter	**values**
epochs	250
warm up epochs	10
batch size	16
Image size	640x640
Initial learning rate	0.01
Final learning rate	0.01

4.3. Huấn luyện mạng

Trước khi huấn luyện mạng, thư mục dữ liệu được chuẩn bị theo định dạng YOLO-v8, bao gồm hai thư mục: 'images' và 'labels'. Kích thước batch (batch size) được chọn là 16, và mô hình được huấn luyện trong 250 epochs với learning rate ban đầu là 0.01. Bảng 1 mô tả các tham số cấu hình được sử dụng trong quá trình huấn luyện mạng.

4.4. Các tham số đánh giá

Để đánh giá chất lượng của mô hình, các tham số như Precision (P), Recall (R), Average Precision (AP), mean Average Precision (mAP), số lượng tham số (number of parameters), kích thước mô hình (model size), và Frames Per Second (FPS) được sử dụng.

- Precision và Recall được tính toán theo các công thức (7) và (8) tương ứng:

$$P = \frac{TP}{(TP + FP)} * 100\% \tag{7}$$

$$R = \frac{TP}{(TP + FN)} * 100\% \tag{8}$$

True Positives (TP) đại diện cho số lượng đối tượng được phát hiện chính xác, False Positives (FP) đại diện cho số lượng đối tượng không phải mục tiêu nhưng bị phát hiện sai như là mục tiêu, và False Negatives (FN) đại diện cho số lượng mục tiêu không được phát hiện.

- AP và mAP được tính toán bằng cách sử dụng các phương trình (9) và (10):

$$AP = \int_0^1 p(r)d(r) \tag{9}$$

$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} AP_i \tag{10}$$

Trong đó $p(r)$ là precision tại giá trị recall r, và N biểu thị tổng số lớp. Trong bài báo này, $N = 1$ tương ứng với nhiệm vụ phát hiện UAV.

4.5. Kết quả phân tích

Trong phần này, tác động của module được thay thế trong cấu trúc của mô hình được làm rõ. Dựa trên tập dữ liệu TIB-net UAV, các thí nghiệm được thực hiện trên mô hình YOLO-v8 ban đầu và mô hình YOLORep. Những thay đổi trong các mô hình này được đánh giá thông qua phân tích định lượng các tham số được sử dụng để đo lường hiệu suất của mô hình, như được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả của khi triển khai của 2 mô hình.

Component	YOLO-v8n(a)	YOLORep(b)
P	99.524	97.672
R	97.783	98.123
mAP	96.266	95.408
Parameter (Million)	3.011	1.678
Model size	17.8	3.41
GFLOPs	8.2	4.6
Means of ACC	0.633	0.505
FPS	29.168	32.163

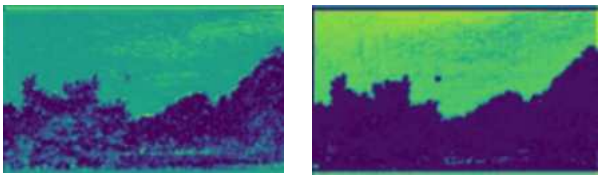
Từ kết quả trong Bảng 2 có thể rút ra những nhận xét sau:

- Mô hình YOLO-v8n đạt Precision 99.524 và Recall 97.783, cao hơn so với YOLORep, lần lượt là 97.672 và 98.123. Điều này cho thấy YOLO-v8n có độ chính xác và khả năng phát hiện đối tượng tổng thể nhỉnh hơn so với mô hình cải tiến.
- Giá trị mAP của YOLO-v8n là 96.266, cao hơn một chút so với YOLORep là 95.408. Điều này chỉ ra rằng mô hình gốc vẫn có hiệu suất tổng thể nhỉnh hơn về độ chính xác trong phát hiện đối tượng.

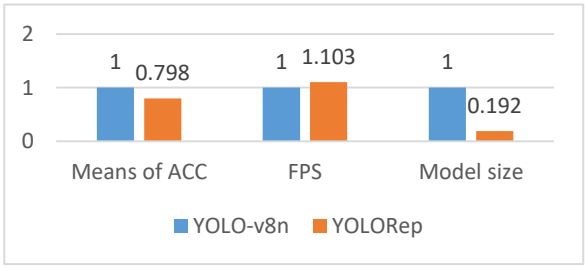
- YOLORep (b) chỉ sử dụng 1.678 triệu tham số, ít hơn đáng kể so với YOLO-v8n (a) với 3.011 triệu tham số. Sự tối ưu này cho thấy YOLORep (b) là một mô hình nhẹ hơn, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu tài nguyên phần cứng thấp. Kích thước mô hình của YOLORep lại giảm đáng kể từ 17.8 MB xuống 3.41 MB, điều này thể hiện rằng mô hình cải tiến đã được tối ưu hóa để tiết kiệm dung lượng bộ nhớ, phù hợp hơn cho các thiết bị có tài nguyên hạn chế.
- YOLORep (b) có 4.6 GFLOPs, thấp hơn đáng kể so với YOLO-v8n (a) là 8.2 GFLOPs. Điều này cho thấy YOLORep (b) yêu cầu ít tài nguyên tính toán hơn, giúp tăng tốc độ suy luận.
- Giá trị Means of ACC của YOLO-v8n là 0.633, cao hơn đáng kể so với 0.505 của YOLORep. Điều này có thể cho thấy rằng mô hình cải tiến gặp khó khăn hơn trong việc duy trì hiệu suất đồng nhất trên các tập dữ liệu khác nhau.
- Mô hình YOLORep đạt tốc độ xử lý 32.163 FPS, cao hơn so với 29.168 FPS của YOLO-v8n. Đây là một cải tiến quan trọng, giúp mô hình cải tiến hoạt động hiệu quả hơn trong các ứng dụng thời gian thực.

Mặc dù mô hình YOLORep có một số giảm sút nhỏ về Precision, Recall, và mAP so với mô hình gốc YOLO-v8n**,** nhưng nó mang lại các lợi ích đáng kể về tốc độ xử lý (FPS) và kích thước mô hình (Model size), phù hợp hơn cho các ứng dụng yêu cầu thời gian thực và tài nguyên phần cứng hạn chế. Sự khác biệt giữa các mô hình được thể hiện trong hình ảnh bản đồ đặc trưng (feature map) ở Hình 4.

Hai mô hình được triển khai trên phần cứng thực tế Jetson Orin, và các kết quả đo lường được so sánh. Kết quả được minh họa trong biểu đồ ở Hình 5, trong đó có thể quan sát rằng mô hình YOLORep sau khi thay thế module C2f bằng module RepConv trong cấu trúc, đạt được sự cân bằng giữa tốc độ xử lý và độ chính xác. Cụ thể, độ chính xác của mô hình YOLORep đạt 79.79% so với mô hình YOLO-v8n ban đầu, với mức tăng 11.027% về FPS và giảm 80.84% kích thước mô hình. Với các đặc điểm này, mô hình YOLORep có thể được triển khai hiệu quả trên phần cứng có cấu hình thấp và kích thước nhỏ gọn.



Hình 4. Hình ảnh trích xuất feature map của các mô hình YOLORep và mô hình YOLO-v8n.



Hình 5. Biểu đồ so sánh giữa YOLORep và mô hình YOLO-v8n (theo các tiêu chí acc, FPS, và kích thước model)

Hình 6 minh họa kết quả thử nghiệm thực tế trong ba trường hợp điều kiện khó khăn có kết quả như sau: Hình a: Trong điều kiện sương mù và mục tiêu nhỏ, confidence score là 0.57, cho thấy khả năng hoạt động chấp nhận được dù ánh sáng yếu và độ tương phản thấp. Hình b: Với bầu trời nhiều mây và vật cản như dây điện, confidence score giảm còn 0.42 nhưng drone vẫn được phát hiện, chứng tỏ khả năng xử lý yếu tố gây nhiễu. Hình c: Trong môi trường nhiều đối tượng nền phức tạp, confidence score giảm xuống 0.35. Dù mức độ

chính xác thấp nhất, mô hình vẫn phát hiện được drone, cho thấy tính ổn định nhất định. Mô hình bị ảnh hưởng bởi điều kiện bất lợi và gây nhiễu, nhưng vẫn giữ khả năng phát hiện mục tiêu. Mô hình có thể phát hiện drone trong các điều kiện khó khăn như sương mù, môi trường có vật cản, và nhiễu từ các đối tượng nền. Confidence score giảm khi điều kiện phức tạp hơn, đặc biệt là trong trường hợp có nhiều đối tượng gây nhiễu hoặc vật cản che khuất.



a) b) c)

Hình 6. Kết quả thử nghiệm của mô hình YOLORep trên hệ thống nhúng Jetson Orin trong các điều kiện thực tế: a) phát hiện tầm xa với kích thước mục tiêu nhỏ và thời tiết sương mù, b) phát hiện tầm xa với bầu trời nhiều mây, và c) phát hiện trong môi trường có nhiều đối tượng phức tạp

5. Kết luận và hướng phát triển trong tương lai

Mô hình YOLORep được đề xuất nhằm khắc phục hạn chế của YOLO-v8n khi triển khai trên thiết bị phần cứng cấp thấp, đặc biệt trong phát hiện UAV. Bằng cách sử dụng RepConv thay thế C2f module, YOLORep giảm kích thước mô hình và tăng tốc xử lý mà vẫn duy trì độ chính xác chấp nhận được. Kết quả trên tập dữ liệu TIB-Net cho thấy YOLORep cải thiện FPS 10,27% và giảm kích thước mô hình 80,84%. Tuy nhiên, độ chính xác trung bình giảm 20% so với YOLO-v8n. Nghiên cứu thêm sẽ cần thiết để cải thiện độ chính xác trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

1. Al-lQubaydhi, Nader, et al. (2024), "Deep learning for unmanned aerial vehicles detection: A review", *Computer Science Review*. 51, p. 100614.
2. Alsanad, Hamid R, et al. (2022), "YOLO-V3 based real-time drone detection algorithm", *Multimedia tools and applications*. 81(18), pp. 26185-26198.
3. Dosovitskiy, Alexey (2020), "An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale", *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.
4. Howard, Andrew G, et al. (2017), "MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications (2017)", *arXiv preprint arXiv:1704.04861*. 126.
5. Kim, Jun-Hwa, Kim, Namho, and Won, Chee Sun (2023), High-speed drone detection based on yolo-v8, *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE, pp. 1-2.
6. Lee, Y., et al. (2019), An Energy and GPU-Computation Efficient Backbone Network for Real-Time Object Detection, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 752-760.
7. Lv, Yaowen, et al. (2022), "High-resolution drone detection based on background difference and SAG-Yolov5s", *Sensors*. 22(15), p. 5825.

8. Sandler, Mark, et al. (2018), Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 4510-4520.
9. Sun, H., et al. (2020), "TIB-Net: Drone Detection Network With Tiny Iterative Backbone", *IEEE Access*. 8, pp. 130697-130707.
10. Szegedy, Christian, et al. (2015), Going deeper with convolutions, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1-9.
11. Szegedy, Christian, et al. (2016), Rethinking the inception architecture for computer vision, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2818-2826.
12. Terven, Juan, Córdova-Esparza, Diana-Margarita, and Romero-González, Julio-Alejandro (2023), "A comprehensive review of yolo architectures in computer vision: From yolov1 to yolov8 and yolo-nas", *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 5(4), pp. 1680-1716.
13. Wang, Chien-Yao, Bochkovskiy, Alexey, and Liao, Hong-Yuan Mark (2023), YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 7464-7475.
14. Wang, Chien-Yao, Yeh, I. Hau, and Mark Liao, Hong-Yuan (2025), YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information, *Computer Vision – ECCV 2024*, Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 1-21.
15. Wu, Tianyong and Dong, Youkou (2023), "YOLO-SE: Improved YOLOv8 for remote sensing object detection and recognition", *Applied Sciences*. 13(24), p. 12977.
16. Zhai, Xianxu, et al. (2023), "YOLO-Drone: an optimized YOLOv8 network for tiny UAV object detection", *Electronics*. 12(17), p. 3664.
17. Zhu, X., et al. (2021), TPH-YOLOv5: Improved YOLOv5 Based on Transformer Prediction Head for Object Detection on Drone-captured Scenarios, *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, pp. 2778-2788.
18. Yılmaz, Hüseyin Birkan and Oruç, Furkan (2024), "Drone Detection Performance Evaluation via Real Experiments with Additional Synthetic Darkness", *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*. 11(3), pp. 546-562.

Abtract: With the widespread use of drones, drone detection has become a critical and decisive task across various domains, particularly in security and defense. However, this task poses specific challenges, such as drones' high speed, small size, and ability to blend into surrounding environments, adversely affecting detection performance. This paper introduces enhancements to the YOLO-v8 model to improve real-time drone detection, especially when deployed on resource-constrained devices. We propose an improved model, YOLORep, which optimizes both processing speed and model size while maintaining an acceptable level of accuracy. By replacing the C2f modules in the Backbone with RepConv modules, the computational cost is significantly reduced, resulting in a 10.27% increase in processing speed (FPS) and an 80.84% reduction in model size. Although the average precision is slightly lower than the original YOLO-v8, the model remains effective for real-time drone detection. Experiments on the TIB-Net dataset confirm that this model is highly suitable for deployment on resource-limited devices, such as compact embedded systems.

Keyword: *YOLORep; UAVs; YOLO-v8*

Nghiên cứu tối ưu các hệ số bộ điều khiển PID trong bài toán điều khiển độ cao quadrotor dựa trên kỹ thuật học tăng cường

Nguyễn Xuân Tây[1*], Phạm Ngọc Văn[2]

[1] *Hệ 2, Học viện Kỹ thuật quân sự*

[2] *Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự*

[*] *Email: west.sping@gmail.com*

Tóm tắt:

Học tăng cường (RL) là một kỹ thuật của học máy với ưu thế tập trung vào việc đào tạo các mô hình học máy đưa ra một chuỗi các quyết định sao cho tác tử học đạt được mục tiêu trong môi trường không chắc chắn, có thể là phức tạp. Những công trình nghiên cứu gần đây, phương pháp sử dụng học tăng cường đã được áp dụng nhằm nâng cao độ chính xác và linh hoạt cho robot di động giải quyết các bài toán về định vị. Mục đích của phương pháp chính là đào tạo cho robot khả năng tự học để thích nghi với môi trường làm việc có thể là chưa được xác định sẵn. Bài báo sẽ đi sâu vào nghiên cứu về ứng dụng học tăng cường với thuật toán Q-learning cho quá trình điều khiển độ cao quadrotor trong một môi trường chưa xác định.

Từ khóa: *Học tăng cường (RL), Q-learning, điều chỉnh PID, thiết bị bay không người lái (UAV), quadcopter.*

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, các thiết bị bay không người lái (UAV) đã được sử dụng trong nhiều ứng dụng, một số trong đó rất phức tạp và đầy thử thách. Các lĩnh vực mà UAV được áp dụng thuộc các ngành quan trọng như y tế, quân sự, cũng như trong lĩnh vực dân sự. Các ứng dụng UAV bao gồm kiểm tra, giám sát, tuần tra, hoặc cứu hộ. Hơn nữa, các ứng dụng này ngày càng trở nên thách thức hơn. Do đó, sự tự động hóa là cần thiết để hỗ trợ giải quyết các vấn đề phức tạp này. Các vấn đề như điều hướng qua không gian chưa biết trong khi tự động tránh các chướng ngại vật, lập kế hoạch và theo dõi lộ trình thông minh, và hoàn thành nhiệm vụ được yêu cầu mà không cần can thiệp của con người.

UAV đa rotor thu hút sự chú ý nhờ kích thước nhỏ gọn, cấu trúc đơn giản, chi phí bảo trì thấp, khả năng cơ động và di chuyển theo phương thẳng đứng. Loại UAV đa rotor phổ biến nhất là quadcopter. Tuy nhiên, các quadcopter thường đối mặt với những nhiệm vụ thách thức đáng kể. Ngoài ra, có nhiều bộ phận cần được tự động hóa, chẳng hạn như điều chỉnh các nhiễu loạn, sự suy giảm của bộ truyền động, hoặc độ trễ trong truyền thông và xử lý. Để ổn định độ cao của quadcopter, cần sử dụng các thuật toán điều khiển, chẳng hạn như Bộ điều khiển Tỷ lệ - Tích phân - Vi phân (PID), điều khiển mờ, hoặc bộ điều chỉnh tuyến tính - bậc hai (LQR). Các bộ điều khiển PID [4] được sử dụng rộng rãi trong quadcopter nhờ vào việc triển khai đơn giản và tính linh hoạt trong điều chỉnh. Khi UAV hoạt động trong các môi trường phức tạp và chưa được biết trước, cần có các bộ điều khiển thích nghi thông minh.

2. Học tăng cường

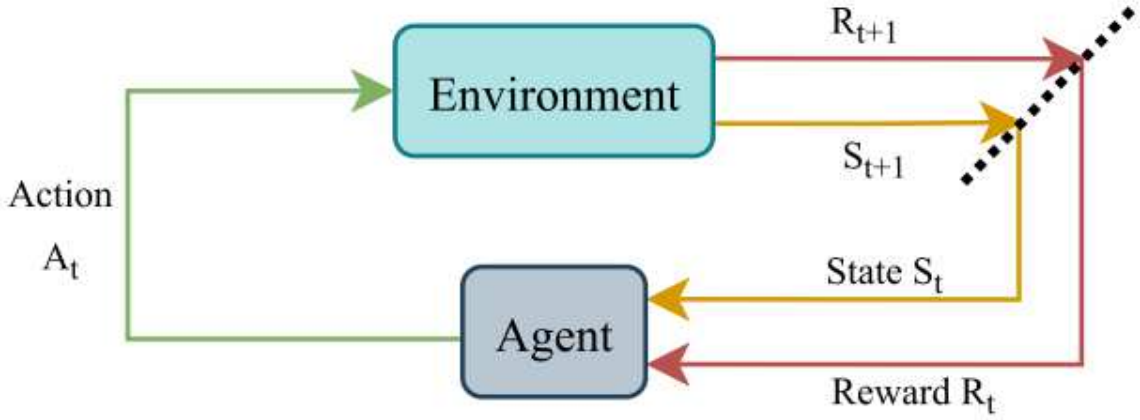
Học máy là một lĩnh vực giúp máy móc học được các mô hình phức tạp từ dữ liệu để thực hiện các nhiệm vụ chưa được dự đoán trước. Học máy truyền thống được chia thành ba loại chính: học có giám sát, học không giám sát, và học tăng cường (RL). RL là một nhánh của học máy, nơi một tác nhân học hỏi thông qua thử và sai, tức là trong khi tương tác với môi trường, tác nhân sẽ nhận được phần thưởng nếu hành động mong muốn được thực hiện và bị phạt nếu

không. Theo nghiên cứu, có ba loại chính của các thuật toán RL. Mỗi loại đều có các trường hợp sử dụng cụ thể:

- Phương pháp Lập trình Động (Dynamic Programming Methods): Yêu cầu mô hình của môi trường, nhưng được phát triển toán học một cách bài bản.
- Phương pháp Monte Carlo: Đơn giản về mặt khái niệm và không yêu cầu mô hình của môi trường, nhưng không phù hợp để tính toán từng bước.
- Phương pháp Học Tạm thời (Temporal-Difference Learning Methods): Phức tạp để phân tích, nhưng không yêu cầu mô hình của môi trường và hoàn toàn gia tăng.

Các vấn đề RL có thể được hình thức hóa thành Quy trình Quyết định Markov (MDP). Trong MDP, một tác nhân tương tác với môi trường theo thời gian. Bằng cách quan sát trạng thái của môi trường tại mỗi bước, tác nhân chọn một hành động thích hợp để thực hiện, điều này sẽ chuyển môi trường sang một trạng thái khác và sau đó, tác nhân sẽ nhận được phần thưởng như một hệ quả của hành động đã thực hiện. Vì vậy, mục tiêu của tác nhân là tối đa hóa tổng phần thưởng mà nó có thể nhận được từ việc thực hiện một chuỗi hành động trong một môi trường nhất định. Điều này có nghĩa là, tác nhân không tập trung vào phần thưởng ngay lập tức mà là vào tổng phần thưởng mà nó sẽ nhận được. Do đó, các thành phần của MDP [5] bao gồm:

- Tác nhân (Agent)
- Môi trường (Environment)
- Trạng thái (States)
- Hành động (Actions)
- Phần thưởng (Rewards)

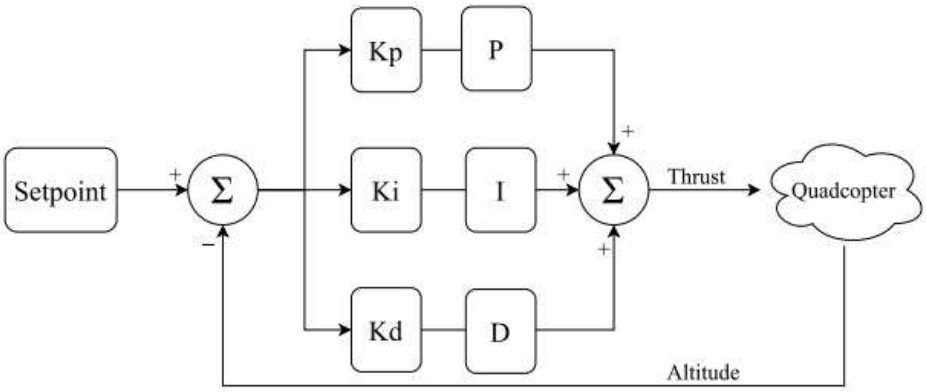


Hình 1: Sơ đồ tổng quát kỹ thuật học tăng cường

3. Bộ điều khiển PID

Một hệ thống điều khiển bao gồm một phần tử điều khiển (ví dụ, bộ điều khiển của quadcopter), khi nhận được đầu vào, sẽ tạo ra đầu ra mục tiêu với hiệu suất mong muốn. Các hệ thống điều khiển có hai cấu hình chung: mạch hở và mạch kín, như được minh họa trong Hình 2. Không giống như mạch hở, nơi phản hồi không được trả lại hệ thống để sửa lỗi, mạch kín cho phép hệ thống phục hồi lỗi bằng cách điều chỉnh phần tử điều khiển thông qua vòng phản hồi [2].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)\,dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$



Hình 2: Sơ đồ tổng quát bộ điều khiển PID

Do tính đơn giản và tính thực tiễn của bộ điều khiển PID, nhiều quy trình công nghiệp hiện nay đã áp dụng nó. Các tham số của bộ điều khiển PID phụ thuộc vào sự không chắc chắn của quy trình và các điều kiện vận hành. Khi điều chỉnh các tham số PID, có hai cách tiếp cận tổng quát: phương pháp cổ điển và hiện đại. Phương pháp điều chỉnh PID cổ điển thì đơn giản và hiệu quả về tính toán. Nó cung cấp một điểm khởi đầu cho việc tinh chỉnh cần thiết, nhưng hạn chế của các phương pháp này là chúng thường giả định về phần tử điều khiển và đầu ra mong muốn. Dưới đây là một số phương pháp điều chỉnh PID cổ điển được biết đến rộng rãi:

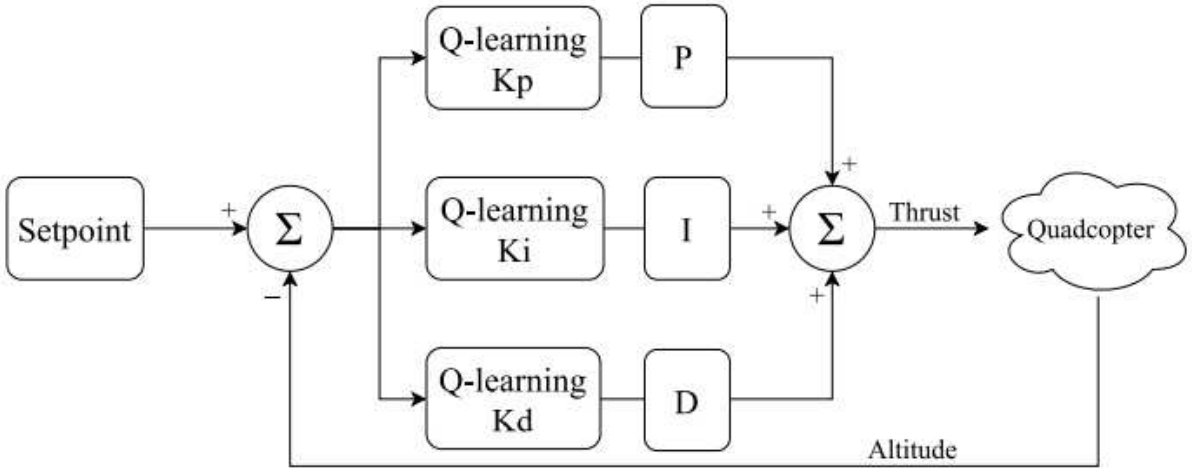
- Phương pháp thử và sai
- Phương pháp đáp ứng bước Ziegler-Nichols
- Phương pháp đáp ứng tần số Ziegler-Nichols
- Phương pháp Cohen-Coon

4. Tối ưu hệ số PID sử dụng kỹ thuật học tăng cường

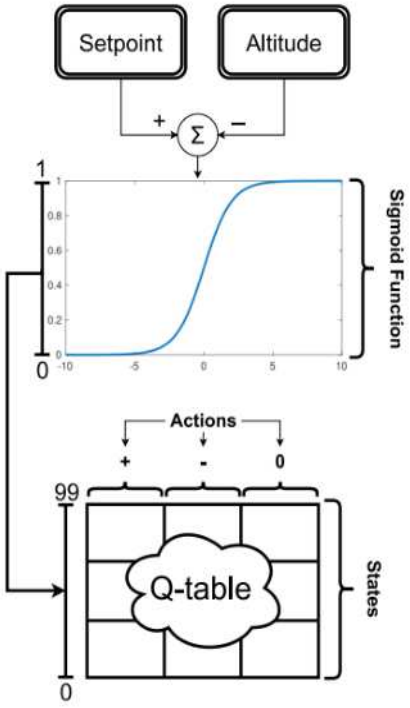
Dựa trên MDP (Markov Decision Process) để xây dựng bài toán ra quyết định theo trình tự. Tác tử cảm nhận trạng thái SSS từ môi trường, và dựa trên cặp trạng thái-hành động (s,a)(s, a)(s,a) đã thực hiện, nó nhận được một phần thưởng rrr. Sử dụng phần thưởng này, tác tử cập nhật bảng Q (Q-table) bằng cách sử dụng hàm giá trị hành động q(s,a)q(s, a)q(s,a), sau đó tác tử sẽ quyết định hành động at+1a_{t+1}at+1 nào cần thực hiện ở bước thời gian tiếp theo dựa trên trạng thái hiện tại bằng chiến lược ϵ\epsilonϵ-tham lam (epsilon-greedy). Chúng ta cần giải quyết vấn đề điều chỉnh bộ điều khiển PID bằng thuật toán học Q-learning để đạt được điểm đặt mong muốn.

Trong trường hợp này, thiết bị bay bốn cánh (quadcopter) là tác tử, cảm nhận độ cao từ môi trường bằng cách sử dụng các cảm biến như sonar, lidar, camera, v.v. Tập hợp các trạng thái SSS có độ lớn là 100, tức là |S|=100|S| = 100|S|=100. Trạng thái của thiết bị bay bốn cánh sẽ được quyết định bởi đầu ra của hàm trạng thái, xem thuật toán 3.1. Hàm trạng thái có đầu vào là lỗi (error), xem thuật toán 3.2. Tập hợp các hành động được thiết kế cẩn thận để mô phỏng hành vi tự nhiên của việc điều chỉnh giá trị của một núm điều chỉnh. Núm điều chỉnh bị giới hạn bởi

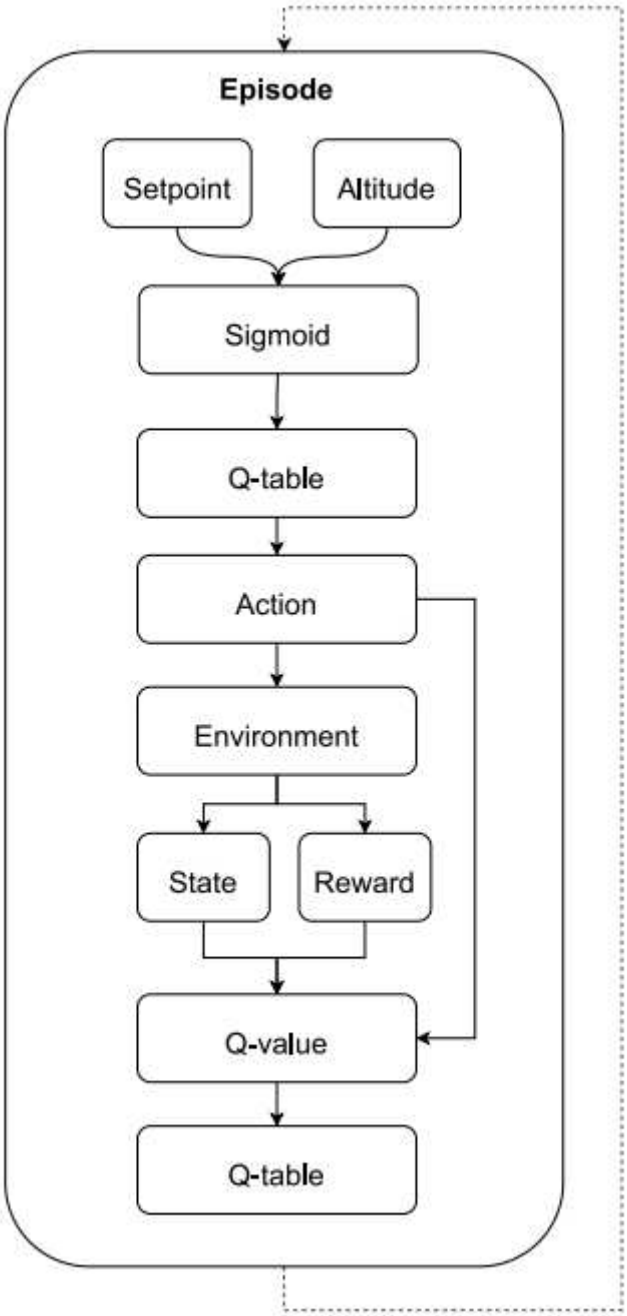
ba hành động: tăng [+1][+1][+1], giảm [−1][-1][−1], hoặc giữ nguyên [0][0][0]. Do đó, tập hợp các hành động AAA có ba phần tử A={0,1,−1}A = \{0, 1, -1\}A={0,1,−1}. Hơn nữa, phần thưởng như được chỉ ra trong hàm phần thưởng (xem Thuật toán 3.3) sẽ được gán dựa trên lỗi được tạo ra bởi hàm lỗi trong Thuật toán 3.2.



Hình 3.1: Sơ đồ tối ưu hệ số bộ điều khiển PID sử dụng Q-learning



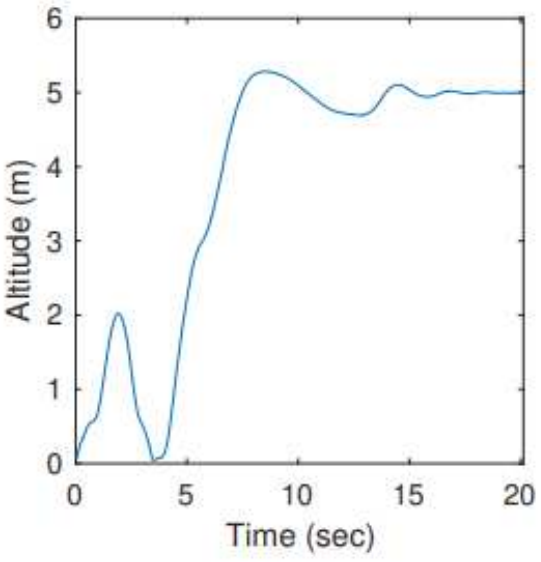
Hình 3.2: Sơ đồ thuật toán hàm Sigmoid



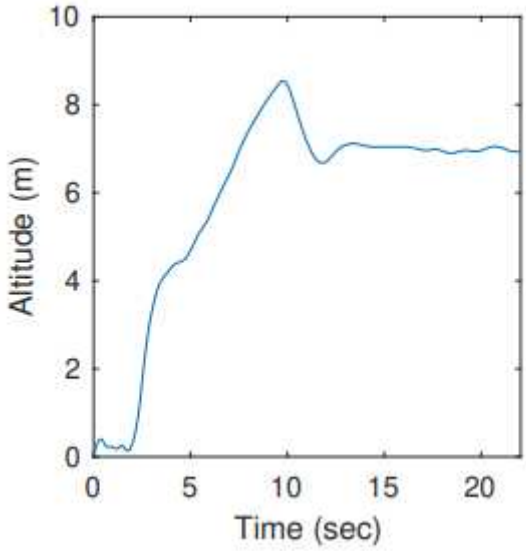
Hình 3.3: Sơ đồ thuật toán hàm episode

Kết quả đạt được khi mô phỏng

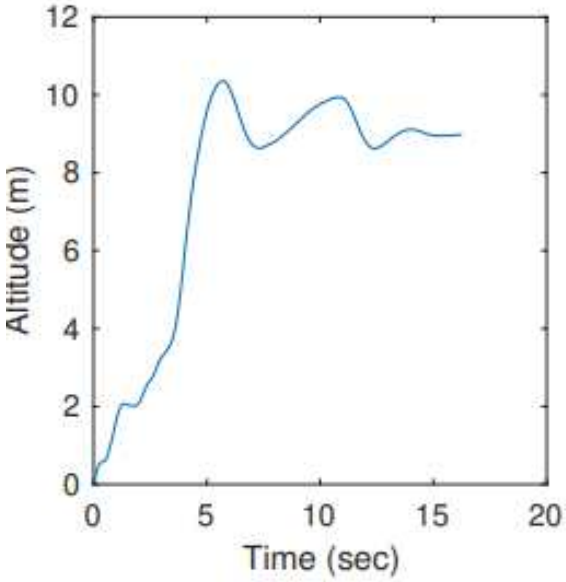
Phần lập trình mô phỏng được triển khai trên phần mềm Matlab và kết qua đạt được sau khi chạy xong chương trình được kết quả sau



Hình 4: Setpoint Altitude: 5m



Hình 5: Setpoint Altitude: 7m



Hình 6: Setpoint Altitude: 9m

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã chứng minh rằng việc sử dụng học tăng cường trực tuyến có thể thay thế phương pháp thử và sai trong việc điều chỉnh PID cho quadcopter. Các kết quả thu được không chỉ nâng cao hiệu suất mà còn giảm thời gian và chi phí cần thiết để thiết kế hệ thống. Trong tương lai, phương pháp này có thể được mở rộng để áp dụng cho các hệ thống phức tạp hơn, chẳng hạn như điều khiển UAV trong đội hình hoặc điều hướng tự động trong môi trường

hoàn toàn không xác định. Những hướng nghiên cứu tiếp theo có thể bao gồm: Áp dụng RL vào điều khiển đội hình UAV để phối hợp thực hiện các nhiệm vụ phức tạp; Nghiên cứu việc tích hợp các thuật toán RL tiên tiến hơn, chẳng hạn như Deep Q-learning, để cải thiện khả năng học hỏi trong các môi trường lớn; Khám phá các hàm kích hoạt khác có thể tối ưu hóa hơn nữa hiệu suất của RL trong điều chỉnh PID.

Tài liệu tham khảo

[1] S. Abdelhay and A. Zakriti. Modeling of a Quadcopter Trajectory Tracking System Using PID Controller. *12th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, INTER-ENG 2018, 4–5 October 2018, Tirgu Mures, Romania.

[2] Y. Alrubyli and A. Bonarini, Using Q-learning to Automatically Tune Quadcopter PID Controller Online for Fast Altitude Stabilization, *2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Guilin, Guangxi, China, 2022, pp. 514-519, doi: 10.1109/ICMA54519.2022.9856292.

[3] Sebag M. 2014. *A tour of machine learning: an AI perspective*. AI Commun; 27: 11-23.

[4] B. Anderson, B. Fidan, C. Yu, and D. Walle. UAV formation control: Theory and application. In *Recent advances in learning and control*, pages 15–33. Springer, 2008.

[5] N. Bernini, M. Bessa, R. Delmas, A. Gold, E. Goubault, R. Pennec, S. Putot, and F. Sillion. A few lessons learned in reinforcement learning for quadcopter attitude control. In *Proceedings of the 24th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control,* pages 1–11, 2021.

[6] J. J. Chiew and M. J. Aftosmis. Efficient simulation of multi-rotor vehicles with low reynolds number propellers. In *2018 Applied Aerodynamics Conference*, page 4119, 2018.

Optimizing PID Controller Parameters in Quadrotor Altitude Control Using Reinforcement Learning Techniques

Abstract: Reinforcement Learning (RL) is a machine learning technique that focuses on training models to make a sequence of decisions so that the learning agent achieves its objective in an uncertain and potentially complex environment. In recent studies, reinforcement learning methods have been applied to improve the accuracy and flexibility of mobile robots in solving localization problems. The primary goal of this approach is to train robots to learn autonomously and adapt to unknown working environments. This paper explores the application of reinforcement learning using the Q-learning algorithm for quadrotor altitude control in an uncertain environment.

Keywords: Reinforcement Learning (RL), Q-learning, PID tuning, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), quadcopter.

Xây dựng thuật toán phát hiện đối tượng ứng dụng cho hệ quang điện tử trên tàu mặt nước sử dụng mô hình học sâu

Nguyễn Minh Thuận[1], Vũ Đức Trường[2], Đỗ Nam Thắng[3], Trương Xuân Tùng[2]

[1]*Hệ QLHVSĐH, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

[2]*Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

[3]*Phòng Đào tạo, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự*

Email: junioweak2000@gmail.com; Tel: 0338.888.670

Tóm tắt

Ngày nay, cùng dưới sự phát triển của công nghệ học sâu thì nhu cầu giám sát an ninh quốc gia trên biển ngày càng cao, do đó trong nghiên cứu này tôi đề xuất một thuật toán phát hiện đối tượng dựa trên mô hình YOLOv8, để áp dụng cho các hệ quang điện tử trên tàu mặt nước. Nghiên cứu tập trung vào việc cải tiến mô hình YOLOv8 về cân bằng độ chính xác và giảm tham số mô hình, để hệ thống có thể phản hồi theo thời gian thực và phù hợp với điều kiện ánh sáng và thời tiết thay đổi trên biển. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất có kích thước nhỏ, nhẹ, ổn định, có độ nhạy cao, đáp ứng tốt yêu cầu theo dõi và phát hiện mục tiêu thời gian thực và giúp tăng khả năng giám sát tự động cho các hệ quang điện tử trên tàu mặt nước. Nghiên cứu mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong giám sát hàng hải, hỗ trợ đảm bảo an toàn và an ninh cho các tàu hoạt động trên biển.

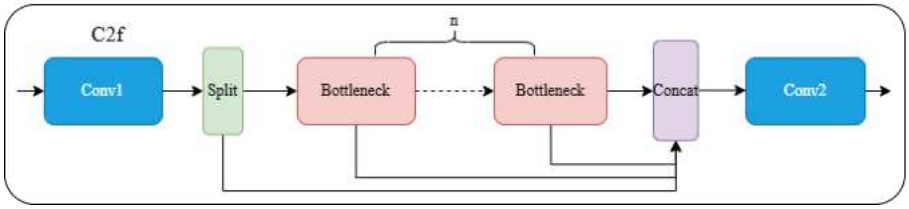
Từ khóa: *YOLO; Object Detection; phát hiện tàu mặt nước; Deep Learning.*

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, trong lĩnh vực quân sự, các tàu mặt nước hiện đại được trang bị hệ thống vũ khí công nghệ cao, radar tiên tiến giúp nâng cao khả năng phòng thủ, tấn công chính xác các mục tiêu từ xa, đặt ra thách thức lớn về an ninh, đặc biệt là kiểm soát và giám sát các tàu mặt nước nhằm ngăn chặn các nguy cơ như gián điệp, thu thập thông tin tình báo. Do đó việc áp dụng các giải pháp kỹ thuật hiện đại nhằm phát hiện và cảnh báo sớm các tàu mặt nước lạ đã trở thành trọng tâm nghiên cứu. Các công nghệ như thị giác máy tính và học sâu đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiệm vụ này: SeaShips: A Large-Scale Precisely Annotated Dataset for Ship Detection [1], Real-Time Long-Distance Ship Detection Architecture Based on YOLOv8 [2], A streamlined approach for intelligent ship object detection using EL-YOLO [3] đều cho kết quả khả quan. Tuy nhiên, YOLOv8 vẫn tồn tại hạn chế, như độ chính xác bị ảnh hưởng bởi điều kiện ánh sáng, góc quan sát, kích thước mục tiêu nhỏ, bị che khuất, số lượng tham số vẫn cao. Để khắc phục những hạn chế này, mô hình YOLOv8Plus đã được phát triển dựa trên kiến trúc của YOLOv8 nhằm đáp ứng tốt hơn các yêu cầu của bài toán phát hiện tàu mặt nước. Kết quả thực nghiệm cho thấy YOLOv8Plus có kích thước mô hình nhẹ hơn, chi phí tính toán thấp, giảm số lượng tham số, độ chính xác cải thiện so với phiên bản gốc.

2. Lý thuyết

Trong mô hình YOLOv8, lớp C2f có nhiều tầng tích chập và lặp lại, dẫn đến việc tiêu tốn nhiều tài nguyên tính toán. Hình 1 sau đây là mô tả kiến trúc của khối C2f:



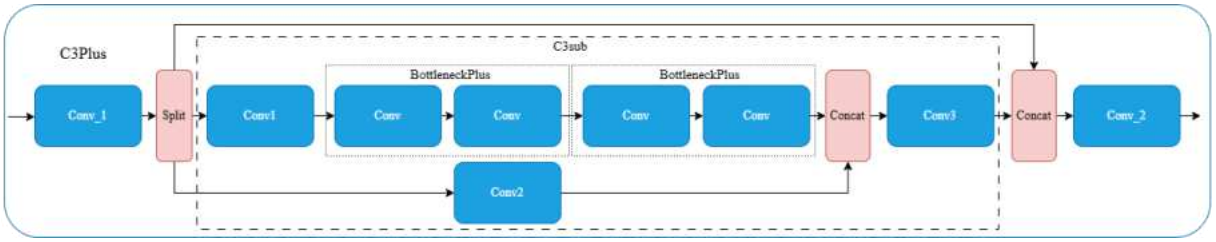
Hình 1: Kiến trúc khối C2f trong mô hình YOLOv8.

Để xây dựng thuật toán phát hiện đối tượng tàu mặt nước sử dụng mô hình học sâu, chúng tôi chọn mô hình YOLOv8 để cải tiến. Dưới đây là các khối mà chúng tôi đã chỉ ra:

2.1. C3Plus

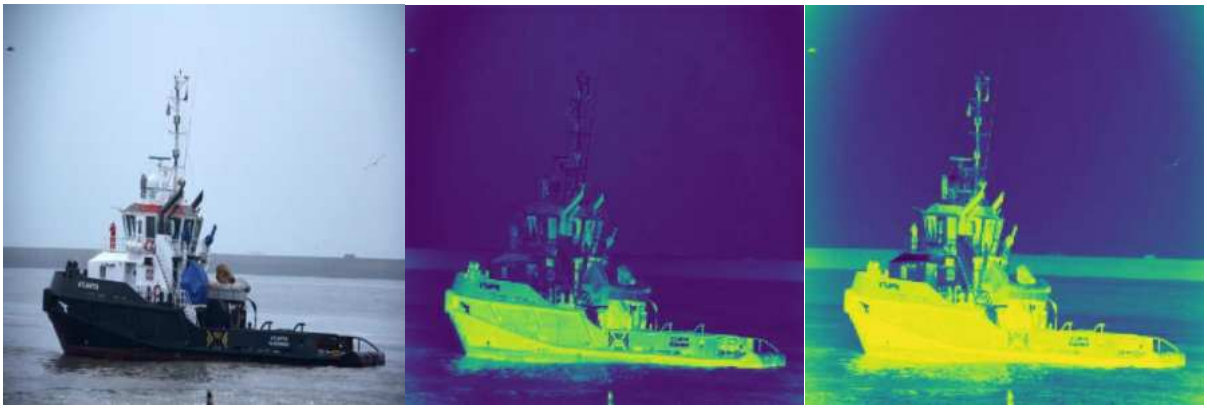
Kiến trúc mô-đun C3Plus dựa trên kiến trúc C2f và cải tiến nó với hai thành phần mới: BottleneckPlus, C3sub:

Mô-đun BottleneckPlus là thành phần then chốt trong kiến trúc C3Plus, bên trong gồm hai lớp tích chập nối tiếp với kernel 3×3, tuy kiến trúc rút gọn đi nhưng khả năng biểu diễn đặc trưng cũng vô cùng mạnh mẽ. Mô-đun C3sub kế thừa từ lớp C3 bằng cách cho phép sử dụng các kích thước kernel linh hoạt để dễ dàng trích xuất đối tượng ở các kích thước khác nhau; bên trong C3sub có hai BottleneckPlus nối tiếp để cải thiện, tối ưu khả năng trích xuất đặc trưng trong mạng nơ-ron sâu. Hình 2 sau đây biểu diễn kiến trúc lớp BottleneckPlus, C3sub:



Hình 2: Kiến trúc lớp BottleneckPlus, C3sub bên trong C3Plus.

Trong Hình 3 sau đây mô tả khi một bức ảnh đi qua lớp C3Plus, chúng ta có thể thấy rằng C3Plus đang làm việc khá tốt, đối tượng tàu kéo tương đối nổi bật so với không gian xung quanh, trích xuất đặc trưng những chi tiết thân tàu tốt hơn.



(a) *(b)* *(c)*

Hình 3: So sánh bản đồ đặc trưng: (a): là ảnh gốc đầu vào; (b): bản đồ chú ý đặc trưng đầu ra của lớp C2f; (c): bản đồ chú ý đặc trưng đầu ra của lớp C3Plus.

2.2. PSA (Position-wise Spatial Attention)

a) Attention

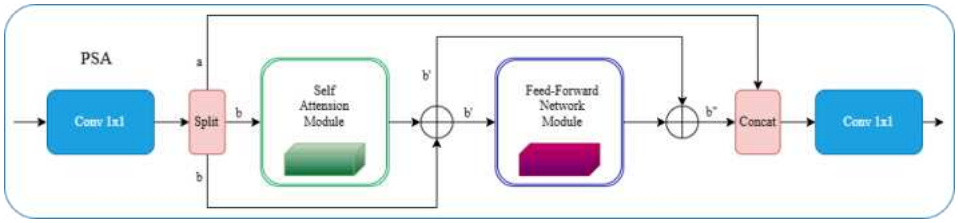
Khối Attention trong học sâu là một mô-đun quan trọng được thiết kế để thực hiện self-attention [4], giúp mô hình tập trung vào các vùng đặc trưng quan trọng, xác định mức độ tương đồng, phân biệt giữa các đối tượng trong dữ liệu đầu vào. Giả sử đầu vào $\boldsymbol{X} \in \boldsymbol{R}^{B\times C\times H\times W}$ và số lượng phần tử không gian đi qua lớp là $N = H\times W$ thì ta có thể xác định các thành phần tham số như sau:

$$Q,K,V = Split(qkv(X,W_{qkv}),\dim = 2),\ \boldsymbol{Q,K,V} \in \boldsymbol{R}^{B\times num_heads\times N\times head_\dim} \quad (1)$$

Trong đó: $Query\ (Q)$: truy vấn thông tin quan trọng; $Key\ (K)$: để đánh giá độ tương đồng giữa các đặc trưng; $Value\ (V)$: giá trị truyền tải dựa trên trọng số; W_{qkv}: là trọng số của lớp tích chập; num_heads: số lượng phần đầu chú ý; $head_dim$: kích thước của mỗi đầu chú ý; qkv: lớp tích chập tính toán các tham số Q, K, V. Thông qua các tham số Q, K để xác định mức độ liên quan giữa các phần tử trong bản đồ đặc trưng.

b) Position-wise Spatial Attention (PSA)

Khối PSA được sử dụng để tăng cường khả năng phân biệt các đối tượng trong không gian hình ảnh bằng cách tận dụng cơ chế tự chú ý thông minh (Self attention - SA), sau đó thông tin được tăng cường trích xuất đặc trưng không gian bởi (Feed-forward network - FFN) với hai lớp tích chập, sau đó đầu ra cộng với đầu vào, rồi chuẩn hóa đặc trưng bằng lớp tích chập kernel 1×1 ở đầu ra. Hình 4 sau đây mô tả thông tin khi đi qua lớp PSA:

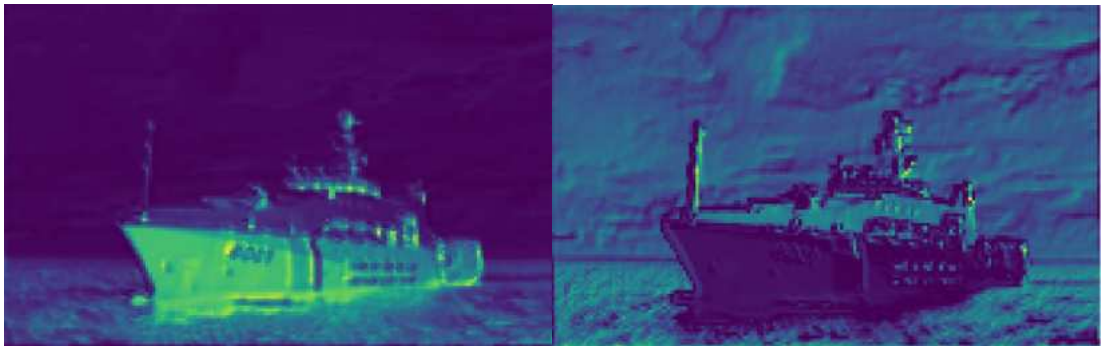


Hình 4: Position-wise Spatial Attention Module (PSA).

Qua Hình 5 bên dưới, ta có thể thấy rằng khối PSA đã làm tốt việc trích xuất đặc trưng không gian, đối tượng tàu 8001 tương đối rõ nét trên nền, có sự phân biệt rõ ràng giữa các phân vùng không gian, các nét biểu diễn đặc trưng đậm hơn, thể hiện được chiều sâu so với khối SPPF vẫn còn mờ nhạt, chưa thể hiện sự phân vùng rõ ràng so với nền mặt biển.



(a) *(b)*

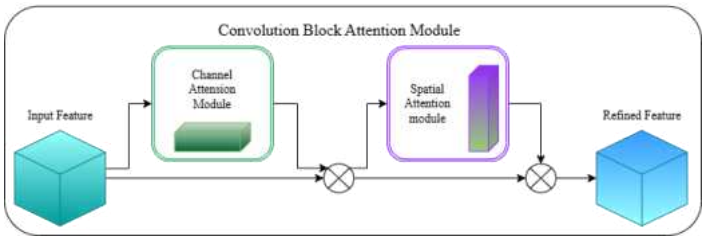


(c)

Hình 5: So sánh bản đồ đặc trưng: (a): là ảnh gốc đầu vào; (b): bản đồ chú ý đặc trưng đầu ra của khối SPPF; (c): bản đồ chú ý đặc trưng đầu ra của khối PSA.

2.3. CBAM (Convolutional Block Attention Module)

Sơ đồ khối chức năng tổng quát của khối CBAM [5] được thể hiện trên Hình 6 sau đây:



Hình 6: Sơ đồ khối chức năng của CBAM.

a) Channel Attention (CA)

Trong CBAM mỗi kênh của bản đồ đặc trưng được xem xét như là một nhánh phát hiện các đặc trưng riêng [6], sự chú ý kênh tập trung vào "cái gì đó trong ảnh" thì đó là ý nghĩa của hình ảnh đầu vào. CA được thiết kế để học các trọng số chú ý theo từng kênh, cho phép mô-đun tập trung vào các kênh có đặc trưng quan trọng hơn và điều chỉnh kênh đầu vào tương ứng với các trọng số đã học.

Bản đồ đặc trưng chú ý kênh được tính như sau:

$$\begin{aligned} M_c(F) &= \sigma(MLP(AvgPool(F)) + MLP(MaxPool(F))) \\ &= \sigma(W_1(\mathrm{Re}\,Lu(W_0(F_{avg}^c))) + W_1(\mathrm{Re}\,Lu(W_0(F_{\max}^c)))) \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó: σ là hàm kích hoạt sigmoid để chuẩn hóa đầu ra trong khoảng [0, 1]; MLP: là một Multi-layer Perceptron bao gồm hai lớp kết nối đầy đủ (Fully connected); $AvgPool(F)$: thực hiện average pooling trên không gian của đầu vào F để tạo ra một vector đặc trưng F_{avg}^c; $MaxPool(F)$: thực hiện max pooling [7] trên không gian đầu vào F để tạo ra một vector đặc trưng $F_{\max}^c$; W_0, W_1 là các trọng số của MLP.

b) Spatial Attention (SA)

Khác với chú ý kênh, chú ý về không gian tập trung vào "ở đâu" là một phần thông tin bổ sung quan trọng cho chú ý kênh, được thiết kế để học các trọng số chú ý không gian, giúp mô hình tập trung vào các vị trí quan trọng hơn trong không gian của đặc trưng đầu vào.

Đầu ra bản đồ chú ý không gian được tính như sau:

$$\begin{aligned} M_s(F') &= \sigma(f^{7\times7}([AvgPool(F'); MaxPool(F')])) \\ &= \sigma(f^{7\times7}([F_{avg}^s; F_{\max}^s])) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: $f^{7\times7}$: Là một phép tích chập (Convolution) với kích thước bộ lọc 7×7 cho phép mô-đun thu thập thông tin từ một vùng rộng hơn trong không gian, từ đó cải thiện khả năng chú ý đến các đặc trưng không gian quan trọng. Trên Hình 7, kết quả khối CBAM được tích hợp vào mô hình YOLOv8Plus.



(a) *(b)*

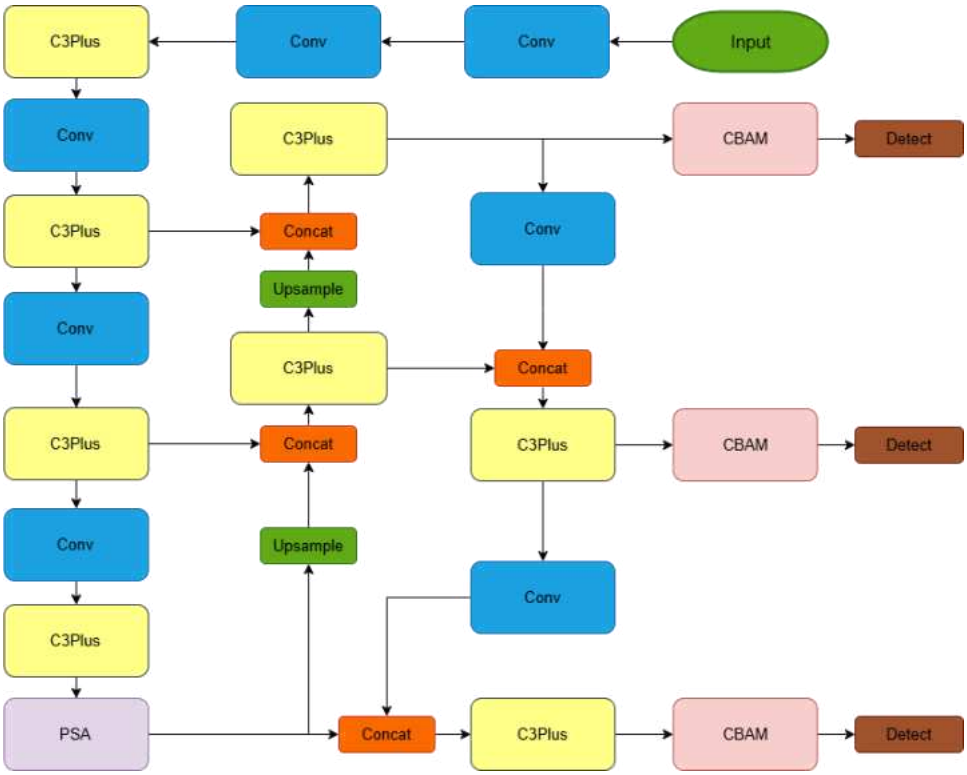


(c) *(d)*

Hình 7: So sánh bản đồ hetamap: (a): là ảnh gốc đầu vào; (b): bản đồ chú ý đặc trưng đầu ra của mô hình YOLOv8n; (c): bản đồ chú ý đặc trưng của YOLO11n; (d): bản đồ chú ý đặc trưng đầu ra của mô hình YOLOv8Plus có khối CBAM.

3. Phương pháp

Việc hình thành các khối chức năng chuyên biệt trong mô hình nhận diện đối tượng là hết sức cần thiết để cải thiện hiệu quả phát hiện tàu mặt nước. Trong mô hình chúng tôi đã áp dụng khối C3Plus để tăng cường trích xuất đặc trưng hình ảnh từ những chi tiết đơn giản đến phức tạp. Khối PSA được sử dụng cuối phần "Backbone" để phân biệt, nhận dạng và đánh giá sự tương đồng giữa các đối tượng theo trọng số, mã hóa vị trí không gian toàn cục của đối tượng trong ảnh. Về khối CBAM chúng tôi đặt tại đầu ra phần phát hiện "Detect" [8] là nhằm giúp mô hình tăng cường tập trung vào các vùng đối tượng liên quan đến tàu, bỏ qua nhiễu không quan trọng. Dựa vào cơ sở lý thuyết đã trình bày trong các phần 2.1, 2.2, 2.3, chúng tôi thay thế các khối C2f bởi C3Plus, SPPF bởi PSA và bổ sung thêm CBAM phía trước khối Detect. Chúng tôi đề xuất kiến trúc mô hình YOLOv8Plus cải tiến như trên Hình 8:



Hình 8: Kiến trúc mô hình YOLOv8Plus.

4. Kết quả

4.1 Tổng quan về bộ dataset

Bộ dữ liệu "PASCAL VOC" (Visual Object Classes) [9] chứa 21503 bức ảnh, trong đó: tập train/val có 16551 bức ảnh và tập test có 4952 bức ảnh. Bộ dữ liệu "Ship custom dataset" chứa 22,813 bức ảnh, trong đó: tập train có 20,004 bức ảnh, tập val có 1,965 bức ảnh và tập test có 844 bức ảnh. Bộ dữ liệu Ship custom dataset bao gồm 10 loại đối tượng tàu mặt nước.

4.2. Cấu hình mô hình để huấn luyện:

Chúng tôi huấn luyện mạng với thông số cấu hình như sau: batch size = -1, epochs = 500, image size = 640×640, initial learning rate = 0.01, final learning rate = 0.01, optimizer = "SGD", momentum = 0.937, patience = 6. Thử nghiệm này được thực hiện trên thiết bị phần cứng: CPU: i7-13650HX, GPU: NVIDIA GeForce RTX 4060 , GPU memory size: 8GB, RAM : 32GB, operating systems: Win 11, deeplearning architecture: Pytorch2.3.1 + Cuda12.1 + cudnn12.1 + Python 3.10.14.

Thiết lập hàm Loss function của YOLOv8 như sau:

$$Loss_{total} = \lambda_{box} Loss_{box} + \lambda_{cls} Loss_{cls} + \lambda_{obj} Loss_{obj} \quad (4)$$

Trong YOLOv8, các trọng số $\lambda_{box}, \lambda_{cls}, \lambda_{obj}$ được sử dụng để cân bằng tầm quan trọng của từng thành phần trong hàm Loss, chọn các trọng số như sau: $\lambda_{box} = 7,5$: Box Loss thường được ưu tiên cao. $\lambda_{obj} = 1,0$: Objectness Loss có trọng số trung bình. $\lambda_{cls} = 0,5$: Classification Loss ít được ưu tiên hơn.

4.3. Các chỉ số đánh giá

a) Precision: đo lường tỷ lệ các dự đoán đúng trong tất cả các dự đoán đối tượng quan tâm. Precision cao thể hiện ít phát hiện nhầm đối tượng, công thức tính toán như sau:

$$Precision = \frac{True_Positives(TP)}{True_Positives(TP) + False_Positives(FP)} \quad (5)$$

Trong đó: TP (True positives) biểu thị số lượng đối tượng được phát hiện chính xác; FP (Fale positives) biểu thị số lượng đối tượng khác được phát hiện là mục tiêu; FN (False negatives) biểu thị số lượng mục tiêu không được phát hiện.

b) Recall: đo lường khả năng phát hiện đầy đủ các đối tượng thực tế. Recall cao thể hiện mô hình ít bỏ sót đối tượng. Công thức tính như sau:

$$Recall = \frac{True_Positives(TP)}{True_Positives(TP) + False_Negatives(FN)} \quad (6)$$

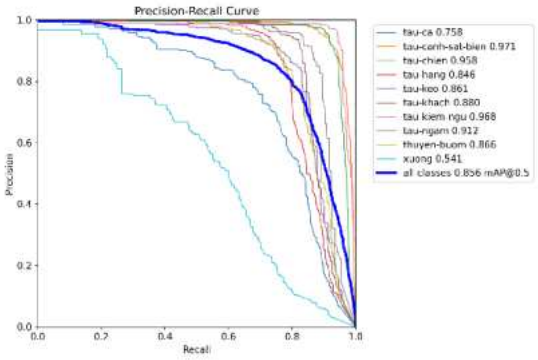
4.4. Kết quả thử nghiệm

Chúng tôi đã tiến hành thử nghiệm các mô hình YOLOv8n, YOLO11n và YOLOv8Plus trên bộ VOC dataset, Ship custom dataset. Kết quả đánh giá trên các chỉ số được thể hiện qua Bảng 1 sau đây:

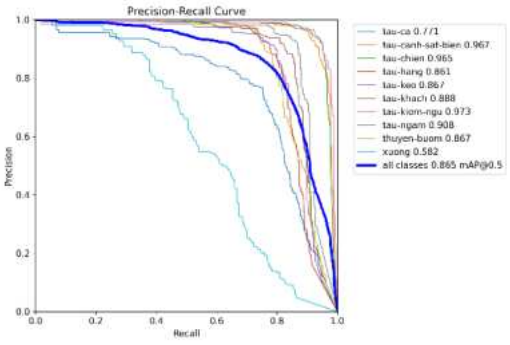
Bảng 1: Kết quả đánh giá mô hình trên bộ VOC dataset, Ship custom dataset.

CHỈ SỐ	VOC DATASET			SHIP CUSTOM DATASET		
	YOLOv8n	**YOLO11n**	**YOLOv8Plus**	**YOLOv8n**	**YOLO11n**	**YOLOv8Plus**
Precision	0.801	0.803	**0.804**	0.86	0.882	**0.886**
Recall	0.72	0.734	**0.737**	**0.804**	0.8	0.786
mAP50	0.802	0.808	**0.816**	0.856	**0.865**	0.859
mAP50-95	0.597	0.610	**0.616**	0.689	**0.708**	0.685
Layers	**255**	328	321	**225**	295	321
Parameters	3,488,316	3,175,788	**2,760,818**	3,012,798	2,912,430	**2,758,868**
Model size	7.2MB	6.7MB	**5.8MB**	6.3MB	6.1MB	**5.8MB**
Gflops	8.2	7.7	**7.6**	8.2	7.7	**7.6**
Inference times	**1.1ms**	1.2ms	1.2ms	**1.5ms**	1.6ms	1.6ms
Average inference time	**0.0106s**	0.0118s	0.0112s	**0.0092s**	0.0110s	0.0111s
Frames per second	**94.57**	84.47	89.04	**108.26**	90.61	89.96

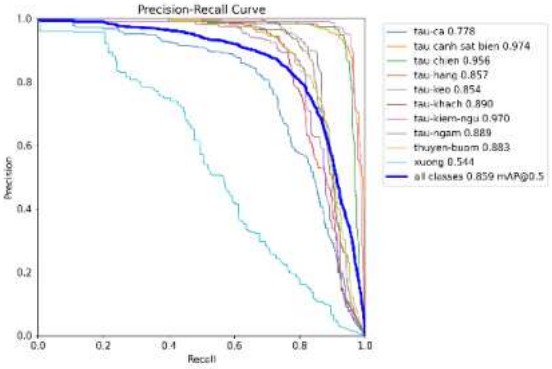
Để đánh giá hiệu suất phát hiện tổng thể của YOLOv8Plus, chúng tôi đã tiến hành phân tích đường cong PR cho cả YOLOv8n, YOLO11n và YOLOv8Plus trên Ship Custom Dataset. Kết quả được mô tả trong Hình 9.



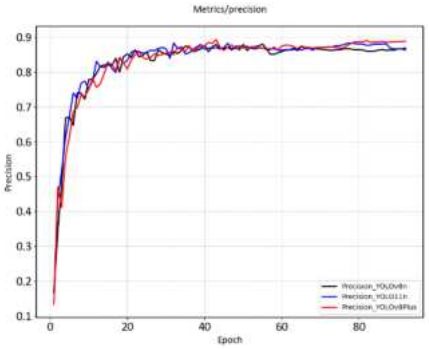
(a): PR curve của YOLOv8n



(b): PR curve của YOLO11n



(c): PR curve của YOLOv8Plus



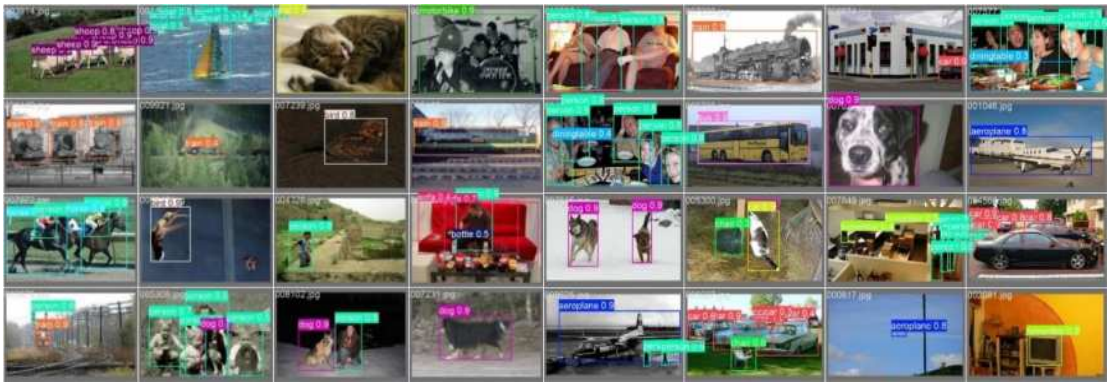
(d): Precion curve của ba mô hình

Hình 9: So sánh các đường cong Precision-Recall, Metrics Precision.

Chúng ta thấy rằng mô hình YOLOv8Plus phát hiện tương đối tốt, độ chính xác cao trên các đối tượng từ vật thể đến các tàu mặt nước ở các tư thế, góc nhìn và khoảng cách khác nhau trên Hình 10 và Hình 11.

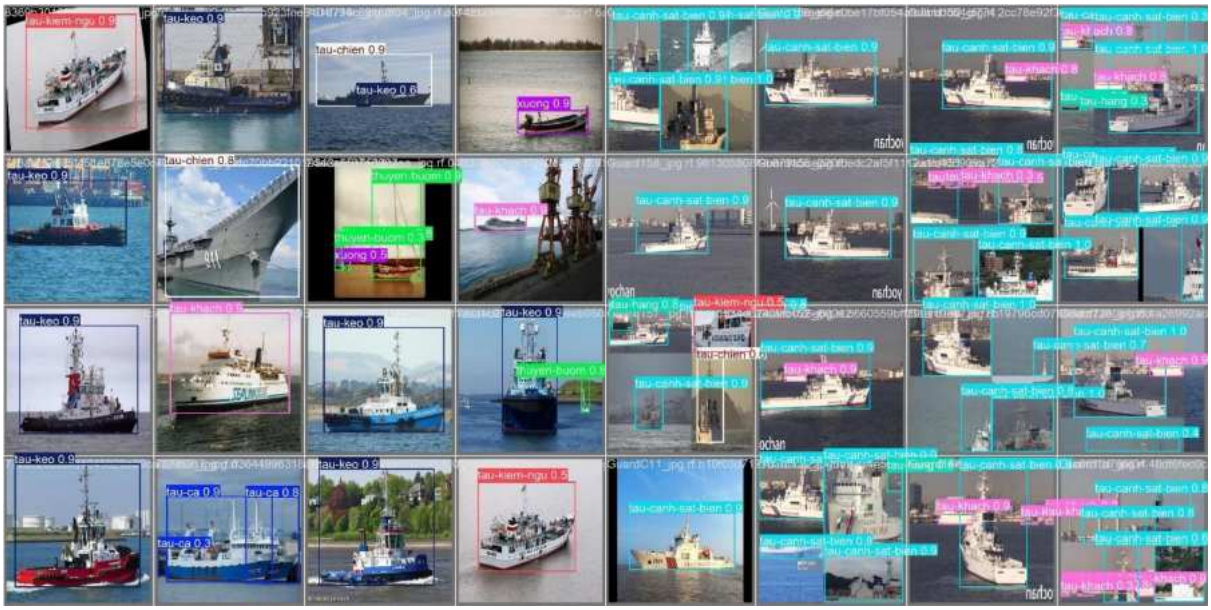


(a): kết quả phát hiện của YOLOv8n *(b): kết quả phát hiện của YOLO11n*



(c): kết quả phát hiện của YOLOv8Plus

Hình 10: So sánh các kết quả phát hiện trên VOC Dataset.



(a): kết quả phát hiện của YOLOv8n *(b): kết quả phát hiện của YOLO11n*



(c): kết quả phát hiện của YOLOv8Plus

Hình 11: So sánh các kết quả phát hiện trên Ship Custom Dataset.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã mở rộng hướng phát triển mô hình YOLOv8Plus nhằm cải thiện hiệu quả phát hiện tàu mặt nước, vượt qua các hạn chế của YOLOv8. Bằng cách thay thế các lớp C2f bằng C3Plus, SPPF bằng PSA và bổ sung các lớp CBAM, mô hình YOLOv8Plus mang lại khả năng xử lý tốt hơn các điều kiện phức tạp của môi trường biển. Kết quả thí nghiệm chứng minh mô hình nhỏ nhẹ, chi phí tính toán thấp, giảm số lượng tham số, đảm bảo tính khả thi trong ứng dụng thực tế. Với tiềm năng lớn trong việc hỗ trợ giám sát tự động và tăng cường an ninh trên biển, mô hình này không chỉ mang lại giá trị thực tiễn cao mà còn tạo cơ hội phát triển các giải pháp công nghệ tiên tiến trong lĩnh vực hàng hải, góp phần bảo vệ an ninh quốc gia và an toàn hàng hải trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

[1] Shao, Z., Wu, W., Wang, Z., Du, W., & Li, C. (2018). Seaships: A large-scale precisely annotated dataset for ship detection. *IEEE transactions on multimedia*, *20*(10), 2593-2604.

[2] Gong, Y., Chen, Z., Deng, W., Tan, J., & Li, Y. (2024). Real-time long-distance ship detection architecture based on YOLOv8. *IEEE Access*.

[3] Yang, D., Solihin, M. I., Ardiyanto, I., Zhao, Y., Li, W., Cai, B., & Chen, C. (2024). Author Correction: A streamlined approach for intelligent ship object detection using EL-YOLO algorithm. *Scientific Reports*, *14*.

[4] Vaswani, A. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*.

[5] Woo, S., Park, J., Lee, J. Y., & Kweon, I. S. (2018). CBAM: Convolutional block attention module. In *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)* (pp. 3-19).

[6] Zeiler, M. D. (2014). Visualizing and Understanding Convolutional Networks. In *European conference on computer vision/arXiv* (Vol. 1311).

[7] Zagoruyko, S., & Komodakis, N. (2016). Paying more attention to attention: Improving the performance of convolutional neural networks via attention transfer. *arXiv preprint arXiv:1612.03928*.

[8] Kong, F., Zhang, Y., Zhan, L., He, Y., Zheng, H., & Dai, D. (2024). Cable Conduit Defect Recognition Algorithm Based on Improved YOLOv8. *Electronics*, *13*(13), 2427.

[9] Everingham, M., Eslami, S. A., Van Gool, L., Williams, C. K., Winn, J., & Zisserman, A. (2015). The pascal visual object classes challenge: A retrospective. *International journal of computer vision*, *111*, 98-136.

Building an object detection algorithm for optoelectronic systems on surface ships using deep learning models

Abstract: *Nowadays, with the development of deep learning technology, the demand for national security monitoring at sea is increasing, so in this study I propose an object detection algorithm based on the YOLOv8 model, to be applied to optoelectronic systems on surface ships. The research focuses on improving the YOLOv8 model in terms of balancing accuracy and reducing model parameters, so that the system can respond in real time and adapt to changing light and weather conditions at sea. The results show that the proposed model is small in size, light in weight, stable, highly sensitive, well meets the requirements of real-time target tracking and detection, and helps increase the ability of automatic monitoring for optoelectronic systems on surface ships. The research opens up the potential for wide application in maritime surveillance, supporting the safety and security of ships operating at sea.*

Keywords: YOLO; Object Detection; surface ship detection; Deep Learning.

Tổng hợp bộ điều khiển Backstepping tối ưu với bộ quan sát mở rộng thích nghi trong hệ thống dẫn và điều khiển tích hợp cho tên lửa

Đinh Hồng Toàn*, Nguyễn Văn Xuân, Phạm Văn Nguyên, Trương Đăng Khoa

Institute of Missile and Control Engineering, Le Quy Don Technical University

* Email: dhtoan.hn@gmail.com, Contact number: 0988681582

Tóm tắt

Bài báo trình bày thiết kế điều khiển Backstepping tối ưu (BLQR) và bộ quan sát nhiễu mở rộng thích nghi (AEDO) nhằm cải thiện chất lượng điều khiển và khả năng ước lượng nhiễu trong các hệ thống phi tuyến, bất định. Bộ điều khiển BLQR được sử dụng để xử lý các yếu tố phi tuyến, bất định và tối ưu hóa chất lượng điều khiển, trong khi bộ quan sát AEDO giúp ước lượng và bù nhiễu hiệu quả trong hệ thống điều khiển thiết bị bay. Các tác giả chứng minh tính ổn định của hệ thống dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov và thực hiện các mô phỏng trên Matlab/Simulink. Các kết quả mô phỏng đã khẳng định tính đúng đắn của phương pháp đề xuất.

Từ khoá: *Điều khiển thiết bị bay, Điều khiển Backstepping, LQR, Bộ quan sát nhiễu mở rộng.*

1. Mở đầu

Các mô hình động học của tên lửa và vị trí tương đối giữa tên lửa và mục tiêu khi chuyển động được biểu diễn bằng các phương trình phi tuyến có chứa các sai lệch mô hình, điều kiện hoạt động thay đổi, các nhiễu tác động và sự cơ động của mục tiêu,... Các yếu tố này tác động lên tên lửa trong suốt quá trình bay và làm giảm chất lượng điều khiển và độ chính xác dẫn tên lửa đến mục tiêu. Vì vậy, các phương pháp điều khiển để giải quyết bài toán này đã và đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu.

Thiết kế hệ thống dẫn và điều khiển tích hợp (Integrated Guidance and Control - IGC) là một hướng nghiên cứu mới, xem hai hệ thống dẫn và điều khiển là một hệ thống duy nhất. Trong tài liệu [1], mô hình IGC với các bất định được xây dựng và nghiên cứu các phương pháp điều khiển với mục tiêu đưa tốc độ đường ngắm tên lửa-mục tiêu (LOS) về không trong các điều kiện khác nhau. Trong nghiên cứu [2], trong hệ thống IGC với các tác động bất định của mô hình được giả định là nhiễu tham số, và các nhiễu này được đánh giá thông qua hệ mờ thích nghi trực tiếp. Trong tài liệu [3], tác giả đã đề xuất sử dụng bộ quan sát để ước lượng thông tin về mục tiêu cơ động và các yếu tố nhiễu, kết hợp với phương pháp DSC (Disturbance Observer and Sliding Mode Control) và N-ESO (Nonlinear Extended State Observer) để thiết kế một luật IGC. Bộ quan sát này giúp cải thiện khả năng ước lượng trạng thái của hệ thống, đồng thời nâng cao khả năng bù nhiễu và ứng phó với các điều kiện môi trường thay đổi. Trong nghiên cứu [4], tác giả đã đề xuất sử dụng phương pháp điều khiển Backstepping kết hợp với bộ quan sát trạng thái giảm bậc, kết hợp với bộ TD (Tracking Differentiator) nhằm tối ưu hóa quá trình điều khiển, nâng cao chất lượng điều khiển tên lửa đến mục tiêu. Trong tài liệu [8], tác giả đã đề xuất một luật dẫn điều khiển tối ưu để giải quyết vấn đề đánh chặn các đối tượng cơ động. Như vậy, các phương pháp điều khiển với bộ quan sát ESO tiêu chuẩn vẫn còn những hạn chế trong trường hợp nhiễu động lớn và thay đổi nhanh theo thời gian, làm giảm khả năng đánh chặn mục tiêu cơ động. Do đó, việc nghiên cứu phương pháp Backstepping tối ưu hóa các tham số điều khiển (BLQR-Backstepping Linear Quadratic Regulator) kết hợp với bộ quan sát nhiễu mở rộng thích nghi (AEDO-Adaptive Extended Disturbance Observer) là hướng nghiên cứu mới nhằm giải quyết những vấn đề này một cách hiệu quả hơn.

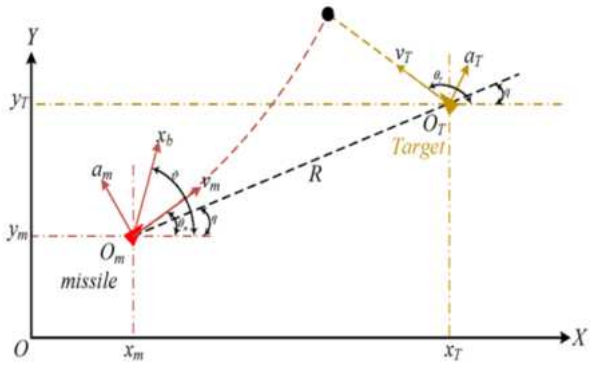
2. Mô hình hệ thống và giải pháp thực hiện

2.1. Xây dựng mô hình hệ thống

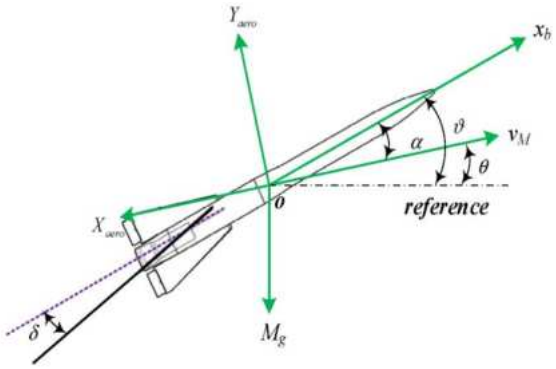
Mô hình toán học mô tả chuyển động của tên lửa và mục tiêu trong mặt phẳng đứng thể hiện trên Hình 1, trong đó OXY là hệ tọa độ quy chiếu quán tính Đề các, M và T là ký hiệu vị trí tên lửa, mục tiêu.

Trong đó, x_m, y_m và x_T, y_T - vị trí hiện tại của tên lửa và mục tiêu; V_M, θ_M, a_M - tương ứng là tốc độ, góc nghiêng quỹ đạo và gia tốc pháp tuyến của tên lửa; V_T, θ_T, a_T tương ứng là tốc độ, góc nghiêng quỹ đạo và gia tốc pháp tuyến của mục tiêu; R- khoảng cách tương đối tên lửa - mục tiêu; q-góc LOS; O_{mxb} - trục dọc tên lửa; ϑ - góc gật của tên lửa.

Động hình học của tên lửa trong mặt phẳng đứng được thể hiện trên Hình 2 [5], trên đó ký hiệu: α - góc tấn công; M_g, X_{aero}, Y_{aero} - trọng lực, lực cản khí động và lực nâng của tên lửa.



Hình 1. Chuyển động tương đối của tên lửa và mục tiêu trong mặt phẳng đứng



Hình 2. Động lực của tên lửa trong mặt phẳng đứng

Theo Hình 1 và Hình 2, các phương trình liên kết động học tên lửa, mục tiêu như sau [1]:

$$\begin{cases} \dot{R} = V_T \cos(\theta_T - q) - V_m \cos(\theta_M - q) \\ R\dot{q} = V_T \sin(\theta_T - q) - V_m \sin(\theta_M - q) \\ \dot{\theta}_T = \dfrac{a_T}{V_T} \ , \ \dot{\theta}_M = \dfrac{a_M}{V_M} \end{cases} \tag{1}$$

Biến đổi các phương trình trong hệ (1) nhận được:

$$\begin{aligned} \ddot{q} = &-\frac{2\dot{R}}{R}\dot{q} - \frac{\dot{V}_T}{R}\sin(q-\theta_T) + \frac{\dot{V}_M}{R}\sin(q-\theta_M) \\ &+ \frac{V_T\dot{\theta}_T}{R}\cos(q-\theta_T) - \frac{V_M\dot{\theta}_M}{R}\cos(q-\theta_M) \end{aligned} \tag{2}$$

Dựa trên giả thiết rằng $\dot{a}_T = \dot{a}_M = 0$, phương trình (2) được rút gọn như sau:

$$\ddot{q} = \frac{2\dot{R}}{R}\dot{q} + \frac{a_T\cos(q-\theta_T)}{R} - \frac{a_M\cos(q-\theta_M)}{R} \tag{3}$$

Động lực học tên lửa trên mặt phẳng gật có dạng như sau **Error! Reference source not found.**[1]:

$$\begin{aligned}
&\dot{\alpha} = \frac{1}{mV_M}\left(-P\sin\alpha - Y^{\alpha}\alpha + mg\cos\theta_M\right) + \omega_z \\
&J_z\dot{\omega}_z = M_z^{\alpha}\alpha + M_z^{\omega_z}\omega_z + M_z^{\delta_z}\delta_z \\
&\dot{\vartheta} = \omega_z \;;\; \alpha = \vartheta - \theta_M
\end{aligned} \tag{4}$$

Biến đổi phương trình (4) với giả định góc anpha là nhỏ, ta có:

$$\dot{\alpha} = -\frac{P+Y^{\alpha}}{mV_M}\alpha + \frac{g\cos\theta_M}{V_M} + \omega_z = -\frac{P+57,3QSc_y^{\alpha}}{mV_M}\alpha + \frac{g\cos\theta_M}{V_M} + \omega_z \tag{5}$$

Khi tính đến các yếu tố bất định của hệ thống, kết hợp các công thức (3) và (4), ta xây dựng hệ phương trình dẫn và điều khiển tích hợp cho tên lửa như sau:

$$\begin{cases}
\ddot{q} = \left(-\dfrac{2\dot{R}}{R}\dot{q} + \dfrac{g\cos(q-\theta_M)}{R}\cos\theta_M\right) - \left(\dfrac{57,3QSc_y^{\alpha}}{mR}\cos(q-\theta_M)\right)\alpha + d_1 \\
\dot{\alpha} = \left(-\dfrac{P+57,3QSc_y^{\alpha}}{mV_M}\alpha + \dfrac{g\cos\theta_M}{V_M}\right) + g_2\omega_z + d_2 \\
\dot{\omega}_z = \left(\dfrac{57,3QSlm_z^{\alpha}}{J_z}\alpha + \dfrac{QSl^2m_z^{\omega_z}}{J_zV_M}\omega_z\right) + \dfrac{57,3QSlm_z^{\delta_z}}{J_z}u + d_3
\end{cases} \tag{6}$$

Trong đó, $u = \delta_z$ là tín hiệu điều khiển.

Các yếu tố bất định của hệ thống được biểu diễn:

$$d_1 = \frac{a_T\cos(q-\theta_T)}{R};\; d_2 = d_2(c_y^{\alpha});\; d_3 = d_3(m_z^{\alpha}, m_z^{\omega_z})$$

Phương trình thứ nhất của (6) là phương trình luật dẫn, yếu tố chưa xác định được chủ yếu là tính cơ động của mục tiêu được đặc trưng bởi gia tốc pháp tuyến mục tiên a_T, góc nghiêng quỹ đạo mục tiêu θ_T và được biểu diễn bởi đại lượng d_1. Hai phương trình sau thể hiện luật điều khiển, phương trình thứ hai biểu thị góc tấn công, yếu tố bất định chủ yếu là sự thay đổi mật độ không khí ρ và c_y^{α}. Yếu tố này được biểu diễn qua đại lượng d_2. Phương trình thứ ba xác định tốc độ góc gật, yếu tố chưa xác định chủ yếu là sự thay đổi mật độ không khí ρ, sự dịch chuyển trọng tâm và được biểu diễn thông qua các đạo hàm mô men gật m_z^{α}, $m_z^{\omega_z}$ và $m_z^{\delta_z}$. Biểu diễn yếu tố này qua đại lượng d_3.

Đặt các trạng thái $x_1 = \dot{q}, x_2 = \alpha, x_3 = \omega_z, u = \delta_z$, hệ phương trình (4) được viết lại như sau:

$$\begin{cases}
\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + d_1 \\
\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 + d_2 \\
\dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + g_3(x_1, x_2, x_3)u + d_3
\end{cases} \tag{7}$$

với $\begin{cases} f_1(x_1) = -\dfrac{2\dot{R}}{R}\dot{q} + \dfrac{g\cos(q-\theta_M)}{R}\cos\theta_M \\ f_2(x_2) = -\dfrac{P + 57,3QSc_y^{\alpha}}{mV_M}\alpha + \dfrac{g\cos\theta_M}{V_M} \\ f_3(x_3) = \dfrac{57,3QSlm_z^{\alpha}}{J_z}\alpha + \dfrac{qSl^2m_z^{\omega}}{J_zV_M}\omega_z \end{cases}$ $\begin{cases} g_1(x_1) = -\dfrac{57,3QSc_y^{\alpha}}{mR}\cos(q-\theta_M) \\ g_2(x_1,x_2) = 1 \\ g_3(x_1,x_2,x_3) = \dfrac{57,3QSlm_z^{\delta_z}}{J_z} \end{cases}$ $\begin{cases} d_1 = \dfrac{a_T\cos(q-\theta_T)}{R} \\ d_2 = d_2(c_y^{\alpha}) \\ d_3 = d_3(m_z^{\alpha}, m_z^{\omega_z}) \end{cases}$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển Backstepping

Nhiệm vụ thiết kế bộ điều khiển Backstepping được thực hiện như sau:

Bước 1: Biểu thức sai lệch điều khiển $e_1 = x_1 - x_{1d}$, hàm Lyapunov là $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$

Lấy đạo hàm theo thời gian: $\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1(f_1 + g_1x_2 + d_1 - \dot{x}_{1d})$

Để đảm bảo ổn định, chọn điều khiển ảo mong muốn:

$$x_{2d} = \frac{1}{g_1}(-k_1e_1 + \dot{x}_{1d} - f_1 - d_1) \tag{8}$$

Khi đó, $\dot{V}_1 = -k_1e_1^2 \le 0$ khi hằng số $k_1 > 0$

Bước 2: Biểu thức sai lệch điều khiển $e_2 = x_2 - x_{2d}$, hàm Lyapunov là $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2$

Đạo hàm theo thời gian: $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2\dot{e}_2 = -k_1e_1^2 + e_2(f_2 + g_2x_3 + d_2 - \dot{x}_{2d})$

Để đảm bảo ổn định, chọn điều khiển ảo mong muốn:

$$x_{3d} = \frac{1}{g_2}(-k_2e_2 + \dot{x}_{2d} - f_2 - d_2) \tag{9}$$

Khi đó, $\dot{V}_2 = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 \le 0$ khi hằng số $k_1, k_2 > 0$.

Bước 3: Biểu thức sai lệch điều khiển $e_3 = x_3 - x_{3d}$, hàm Lyapunov là $V_3 = V_2 + \frac{1}{2}e_3^2$

Đạo hàm theo thời gian: $\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + e_3\dot{e}_3 = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 + e_3(f_3 + g_3u + d_3 - \dot{x}_{3d})$

Chọn điều khiển u để triệt tiêu các thành phần không mong muốn:

$$u = \frac{1}{b_3}\left(-k_3e_3 + \dot{x}_{3d} - f_3 - d_3\right) \tag{10}$$

Khi đó $\dot{V}_3 = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 \le 0$. Như vậy, hệ thống sẽ ổn định tiệm cận toàn cục theo tiêu chuẩn Lyapunov khi các hằng số $k_1, k_2, k_3 > 0$.

Bằng cách sử dụng bộ điều khiển Backstepping, có thể giải quyết được vấn đề phi tuyến trong bài toán điều khiển tên lửa. Phương pháp thiết kế Backstepping cho phép xây dựng bộ điều khiển theo phân tầng, giúp giảm độ phức tạp trong việc thiết kế và phân tích. Đặc biệt, Backstepping có khả năng bù nhiễu và đảm bảo trạng thái hội tụ về giá trị mong muốn. Tuy nhiên, phương pháp Backstepping cũng có những hạn chế khi hệ thống có các tham số bất định và nhiễu.

2.3. Thiết kế bộ điều khiển LQR

Bộ điều khiển LQR được sử dụng để thay đổi, tối ưu hóa các tham số điều chỉnh k_1, k_2, k_3 trong các đại lượng điều khiển (8), (9), (10) thay vì tính toán thủ công, để hệ thống đạt hiệu suất điều khiển cao nhất, làm giảm thời gian tên lửa đánh chặn mục tiêu. Mục tiêu kết hợp điều khiển Backstepping và LQR tạo ra bộ điều khiển mạnh mẽ, vừa đảm bảo ổn định theo Lyapunov, vừa tối ưu quỹ đạo và năng lượng điều khiển.

Biểu diễn hệ phương trình (7) dưới dạng hệ phương trình trạng thái sau:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \tag{11}$$

Trong đó, các thành phần không chứa biến điều khiển u trong (11) sẽ được đưa vào ma trận trạng thái **A**, các hệ số liên quan đến u sẽ được đưa vào ma trận điều khiển **B**. Các ma trận **A** và **B** mô tả mô hình động lực học của hệ thống phi tuyến đã tuyến tính hóa, biểu diễn quan hệ giữa các trạng thái x_1, x_2, x_3 và đầu vào điều khiển u. Từ các phương trình động lực học, có thể tính được các hệ số động lực học nội tại được ánh xạ trực tiếp vào các phần tử của ma trận **A**. Các thành phần liên quan đến đầu vào trở thành các thành phần của ma trận điều khiển **B**, có kết quả:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\dfrac{2\dot{R}}{R} & g_1 & 0 \\ 0 & -\dfrac{57,3QSc_y^{\alpha}}{mV_M} & 1 \\ 0 & \dfrac{57,3QSlm_z^{\alpha}}{J_z} & \dfrac{57,3QSlm_z^{\delta_z}}{J_z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{57,3QSlm_z^{\delta_z}}{J_z} \end{bmatrix} \tag{12}$$

Phương pháp LQR tính toán ma trận **P** từ phương trình đại số Ricati liên tục:

$$\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} + \mathbf{PA} - \mathbf{PBR}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$$

Trong đó: **Q** là ma trận trọng số trạng thái, **R** là ma trận trọng số đầu vào, ma trận **Q** quyết định mức độ ưu tiên giảm thiểu sai lệch trạng thái x_1, x_2, x_3, ma trận **R** đặt trọng số lên tín hiệu điều khiển u.

Sau khi xác định ma trận **P**, có thể tính toán được k_1, k_2, k_3 và tín hiệu điều khiển u một cách tối ưu bằng LQR:

$$u = -Kx, \quad K = \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} \tag{13}$$

Các giá trị k_1, k_2, k_3 thực tế được tối ưu hóa bởi thuật toán LQR sẽ đóng vai trò là các tham số điều khiển cho bộ điều khiển Backstepping, từ đó tạo ra tín hiệu điều khiển u để điều chỉnh hệ thống theo quỹ đạo tối ưu.

Khi sử dụng LQR, cần giải bài toán tối ưu để tìm tín hiệu điều khiển u, sao cho hàm chi phí sau đạt cực tiểu:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T \mathbf{Q} x + u^T \mathbf{R} u) dt \tag{14}$$

Trong đó: Q là ma trận trọng số trạng thái, R là ma trận trọng số đầu vào, ma trận Q quyết định mức độ ưu tiên giảm thiểu sai lệch trạng thái x_1, x_2, x_3. Ma trận R đặt trọng số lên tín hiệu điều khiển u, nhằm tránh điều khiển đột ngột. Kết quả là tín hiệu điều khiển u sẽ điều chỉnh hệ thống theo quỹ đạo tối ưu.

2.4. Thiết kế bộ quan sát nhiễu

2.4.1. Thiết kế bộ quan sát nhiễu mở rộng

Bộ quan sát nhiễu mở rộng đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện chất lượng điều khiển của tên lửa trong quá trình gặp mục tiêu. Bộ quan sát cho phép ước lượng để bù nhiễu, từ đó đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định và chính xác ngay cả trong các điều kiện nhiễu loạn tác động. Trong bài báo, bộ quan sát nhiễu mở rộng thích nghi được sử dụng để ước lượng các thành phần nhiễu và bất định $d_1, d_2, d_3 > 0$ có trong hệ phương trình (7).

Với thông tin mô hình đã biết, ta thiết kế bộ quan sát ESO cho vòng dẫn như sau:

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = -\beta_1 p_1 - \beta_1^2 x_1 - \beta_1 \left(f_1(x_1) + g_1 x_2 \right) \\ \hat{d}_1 = p_1 + \beta_1 x_1 , \qquad \beta_1 > 0 \end{cases} \tag{15}$$

với $\hat{d}_1$ là ước lượng của d_1.

Tương tự, ta xây dựng bộ quan sát ESO cho vòng điều khiển có dạng sau:

$$\begin{cases} \dot{p}_2 = -\beta_2 p_2 - \beta_2^2 x_2 - \beta_2 \left(f_2(x_2) + g_2 x_3 \right) \\ \hat{d}_2 = p_2 + \beta_2 x_2, \qquad \beta_2 > 0 \end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases} \dot{p}_3 = -\beta_3 p_3 - \beta_3^2 x_3 - \beta_3 \left(f_3(x_3) + g_3 u \right) \\ \hat{d}_3 = p_3 + \beta_3 x_3 , \quad \beta_3 > 0 \end{cases} \tag{17}$$

Ở đây, $\hat{d}_2, \hat{d}_3$ biểu thị ước lượng của d_2, d_3.

2.4.2. Thiết kế bộ quan sát nhiễu mở rộng thích nghi AEDO

Mục tiêu của bộ quan sát là ước lượng nhiễu d_i (i = 1, 2, 3) và xác định các tham số p_i cho các biến trạng thái, β_i là tham số điều chỉnh tốc độ hội tụ của bộ quan sát.

Trong bộ quan sát nhiễu AEDO, tham số β_i trong các hàm quan sát không phải là một giá trị cố định mà được điều chỉnh dựa trên sai số giữa giá trị ước lượng p_i và trạng thái thực x_i. Cụ thể β_i được điều chỉnh theo công thức:

$$\beta_i = \beta_{0i} + k_i \left| x_i - p_i \right| \tag{18}$$

Bộ quan sát nhiễu AEDO sử dụng tham số β_i được điều chỉnh thích nghi theo sai số giữa trạng thái ước lượng và trạng thái thực $|x_i - p_i|$. Việc thay đổi β_i giúp bộ quan sát phản ứng linh hoạt với sai số. Bộ quan sát sẽ có phản ứng nhanh với các thay đổi lớn trong sai số, đồng thời không phản ứng quá nhanh khi sai số nhỏ. Sự thay đổi của β_i giúp cải thiện khả năng hội tụ của bộ quan sát trong các điều kiện thay đổi nhanh hoặc khi có nhiễu mạnh. Nếu k_i được lựa chọn phù hợp, bộ quan sát sẽ ổn định và hội tụ về giá trị chính xác trong thời gian ngắn. Sai số đánh giá các nhiễu có thể được điều chỉnh nhỏ đến một giá trị nhất định bằng

cách tăng hệ số bộ quan sát β_i. Trường hợp đặc biệt khi cường độ nhiễu trong hệ thống có giá trị không đổi $\dot{d}_i = 0$, thì với tham số thiết kế thích hợp βi, các sai số động học bộ ESO sẽ hội tụ tiệm cận về 0.

3. Mô phỏng, tính toán và thảo luận

3.1. Bài toán và tham số mô phỏng

Để đánh giá chất lượng bộ điều khiển theo hệ thống IGC, ta thực hiện các mô phỏng số cho trường hợp tốc độ mục tiêu không đổi và mục tiêu cơ động với gia tốc thay đổi.

Khảo sát một loại tên lửa tự dẫn với các tham số giả định như sau [4]: Tốc độ tên lửa không đổi được giả định là $V_M = 500 m/s$. Các góc trạng thái ban đầu của tên lửa là $\alpha_0(0) = 0,\ \delta_z(0) = 0$, góc nghiêng quỹ đạo ban đầu của tên lửa $\theta_M(0) = 45^0$. Tốc độ mục tiêu không đổi được giả thiết là $V_T = 250 m/s$. Góc nghiêng quỹ đạo ban đầu của mục tiêu là $\theta_T(0) = 120^0$.

Các tham số mô hình tên lửa như sau:

$$\frac{57,3Qsc_y^{\alpha}}{mV_m} = 0,3487\ ;\ \frac{57,3Qslm_z^{\alpha}}{J_z} = -17,801\ ;\ \frac{Qsl^2 m_z^{w_z}}{J_z V_m} = -0,2741\ ;\ \frac{57,3Qslm_z^{\delta_z}}{J_z} = -31,267$$

Cơ cấu chấp hành (góc quay cánh lái) được xấp xỉ như một hệ giữ chậm thời gian bậc 1 với hằng số thời gian là 0,01s và giới hạn điều khiển là $|\delta_z| \le 20^0$.

Các hệ số thiết kế ban đầu cho luật IGC đề xuất như sau:

$$k_1 = 0,4\ ;\ k_2 = 4\ ;\ k_3 = 12\ ;\ \beta_1 = 5,\ \beta_2 = 10,\ \beta_3 = 20 rad/s$$

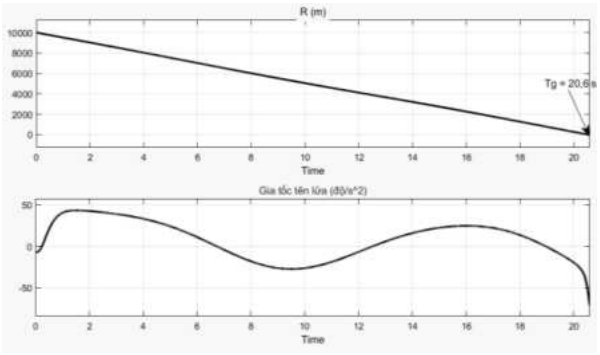
Tuy nhiên, các tham số điều khiển k_1, k_2, k_3 thực tế được tối ưu hóa bởi thuật toán LQR trong bộ điều khiển BLQR, còn các tham số qua sát $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ được xác định theo thuật toán thích nghi trong bộ quan sát AEDO.

Ta thực hiện mô phỏng và đánh giá trong trường hợp: Mục tiêu cơ động với gia tốc $a_T = 15\sin(0,25t)(m/s^2)$, các hệ số khí động học tên lửa thay đổi $\pm 25\%$, và các nhiễu bên ngoài tác động là $d_2 = 0,5\sin t$ và $d_3 = 0,2\sin t$.

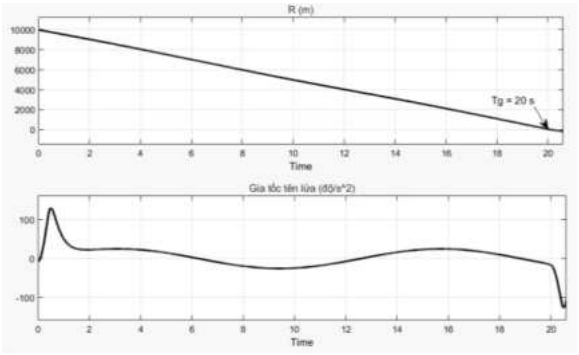
3.2. Kết quả mô phỏng và bình luận

Kết quả mô phỏng được mô tả trong các hình 3 - 10.

Các kết quả mô phỏng về khoảng cách giữa mục tiêu với tên lửa và gia tốc tên lửa khi dùng bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển Backstepping tối ưu được trình bày trên Hình 3, 4:

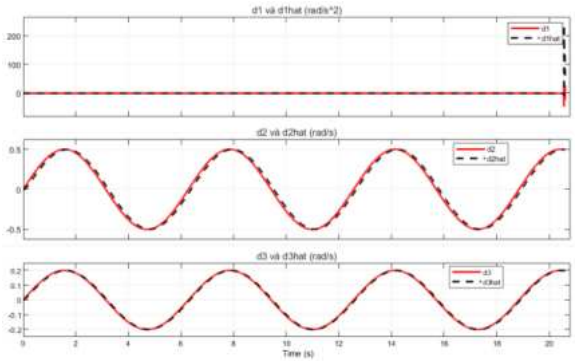


Hình 3. Khoảng cách giữa mục tiêu với tên lửa và gia tốc tên lửa khi dùng điều khiển Backstepping

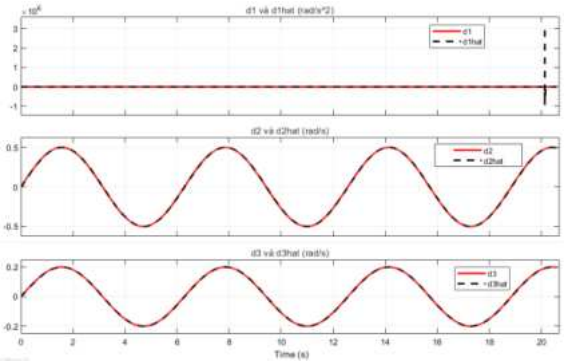


Hình 4. Khoảng cách giữa mục tiêu với tên lửa và gia tốc tên lửa khi dùng điều khiển Backstepping tối ưu

Các kết quả ước lượng nhiễu khi dùng bộ quan sát nhiễu mở rộng và bộ quan sát nhiễu mở rộng thích nghi được trình bày trên các Hình 5, 6:

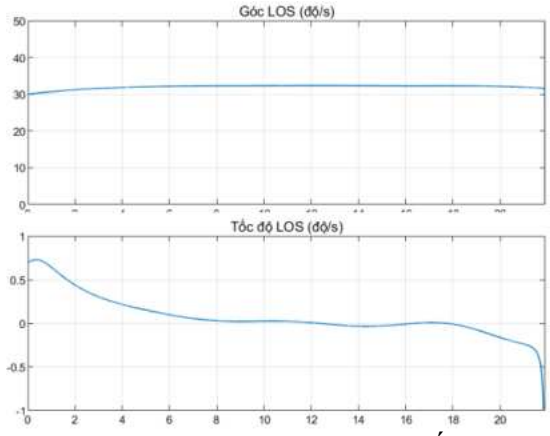


Hình 5. Nhiễu và nhiễu ước lượng khi dùng bộ quan sát nhiễu mở rộng

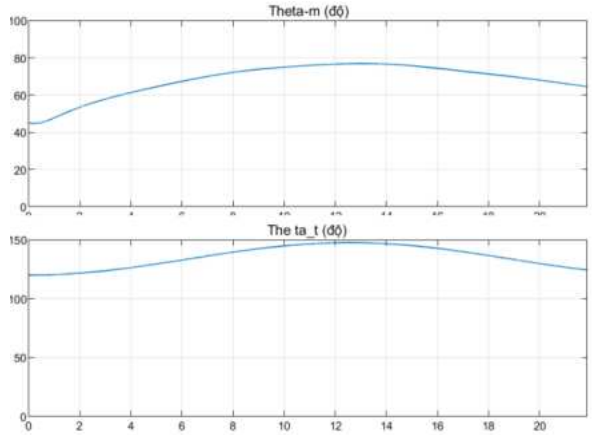


Hình 6. Nhiễu và nhiễu ước lượng khi dùng bộ quan sát nhiễu mở rộng thích nghi

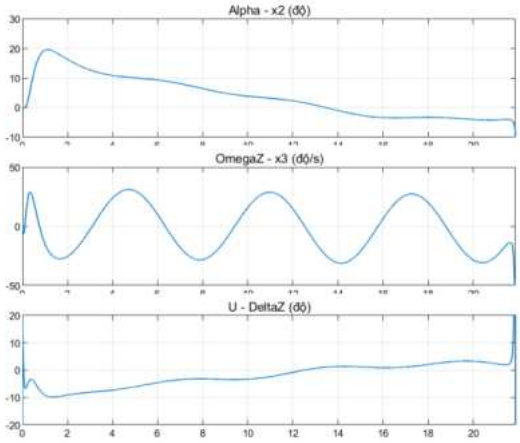
Các kết quả mô phỏng khi dùng phối hợp bộ điều khiển BLQR và bộ quan sát nhiễu AEDO được trình bày trên các Hình 7-10:



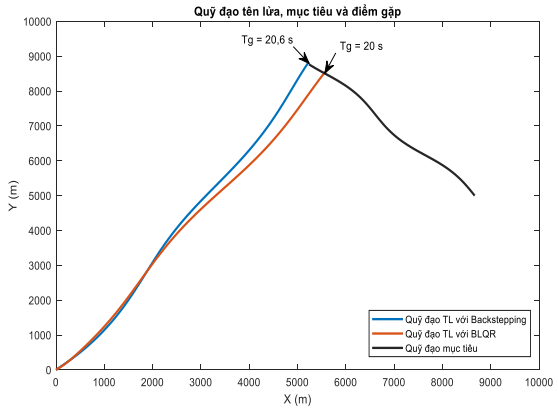
Hình 7. Đại lượng vị trí góc và tốc độ góc xoay đường ngắm



Hình 8. Đại lượng góc gật tên lửa-mục tiêu



Hình 9. *Trạng thái hệ thống trong vòng điều khiển*



Hình 10. *Quá trình tên lửa đến gặp mục tiêu khi kết hợp bộ điều khiển Backstepping tối ưu với bộ quan sát mở rộng thích nghi*

Nhận xét:

- Hình 10 mô tả các quỹ đạo đánh chặn mục tiêu của tên lửa (trường hợp đề xuất TL-AEDO so với trường hợp sử dụng bộ quan sát trạng thái giảm bậc TL-ESO), quỹ đạo tên lửa không bị thay đổi đột biến, độ trượt đạt được nhỏ. Tốc độ LOS hội tụ nhanh chóng đến một lân cận nhỏ của 0 (Hình 4), và hệ thống ổn định bền vững đối với các bất định và nhiễu.

- Góc tấn công α thay đổi theo sự chuyển động của mục tiêu và nhiễu tác động, giá trị góc α được giới hạn trong khoảng giá trị yêu cầu, làm giảm nguy cơ gây quá tải, mất điều khiển tên lửa. Các trạng thái của hệ thống đều biến đổi và tiệm cận về lân cận 0 phù hợp với chuyển động của tên lửa và quỹ đạo tên lửa-mục tiêu.

- Thuật toán Backstepping tối ưu có tác dụng làm hệ thống ổn định tiệm cận, giảm thời gian tới mục tiêu, giảm độ trượt, giảm thiểu năng lượng sử dụng và tăng cường hiệu suất hoạt động của hệ thống.

- Bộ quan sát nhiễu mở rộng thích nghi: Nhờ có sự tự động điều chỉnh tham số của bộ quan sát, nên các đường ước lượng nhiễu bám sát với các giá trị thực, ngay cả ở các điểm dao động lớn. Bộ quan sát thích nghi đã cải thiện độ chính xác, giảm thiểu sai lệch so với phương pháp mở rộng thông thường, nhất là trong điều kiện có nhiễu lớn và thay đổi mạnh.

4. Kết luận

Bài báo này đã trình bày một phương pháp thiết kế luật điều khiển bền vững với các tác động nhiễu loạn cho tên lửa tích hợp dẫn và điều khiển dựa trên điều khiển Backstepping tối ưu và bộ quan sát trạng thái mở rộng thích nghi. Với các giả định hợp lý đề xuất, mô hình IGC được xây dựng theo mô hình phản hồi chặt (restrict affine), và bằng cách áp dụng kỹ thuật backstepping sẽ đảm bảo sự ổn định toàn bộ các trạng thái của hệ thống. Kết quả mô phỏng và phân tích đã chứng minh tính đúng đắn của phương pháp đề xuất trong việc giảm thời gian đáp ứng và nâng cao độ chính xác khi đánh chặn các mục tiêu cơ động. Trong khi các yếu tố nhiễu được ước lượng chính xác và bù hiệu quả hơn nhờ bộ quan sát AEDO. Tính ổn định của hệ thống cũng được đảm bảo nhờ lý thuyết ổn định Lyapunov, giúp hệ thống hoạt động ổn định tiệm cận trong các điều kiện phức tạp.

Tài liệu tham khảo

[1] Đinh Hồng Toàn, Trương Đăng Khoa, Nguyễn Công Định, "*Thiết kế bộ điều khiển tích cực chống nhiễu cho tên lửa IGC trên cơ sở điều khiển trượt và bộ quan sát trạng thái mở rộng",* Hội nghị Toàn quốc về Điều khiển và Tự động hóa VCCA-2017

[2] Ran Maopeng, Wang Qing, Hou Delong, *Back-stepping design of missile guidance and control based on adaptive fuzzy sliding mode control*, Chinese Journal of Aeronautics, 24 April 2014.

[3] Yongfu Li, Bin Yang, *Extended State Observer Based Adaptive Back-stepping Sliding Mode Control of Electronic Throttle in Transportation CyberPhysical Systems".* Hindawi Publishing Corporation, Article ID 301656, 2015

[4] Shao Xingling, Wang Honglun, *Back-stepping active disturbance rejection control designfor integrated missile guidance and control system via ESO*. ISA Transactions 2015.

[5] Jianguo Guo, Yu Xiong, Jun Zhou, "*A New Sliding mode Control Design for Integrated Missile Guidance and Control System*", Aerospace Science and Technology, Aerosp. Sci. Technol. (2018), https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.03.042.

[6] Kang Niu, Xi Chen, Di Yang, Jiaxun Li and Jianqiao Yu, "*A New Sliding Mode Control Algorithm of IGC System for Intercepting Great Maneuvering Target Based on EDO*", Sensors 2022, 22, 7618. https://doi.org/10.3390/s22197618

[7] Wang Y, Wang H, Lin D, Wang W, "*Nonlinear Guidance Laws for Maneuvering Target Interception With Virtual Look Angle Constraint*". IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2021, 58, 2807–2822.

[8] Chen S.W, Wang W, Fan J.F, Ji Y, "*Impact angle constraint guidance law using fully-actuated system approach*", Aerosp. Sci. Technol. 2023, 136, 108220.

Optimal Backstepping Controller Synthesis with Adaptive Extended Observer in Integrated Guidance and Control System for Missiles

Abstract: *This paper presents the design of an Optimal Backstepping Controller (BLQR) and an Adaptive Extended Disturbance Observer (AEDO) to enhance control performance and disturbance estimation in nonlinear, uncertain systems. The BLQR controller is employed to handle nonlinearities, uncertainties, and optimize control quality, while the AEDO observer effectively estimates and compensates for disturbances in flight control systems. The authors demonstrate the system's stability based on Lyapunov stability theory and conduct simulations in Matlab/Simulink. The simulation results validate the effectiveness of the proposed approach.*

Keywords: Flight Control, Backstepping Control, Linear Quadratic Regulator (LQR), Extended Disturbance Observer (EDO).

Xây dựng thuật toán định vị và xây dựng bản đồ đáy biển cho phương tiện ngầm tự hành

Nguyễn Kim Trọng[1*], Trương Xuân Tùng[1], Trần Văn Nhân[2]
[1]*Viện TL và KTĐK, Học viện Kỹ Thuật Quân sự*
[2]*Khoa Tên lửa – Pháo tàu, Học viện Hải quân*
*Email: nkt95bg@gmail.com; Tel: +84-962-542-033

Tóm tắt

Bài báo trình bày các phương pháp định vị và xây dựng bản đồ cho phương tiện dưới nước tự hành (AUV) nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động trong môi trường biển. Phương pháp định vị được triển khai bằng lọc Kalman mở rộng thông qua hợp nhất dữ liệu từ nhiều cảm biến, bao gồm GPS, IMU và sonar..., giúp cải thiện độ chính xác và độ tin cậy trong điều kiện dưới nước. Đồng thời, mô hình địa hình đáy biển được xây dựng dựa trên dữ liệu đám mây điểm 3D thu thập từ cảm biến sonar. Quá trình tái tạo này cho phép tạo ra bản đồ chi tiết, hỗ trợ các nhiệm vụ khảo sát và nghiên cứu biển. Kết quả cho thấy sự kết hợp các phương pháp trên không chỉ tối ưu hóa khả năng định vị mà còn cung cấp thông tin quan trọng về địa hình đáy biển, mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong thực tiễn.

Từ khóa: *phương tiện ngầm tự hành; định vị AUV; địa hình đáy biển; bộ lọc Kalman; tái tạo dữ liệu 3D*

1. Mở đầu

Định vị và xây dựng bản đồ cho robot không chỉ đơn giản là xác định vị trí và hướng mà còn là yếu tố quan trọng trong hệ thống điều hướng của robot tự hành. Quá trình này yêu cầu tích hợp dữ liệu từ các cảm biến như GPS, IMU, Encoder, v.v... cùng với nhận thức về môi trường [1]. Mục tiêu chính của định vị là ước lượng chính xác và đáng tin cậy vị trí và hướng của robot, giúp robot di chuyển tự động trong môi trường mà không cần sự can thiệp của con người, đảm bảo hiệu quả và an toàn trong các nhiệm vụ khảo sát. Bên cạnh định vị, xây dựng bản đồ cũng đóng vai trò quan trọng, không chỉ là biểu diễn không gian mà còn chứa thông tin chi tiết về cấu trúc môi trường. Quá trình này yêu cầu khả năng tích hợp và xử lý dữ liệu từ nhiều nguồn cảm biến khác nhau, đồng thời thích ứng với sự thay đổi của môi trường [2].

Trong những năm gần đây, phương tiện ngầm tự hành (AUV) đã trở thành công cụ quan trọng trong nhiều nhiệm vụ dưới nước như khảo sát đáy biển và nghiên cứu môi trường [3]. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất là định vị và xây dựng bản đồ trong môi trường không có tín hiệu GPS và điều kiện thay đổi liên tục [4].

Bài báo này đề xuất thuật toán kết hợp bộ lọc EKF với các cảm biến IMU, DVL và GPS để thực hiện định vị chính xác cho AUV, đồng thời sử dụng kỹ thuật "Greet Projection Triangulation" để tái tạo bề mặt 3D từ dữ liệu sonar, tạo ra bản đồ đáy biển chi tiết và chính xác.

2. Các nghiên cứu liên quan

Trong lĩnh vực định vị và xây dựng bản đồ cho AUV, nhiều công trình nghiên cứu đã được thực hiện nhằm cải thiện hiệu quả và độ chính xác của các phương pháp hiện có. Một trong những công trình tiêu biểu là nghiên cứu của Michael cùng cộng sự (2002) [5] với thuật toán FastSLAM, một giải pháp phân tách cho vấn đề đồng thời định vị và xây dựng bản đồ (SLAM). Hay nghiên cứu của Ribas cùng cộng sự (2007) [6], trong đó bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) được sử dụng để thực hiện SLAM cho AUV, kết hợp với các cảm biến sonar và IMU để cải thiện

độ chính xác định vị và xây dựng bản đồ dưới nước. Mặc dù nghiên cứu này đã cho thấy kết quả khả quan, nhưng việc chỉ sử dụng sonar và IMU có thể chưa đủ để giải quyết tất cả các thách thức trong môi trường dưới nước phức tạp. Việc tích hợp thêm các cảm biến như DVL và GPS có thể giúp nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong quá trình định vị và xây dựng bản đồ.

Bên cạnh đó, công trình của West và cộng sự (2006) [7] đã áp dụng bộ lọc Kalman mở rộng tối ưu (REKF) để cải thiện độ chính xác định vị của AUV thông qua việc khắc phục các hạn chế của EKF tiêu chuẩn, chẳng hạn như giả định nhiễu Gaussian và lỗi tuyến tính hóa. Nghiên cứu của Demin cùng cộng sự (2018) [8][4] đã sử dụng bộ lọc cấu trúc biến mịn (SVSF) để phát triển thuật toán SLAM cho AUV, tập trung vào việc xử lý dữ liệu từ Sonar quét hình ảnh cơ học (MSIS) trong các môi trường có cấu trúc một phần. Mặc dù những công trình này mang lại kết quả ấn tượng, nhưng gặp khó khăn với các môi trường không đồng nhất như đáy biển.

Trong nghiên cứu gần đây của Xie cùng cộng sự (2024) [9], phương pháp NeuRSS đã được đề xuất để cải thiện quá trình định vị và xây dựng bản đồ đáy biển cho AUV bằng cách kết hợp render neural với SLAM, sử dụng dữ liệu từ sonar quét sườn. Nghiên cứu của Zhang cùng cộng sự (2023) [10] đã giới thiệu một khung SLAM tự động hoàn toàn sử dụng sonar quét sườn để định vị và xây dựng bản đồ dưới nước mà không cần sự can thiệp của con người. Các công trình này đã đạt được những kết quả khả quan trong việc cải thiện độ chính xác định vị và xây dựng bản đồ đáy biển. Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn phụ thuộc vào dữ liệu sonar quét sườn, và có thể gặp khó khăn trong những điều kiện môi trường có nhiều nhiễu hoặc thiếu thông tin. Việc tích hợp thêm các cảm biến khác như DVL và GPS sẽ giúp cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống trong các môi trường phức tạp.

Tổng kết lại, mặc dù các nghiên cứu trên đã đạt được nhiều thành tựu quan trọng trong việc định vị và xây dựng bản đồ cho AUV, nhưng vẫn còn những hạn chế cần được khắc phục. Các phương pháp hiện tại chủ yếu sử dụng một hoặc một số ít loại cảm biến, và có thể gặp khó khăn khi xử lý trong môi trường dưới nước phức tạp với nhiều yếu tố nhiễu và thay đổi. Trong nghiên cứu của chúng tôi, việc kết hợp nhiều cảm biến như IMU, DVL và GPS, cùng với phương pháp tái tạo bản đồ 3D từ dữ liệu cảm biến Sonar như Greet Greedy Projection Triangulation, sẽ giúp cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống định vị và xây dựng bản đồ cho AUV trong môi trường dưới nước.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Định vị cho AUV bằng phương pháp hợp nhất cảm biến

Thuật toán định vị bằng phương pháp hợp nhất cảm biến sử dụng bộ lọc Kalman để ước lượng trạng thái của robot. Đối với phương tiện ngầm tự hành, hàm hệ thống là hàm phi tuyến, do đó ta sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng (Extended Kalman Filter) để giải quyết bài toán định vị cho AUV.

3.1.1. Mô hình chuyển động và mô hình đo của AUV

Trong bộ lọc Kalman mở rộng, hai thành phần chính cần thiết để thực hiện quá trình ước lượng trạng thái là mô hình chuyển động (motion model) và mô hình đo (measurement model). Cả hai mô hình này được xây dựng dựa trên các đặc điểm động lực học của hệ thống và các cảm biến có sẵn.

Mô hình chuyển động:

Hệ phương trình động học và động lực học của AUV có dạng như sau [11, 12]:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}^T \\ \boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{L}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{u}) \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: $\boldsymbol{\eta}$ =[$x,y,z,\varphi,\theta,\psi$] và $\boldsymbol{\nu}$ =[u,v,w,p,q,r] là vị trí và tốc độ của AUV tuân theo quy ước SNAME; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ liên kết và hệ tọa độ dẫn đường; $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$ là tổng ma trận liên quan tới quán tính của vật rắn và khối lượng bổ sung do sự tương tác giữa vật rắn và chất lỏng xung quanh; $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) + \mathrm{C}_A(\boldsymbol{\nu})$ là ma trận mô tả tác động của các lực Coriolis và lực hướng tâm đối với vật rắn, đồng thời bao gồm cả ảnh hưởng của khối lượng bổ sung do chất lỏng gây ra; $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{D}_q(\boldsymbol{\nu}) + \mathbf{D}_l(\boldsymbol{\nu})$ là ma trận giảm chấn thủy động gồm: ma trận giảm chấn tuyến tính và ma trận giảm chấn phi tuyến; $\mathbf{L}(\nu)$ là ma trận thông số lực và mô men của bánh lái; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ là vectơ lực và mô-men gây ra bởi trọng lực và lực nổi; $\boldsymbol{\tau}(\nu,\mathbf{u})$ là lực và mô-men tổng hợp tác động lên AUV ($\mathbf{u}$ là tín hiệu điều khiển của động cơ chân vịt).

Giả sử $\mathbf{x}=[\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\nu}]^T = [x,y,z,\varphi,\theta,\psi,u,v,w,p,q,r]^T$ là vec tơ trạng thái của AUV, từ phương trình (1) ta nhận được mô hình chuyển động của AUV:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) + \mathbf{w} \quad (2)$$

Với $\mathbf{w}$ biểu diễn cho nhiễu quá trình và:

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}^T \\ \boldsymbol{M}^{-1}\left[\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{u}) - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{L}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})\right] \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dạng rời rạc của mô hình chuyển động (2) có dạng:

$$\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{k-1}, \boldsymbol{u}_k) + \boldsymbol{w}_k \quad (4)$$

Mô hình đo từ các cảm biến:

Mỗi loại cảm biến trên AUV đem lại các phép đo khác nhau. Các cảm biến phổ biến trên AUV bao gồm: IMU cung cấp thông tin về gia tốc $(\dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{w}_1)$ và vận tốc góc (p_1, q_1, r_1); DVL ("Doppler Velocity Log") đo vận tốc của AUV so với đáy biển (u_D, v_D, w_D); GPS cung cấp thông tin vị trí và hướng khi AUV nổi hoặc làm việc ở vùng nước nông (x_G, y_G, z_G).

Ta giả định rằng mỗi cảm biến trên AUV trực tiếp đo được các biến trạng thái mà ta cần ước lượng như trên, do đó mô hình đo từ các cảm biến này có dạng tuyến tính như sau:

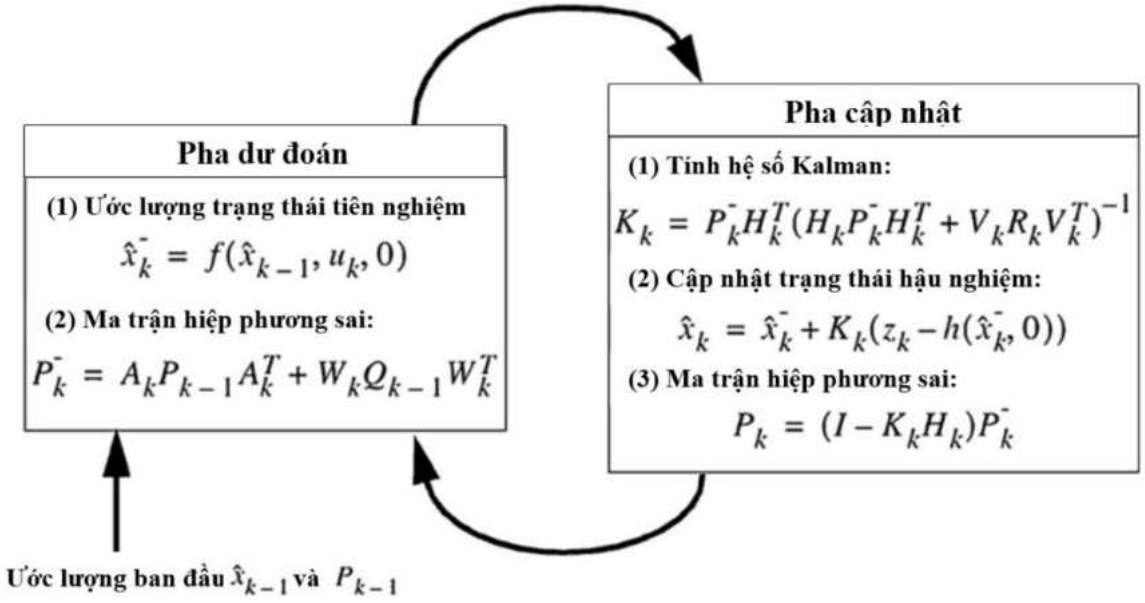
$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{v}_k = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{v}_k \quad (5)$$

Với v biểu diễn nhiễu đo, $\mathbf{z}$ là vec tơ đo và H là ma trận đo, trong đó:

$$\begin{cases} z = [x_G, y_G, z_G, u_D, v_D, w_D, p_I, q_I, r_I]^T \\ H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

3.1.2. Định vị AUV sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng

Từ lý thuyết về bộ lọc Kalman mở rộng [13] cùng mô hình chuyển động (4) và mô hình đo (5) đã xác định ở trên, ta có thể ước lượng được vị trí của AUV. Mô hình chuyển động được sử dụng để dự đoán vị trí của robot, còn dữ liệu từ các cảm biến như IMU, DVL hay GPS được sử dụng để hiệu chỉnh vị trí. Hình 1 mô tả thuật toán của bộ lọc Kalman mở rộng được sử dụng trong phương pháp này.



Hình 1. Bộ lọc Kalman mở rộng

3.2. Xây dựng mô hình địa hình đáy biển bằng phương pháp tái tạo dữ liệu đám mây điểm 3D

Thuật toán tái tạo cấu trúc 3D từ đám mây điểm là một phương pháp quan trọng trong lĩnh vực xử lý dữ liệu không gian, giúp xây dựng mô hình 3D chi tiết từ các tập dữ liệu điểm thu thập bằng cảm biến Lidar hoặc Sonar 3D.

3.2.1. Tiền xử lý dữ liệu

Bước tiền xử lý dữ liệu là giai đoạn quan trọng đầu tiên trong tái tạo cấu trúc 3D, nhằm đảm bảo chất lượng và tính hiệu quả của các bước xử lý tiếp theo. Đám mây điểm ban đầu thường chứa nhiều dữ liệu thô từ cảm biến như LiDAR hoặc Sonar 3D, và có thể chứa các điểm

nhiễu, thông tin dư thừa hoặc không khớp giữa các tập dữ liệu khác nhau. Vì vậy, việc tiền xử lý tập trung vào làm sạch, giảm kích thước và căn chỉnh dữ liệu để tạo ra một tập hợp điểm tối ưu hơn.

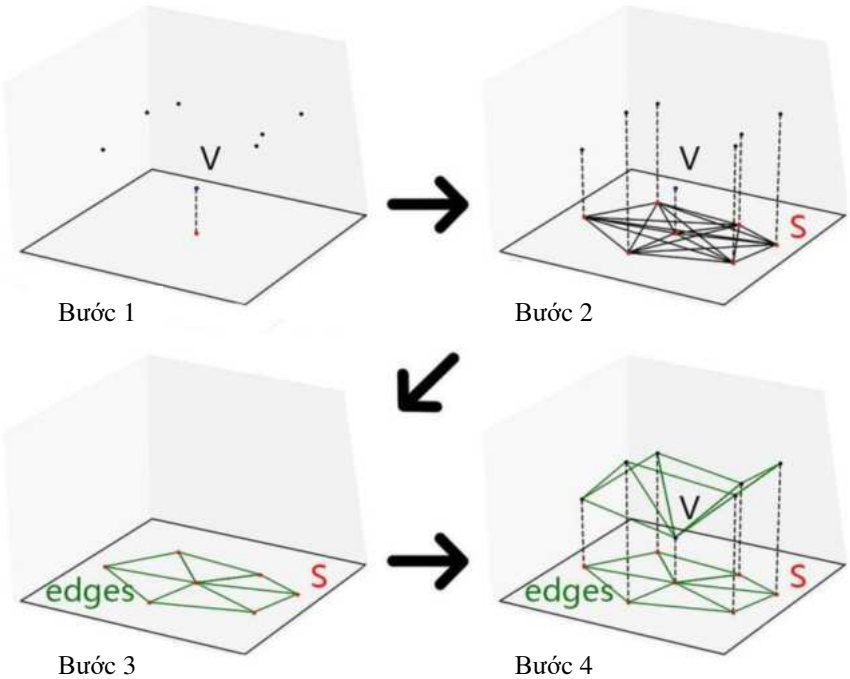
- Làm sạch dữ liệu: Loại bỏ nhiễu và điểm ngoài bằng các phương pháp như bộ lọc thông thấp hoặc kỹ thuật "Statistical Outlier Removal", giúp loại bỏ các điểm không phù hợp.

- Giảm số lượng điểm (Downsampling): Sử dụng bộ lọc voxel grid để giảm số lượng điểm mà vẫn giữ lại cấu trúc tổng thể, hoặc sampling ngẫu nhiên nếu không cần bảo toàn chính xác hình dạng ban đầu.

- Căn chỉnh đám mây điểm (Registration): Căn chỉnh các đám mây điểm từ nhiều góc độ hoặc cảm biến khác nhau bằng thuật toán ICP (Iterative Closest Point) hoặc RANSAC (Random Sample Consensus) để hợp nhất chúng thành một tập hợp thống nhất, giúp quá trình tái tạo bề mặt hiệu quả hơn.

3.2.2. Tái tạo bề mặt 3D

Bước tái tạo bề mặt là giai đoạn chuyển đổi đám mây điểm đã tiền xử lý thành một mô hình 3D liên tục. Quá trình này nhằm xây dựng một bề mặt khép kín hoặc gần khép kín thể hiện cấu trúc không gian của vật thể. Tái tạo bề mặt đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra các mô hình có thể được sử dụng trong các ứng dụng thực tế như in 3D, mô phỏng, hoặc kết xuất đồ họa. Các phương pháp tái tạo bề mặt được phân thành nhiều loại dựa trên cách tiếp cận khác nhau. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng thuật toán "Greedy Projection Triangulation (GPT)" để tái tạo bề mặt 3D cho đáy biển. Hình 2 mô tả quá trình tái tạo về mặt dựa trên thuật toán GPT [14].



Hình 2. Quá trình tái tạo bề mặt bằng thuật toán GPT

- **Bước 1**: Thuật toán bắt đầu bằng cách chọn một điểm *V* trên bề mặt 3D và tính toán vec tơ pháp tuyến của nó. Tiếp theo, xác định mặt phẳng tiếp tuyến tại *V*, mặt phẳng này vuông góc với vec tơ pháp tuyến.

- **Bước 2**: Điểm *V* và các điểm lân cận của nó được chiếu lên mặt phẳng tiếp tuyến ta được tập hợp điểm ký hiệu là *S*, Với tập *S* này ta có thể thiết lập được *N*/2 cạnh giữa mỗi 2 điểm, được sắp xếp theo khoảng cách từ nhỏ đến lớn của các cạnh.

- **Bước 3**: Phương pháp dự phóng cục bộ được sử dụng để liên tục thêm cạnh ngắn nhất vào lưới tam giác đồng thời loại bỏ cạnh ngắn nhất này khỏi bộ nhớ. Nếu cạnh này không giao với bất kỳ cạnh nào hiện tại, nó sẽ được thêm vào lưới, ngược lại sẽ bị loại bỏ. Khi bộ nhớ trống, quá trình tam giác hóa kết thúc.

- **Bước 4**: Khi quá trình tam giác hóa hoàn thành, mạng lưới các điểm kết nối được đưa trở lại không gian 3D, tạo thành một lưới tam giác không gian biểu diễn cấu trúc topo của đối tượng dựa trên các điểm dữ liệu phân tán.

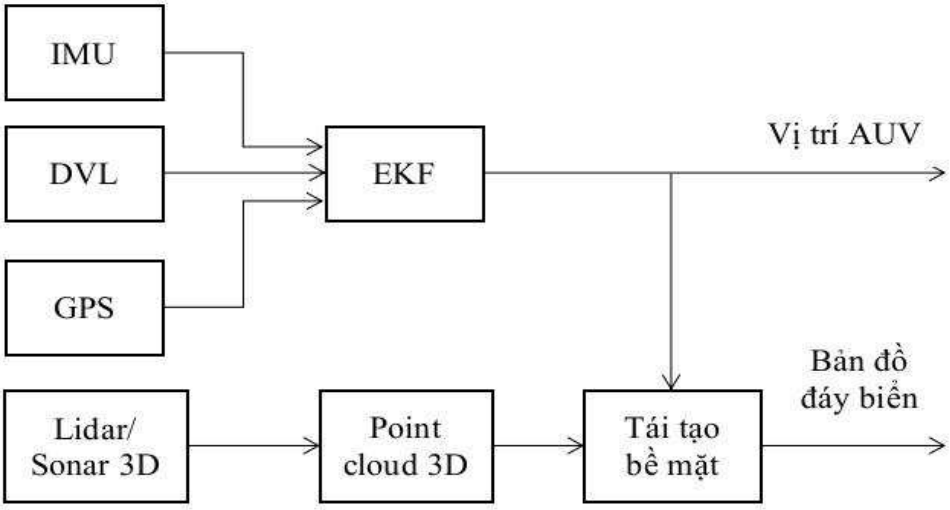
Quá trình này giúp xây dựng lưới tam giác không gian hiệu quả và cải thiện việc ghép nối các điểm đặc trưng trong các bài toán tái tạo 3D.

3.3. Xây dựng hệ thống định vị và xây dựng mô hình 3D bản đồ đáy biển cho AUV

Sơ đồ cấu trúc của hệ thống định vị và xây dựng mô hình 3D bản đồ đáy biển cho AUV được thể hiện trên Hình 3. Quá trình định vị và xây dựng bản đồ được thực hiện như sau:

- AUV được định vị bằng cách sử dụng nhiều loại cảm biến khác nhau như IMU, DVL, và GPS. Mỗi loại cảm biến cung cấp các thông tin bổ sung cho quá trình định vị. Tất cả các dữ liệu này được đưa vào một bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) để hợp nhất thông tin và tính toán vị trí của AUV trong không gian. Thông tin định vị này không chỉ xác định quỹ đạo chuyển động của AUV mà còn làm cơ sở để kết nối dữ liệu đo đạc địa hình với tọa độ thực tế trong không gian 3D.

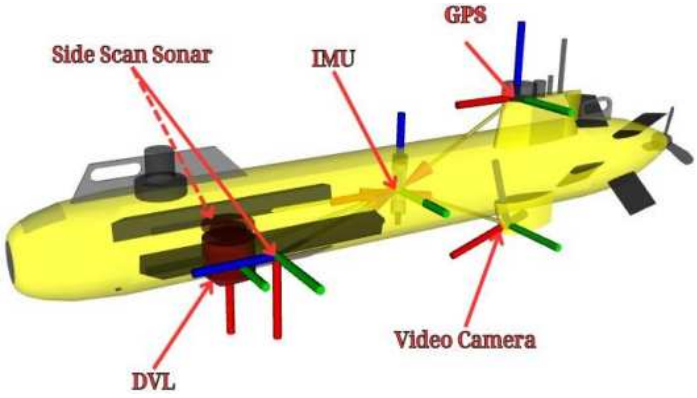
- Quá trình lập bản đồ đáy biển được thực hiện bằng cách sử dụng cảm biến Lidar hoặc Sonar 3D, giúp thu thập dữ liệu bề mặt đáy biển dưới dạng các điểm đám mây (Point cloud 3D). Dữ liệu từ cảm biến được xử lý để loại bỏ nhiễu và ghép nối các điểm đám mây dựa trên vị trí của AUV đã được xác định. Sau đó, quá trình tái tạo bề mặt được thực hiện nhằm chuyển đổi dữ liệu đám mây điểm thành bản đồ 3D liên tục và chi tiết. Kết quả là một mô hình địa hình đáy biển có độ phân giải cao, hỗ trợ trong việc phân tích và trực quan hóa địa hình dưới nước.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc hệ thống định vị và lập bản đồ cho AUV

4. Kết quả thí nghiệm

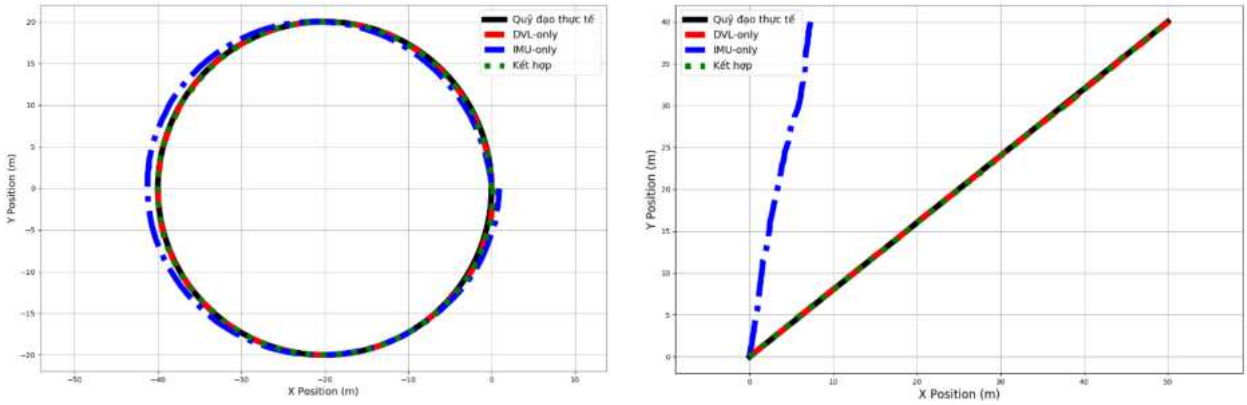
Trong nghiên cứu của mình, bài báo thiết lập các thí nghiệm mô phỏng được thực hiện bằng công cụ Gazebo và Rviz, sử dụng mô hình AUV ECA-A9 để khai thác, kiểm tra thuật toán định vị và xây dựng bản đồ đáy biển 3D cho AUV. Hình 4 mô tả vị trí lắp đặt các loại cảm biến được bố trí trên mô hình AUV ECA-A9. Đồng thời nhóm đã thiết kế một quỹ đạo chuyển động được lập trình sẵn. Quỹ đạo này được tối ưu hóa để đảm bảo AUV có thể bao phủ toàn bộ khu vực khảo sát, đảm bảo dữ liệu thu thập đầy đủ, chính xác và toàn diện cho quá trình tái tạo bản đồ.



Hình 4. Mô hình mô phỏng AUV ECA-A9 và các cảm biến

4.1. So sánh các phương pháp định vị cho AUV

Trong thí nghiệm này, nhóm đã tiến hành xây dựng và đánh giá các thuật toán định vị cho AUV dựa trên dữ liệu đơn lẻ và kết hợp bộ lọc EKF từ các cảm biến DVL, IMU và GPS. Mục tiêu là phân tích độ chính xác và mức độ trôi dạt của từng phương pháp trong hai trường hợp di chuyển: quỹ đạo tròn và quỹ đạo thẳng. Kết quả định vị trong các trường hợp này được thể hiện trên hình 5.



a. Quỹ đạo tròn b. Quỹ đạo thẳng

Hình 5. Kết quả các phương pháp định vị cho AUV

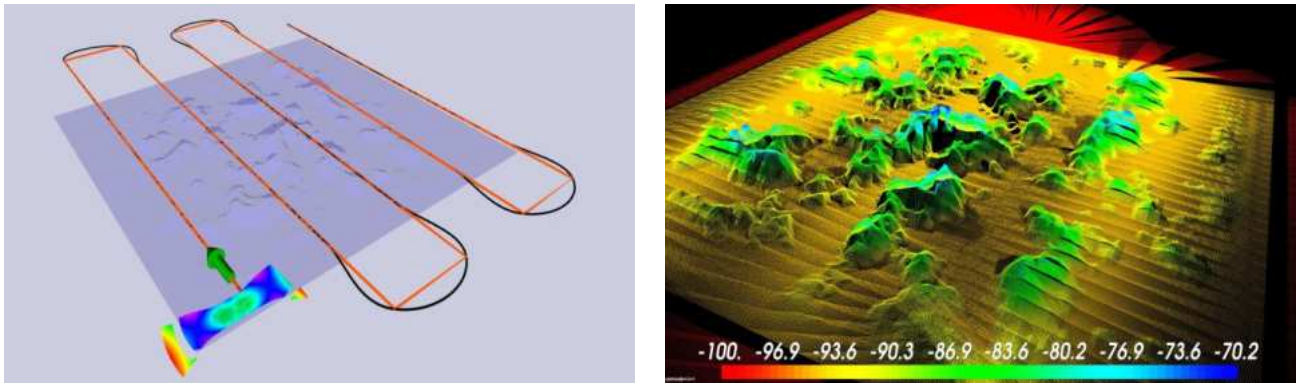
Kết quả cho thấy rằng định vị bằng DVL cung cấp thông tin vận tốc ổn định nhưng bị trôi dạt theo thời gian do sai số tích lũy. Đối với IMU, khi sử dụng độc lập có sai số lớn hơn do việc tích phân gia tốc, dẫn đến độ trôi dạt nhanh chóng. Trong khi đó, khi kết hợp cả 3 loại cảm biến IMU, DVL và GPS, sai số trôi dạt giảm đáng kể nhờ cập nhật vị trí theo thời gian thực, giúp quỹ đạo thu được sát với thực tế.

4.2. Xây dựng bản đồ đáy biển

Trong thí nghiệm này, AUV được điều khiển tự động để bám sát quỹ đạo đã được lập trình sẵn như đã trình bày ở trên. Hệ thống điều khiển sử dụng thông tin định vị từ EKF để liên tục cập nhật vị trí thực tế của AUV và điều chỉnh hướng di chuyển nhằm duy trì quỹ đạo mục tiêu. Bằng cách này, các cảm biến 3D như Sonar hoặc Lidar có thể quét toàn bộ khu vực đáy biển theo kế hoạch.

Dữ liệu đám mây điểm sau khi được xử lý thông qua thuật toán "Meshing 3D", chúng được chuyển đổi thành mô hình bề mặt 3D liên tục, giúp hình dung rõ ràng hơn về địa hình đáy biển. Hình 6 thể hiện kết quả mô phỏng của thuật toán.

Từ kết quả mô phỏng cho ta thấy, bài báo đã thành công trong việc tái tạo bề mặt đáy biển 3D thông qua phương pháp GPT, với dữ liệu thu được từ Sonar 3D. Bản đồ 3D này không chỉ cung cấp thông tin chi tiết về cấu trúc đáy biển mà còn giúp xác định các đặc điểm quan trọng như các chướng ngại vật hoặc các vùng đáy biển có độ sâu khác nhau. Việc xây dựng bản đồ 3D hoàn chỉnh này đã chứng minh tính chính xác và khả năng ứng dụng của hệ thống trong việc khảo sát đáy biển và các nhiệm vụ khảo sát dưới nước. Bên cạnh đó, việc AUV bám theo quỹ đạo xác định sẵn một cách chính xác, chứng tỏ rằng thuật toán định vị hoạt động ổn định và hiệu quả.



a. AUV chuyển động theo quỹ đạo dựng sẵn *b. Mô hình bề mặt đáy biển sau khi xử lý*

Hình 6. Kết quả mô phỏng xây dựng bản đồ đáy biển

5. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã phát triển và ứng dụng thuật toán định vị và xây dựng bản đồ cho phương tiện ngầm tự hành (AUV) sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) kết hợp với các cảm biến IMU, DVL và GPS. Kết quả thí nghiệm trong môi trường mô phỏng ROS và Gazebo đã chứng minh tính khả thi và hiệu quả của thuật toán trong việc đạt được định vị chính xác và tái tạo bề mặt đáy biển 3D.

Mặc dù kết quả thí nghiệm trên môi trường mô phỏng đã cho thấy khả năng hoạt động ổn định của hệ thống, vẫn còn một số điểm cần cải thiện khi áp dụng thuật toán trong môi trường thực tế. Một trong những thách thức chính là việc xử lý các tín hiệu nhiễu và không ổn định từ các cảm biến sonar trong môi trường nước có nhiều dòng chảy hoặc các vật cản tự nhiên. Việc tối ưu hóa thuật toán để giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu và tăng cường khả năng thích ứng với các điều kiện thay đổi trong môi trường tự nhiên là một hướng nghiên cứu quan trọng trong tương lai.

Hơn nữa, việc kết hợp các cảm biến bổ sung và phát triển các phương pháp xử lý dữ liệu tiên tiến có thể giúp cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống, đặc biệt trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt. Nhóm nghiên cứu cũng sẽ tiếp tục thử nghiệm hệ thống trong các

điều kiện thực tế để đánh giá khả năng hoạt động của nó trong các nhiệm vụ khảo sát và nghiên cứu biển.

Tài liệu tham khảo

1. Chen, L., H. Hu, and K. McDonald-Maier. *Ekf based mobile robot localization*. in *2012 Third International Conference on Emerging Security Technologies*. 2012. IEEE.
2. Khairuddin, A.R., M.S. Talib, and H. Haron. *Review on simultaneous localization and mapping (SLAM)*. in *2015 IEEE international conference on control system, computing and engineering (ICCSCE)*. 2015. IEEE.
3. Blidberg, D.R. *The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary*. in *Ieee Icra*. 2001.
4. Othman, A.-K. *GPS-less localization protocol for underwater acoustic networks*. in *2008 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN'08)*. 2008. IEEE.
5. Montemerlo, M., et al., *FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem.* Aaai/iaai, 2002. 593598: p. 593-598.
6. Ribas, D., et al. *Underwater SLAM in a marina environment*. in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. IEEE.
7. West, M.E. and V.L. Syrmos. *Navigation of an autonomous underwater vehicle (AUV) using robust SLAM*. in *2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. 2006. IEEE.
8. Demim, F., et al. *SLAM problem for autonomous underwater vehicle using SVSF filter*. in *2018 25th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*. 2018. IEEE.
9. Xie, Y., et al., *NeuRSS: Enhancing AUV Localization and Bathymetric Mapping With Neural Rendering for Sidescan SLAM.* IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2025.
10. Zhang, J., et al., *A fully-automatic side-scan sonar simultaneous localization and mapping framework.* IET Radar, Sonar & Navigation, 2024. 18(5): p. 674-683.
11. Allotta, B., et al. *A comparison between EKF-based and UKF-based navigation algorithms for AUVs localization*. in *OCEANS 2015-Genova*. 2015. IEEE.
12. Vervoort, J., *Modeling and control of an unmanned underwater vehicle.* Master Traineesh. Rep, 2009: p. 5-15.
13. Fujii, K., *Extended kalman filter.* Refernce Manual, 2013. 14: p. 41.
14. Liu, J., D. Bai, and L. Chen, *3-D point cloud registration algorithm based on greedy projection triangulation.* Applied Sciences, 2018. 8(10): p. 1776.

Algorithm for Localization and Seafloor Mapping for Autonomous Underwater Vehicles

Abstract: This paper presents localization and mapping methods for autonomous underwater vehicles (AUVs) to enhance operational efficiency in marine environments. The localization approach is implemented using an extended Kalman filter (EKF) through data fusion from multiple sensors, including GPS, IMU, and sonar, improving accuracy and reliability in underwater conditions. Simultaneously, a seafloor terrain model is constructed based on 3D point cloud data collected from sonar sensors. This reconstruction process enables the creation of detailed maps, supporting marine survey and research missions. The results demonstrate that the integration of these methods not only optimizes localization capabilities but also provides critical information about seafloor topography, unlocking broad practical applications.

Keywords: *autonomous underwater vehicle (AUV); AUV localization; seafloor topography; Kalman filter; 3D data reconstruction*

Huấn luyện mạng nơron đột biến theo giai đoạn để cải thiện độ chính xác trong nhận dạng hệ số lực nâng của máy bay

Nguyễn Văn Tuấn[1], Trương Đăng Khoa[2], Phạm Trung Dũng[2]
Đinh Hữu Tài[3], Nguyễn Đức Thành[3], Nguyễn Trọng Hà[3]
[1]Hệ Quản lý học viên Sau đại học, Học viện kỹ thuật quân sự
[2]Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện kỹ thuật quân sự
[3] Khoa Kỹ thuật cơ sở, Học viện Phòng Không - Không Quân
[*] *Email: tuannguyen.mtak44@gmail.com, Contact number: 0356101359*

Tóm tắt:
Bài báo đề xuất mạng nơron đột biến được huấn luyện trong hai giai đoạn để nhận dạng hệ số lực nâng của máy bay theo mô hình phi tuyến. Chiến lược huấn luyện đề xuất là sự kết hợp ưu điểm của hai thuật toán lan truyền ngược trong việc cập nhật thời gian phân rã và trọng số khớp nối, đảm bảo nâng cao độ chính xác trong nhận dạng, đồng thời, rút ngắn được thời gian và tính ổn định trong quá trình suy giảm sai số khi huấn luyện mạng. Các kết quả mô phỏng cho thấy rằng hệ số lực nâng của máy bay được nhận dạng bằng chiến lược đề xuất có độ chính xác cao hơn và tốc độ hội tụ sai số nhanh hơn khi luyện mạng so với việc sử dụng riêng rẽ từng phương pháp.

Từ khóa: *Mạng nơron đột biến; Lan truyền ngược sai số đột biến, Thời gian phân rã*

1. Giới thiệu

Các hệ số khí động là những tham số quan trọng cho phép đánh giá được hiệu quả của thiết bị bay. Các tham số này là các chỉ tiêu được đặt ra và được quan tâm trong suốt quá trình thiết kế, thử nghiệm và khai thác sử dụng thiết bị bay (TBB). Việc nhận dạng các tham số khí động có thể được thực hiện theo các phương pháp truyền thống như các phương pháp giải tích dựa trên lý thuyết hồi quy, bắt đầu từ hệ phương trình vi phân hoặc trạng thái như phương pháp sai số bộ lọc (OFM) [1], tựa thực cực đại (ML), sai số đầu ra (OEM), sai số phương trình (EEM) [1] đưa ra các giả thiết thích hợp để xác định các dẫn xuất khí động (các đại lượng liên quan đến các biến chuyển động và đầu vào điều khiển, chúng xuất hiện dưới dạng các hệ số trong phép khai triển chuỗi Taylor để biểu diễn các hệ số khí động của TBB, được định nghĩa là các dẫn xuất ổn định và điều khiển). Những phương pháp này đơn giản về mặt toán học, tuy nhiên có độ chính xác không cao vì không tính đến các nhiễu loạn có trong dữ liệu phục vụ nhận dạng. Ngược lại, việc xác định các tham số khí động của máy bay thông qua thực nghiệm, ví dụ như sử dụng ống thổi khí động có kết quả trực quan hơn. Tuy nhiên, việc này chỉ có thể thực hiện trên mô hình tỷ lệ thu nhỏ với các điều kiện bay hạn chế [2].

Trong những năm gần đây, việc nghiên cứu và ứng dụng mạng nơron nhân tạo (ANN) trong nhận dạng các tham số khí động của máy bay đã phát triển rộng rãi [3]. Nó chỉ ra những ưu điểm nhất định đối với mô hình phi tuyến của các hệ số khí động so với các phương pháp đã đề cập ở trên. Tuy nhiên, các mạng thế hệ thứ hai với các hàm kích hoạt sigmoid hay hàm mũ vẫn tồn tại các hạn chế cố hữu trong các nguyên lý huấn luyện mạng [4], do đó, hiệu suất của ANN vẫn thấp hơn rất nhiều so với mạng nơron sinh học (BNN). Đây chính là động lực để thúc đẩy một thế hệ mạng mới có các cơ chế hoạt động và hiệu suất tiệm cận BNN, nó được gọi là mạng nơron đột biến (SNN) [4]. SNN là một bước đột phá trong việc khắc phục các hạn chế của ANN. Do đó, SNN có thể xử lý các tín hiệu rời rạc như trong sinh học và có

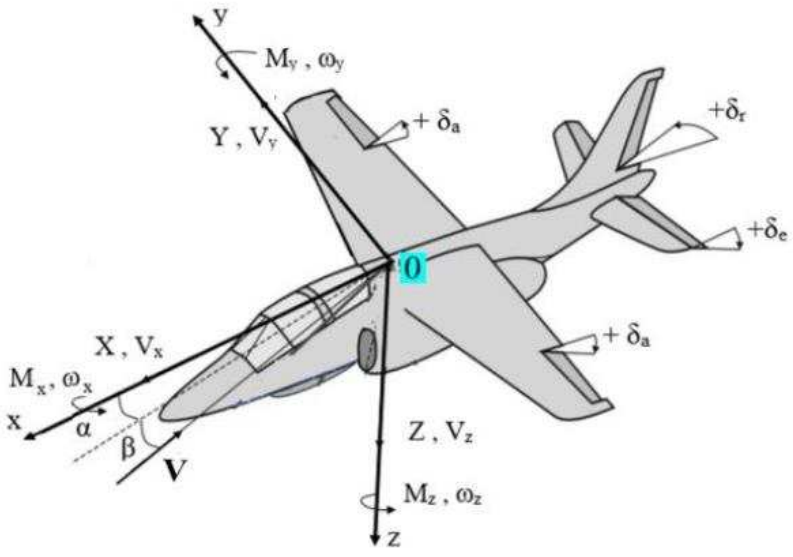
khả năng tương thích cao với mã thời gian [4]. Bởi vậy, SNN đặc biệt phù hợp cho các nhiệm vụ yêu cầu tính toán nhanh và hiệu quả với dữ liệu lớn.

Hiện nay, có nhiều thuật toán được sử dụng để huấn luyện SNN, chẳng hạn như Spikeprop [5], Learning rate adaptation [6], Extending SpikeProp [7], RProp và QuickProp [8], An extended algorithm using adaptation of momentum and learning rate [9], ReSuMe [10], E-learning, I-learning [11], SPAN [12], Normalized spiking error back propagation (NSEBP) [13], Spike timing dependent plasticity [14], R-STDP [15], và thuật toán lan truyền ngược với thời gian phân rã thích nghi (τ_d-PSP) [16]. Tuy nhiên, mỗi thuật toán đều có những ưu, nhược điểm riêng và không thể đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về tốc độ suy giảm sai số đầu ra nhanh và ổn định. Sau khi khảo sát, tác giả nhận thấy rằng τ_d-PSP thỏa mãn các điều kiện để kết hợp với NSEBP và tạo thành một thuật toán hiệu quả cho SNN, được gọi là chiến lược huấn luyện hai giai đoạn (2-Stages).

Trong nghiên cứu này, SNN và chiến lược huấn luyện hai giai đoạn được đề xuất để nhận dạng hệ số lực nâng của máy bay Su-30. Giai đoạn thứ nhất, SNN được huấn luyện bởi thuật toán τ_d-PSP [16] để nhanh chóng đưa sai số đầu ra của mạng về giá trị cực tiểu toàn cục. Tuy nhiên, hạn chế của τ_d-PSP là sự ổn định không cao khi sai số tiến gần về cực tiểu toàn cục. Do đó, NSEBP là một trong những thuật toán cập nhật trọng số khớp nối [13] hiệu quả nhất, được ứng dụng trong giai đoạn thứ hai để giúp sai số tiến về cực tiểu toàn cục ổn định hơn. Thực nghiệm đã cho thấy chiến lược đề xuất đã cải thiện hiệu quả luyện mạng và nâng cao độ chính xác cho kết quả trong bài toán nhận dạng và tốc độ hội tụ của SNN.

Nội dung của bài báo được tổ chức như sau: Phần 1 giới thiệu tổng quan về tầm quan trọng của các hệ số khí động của thiết bị bay và các phương pháp nhận dạng chúng. Phần 2 xây dựng mô hình chuyển động máy bay trong kênh độ cao. Phần 3 Cơ sở cho chiến lược huấn luyện SNN hai giai đoạn. Phần 4 thực hiện nhận dạng hệ số lực nâng của máy bay theo mô hình và chiến lược đề xuất. Phần 5 kết luận và đánh giá các kết quả nhận được.

2. Mô hình động học máy bay trong kênh độ cao



Hình 1. Hệ tọa độ liên kết của máy bay và các ký hiệu

Để phục vụ việc đánh giá chiến lược huấn luyện SNN hiệu quả trong việc nhận dạng hệ số lực nâng của máy bay cho các phần sau. Trong phần này, các tác giả giới thiệu một mô hình động học của máy bay trong kênh độ cao. Mô hình động học này được biểu diễn trong hệ tọa độ liên kết của máy bay $Oxyz$ ở hình 1 [17]: α, β - góc tấn công và góc trượt; V - tốc độ máy bay; X, Y, Z các thành phần lực khí động; V_x, V_y, V_z - các thành phần tốc độ; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - các thành phần tốc độ góc; M_x, M_y, M_z - các thành phần mômen khí động.

Trong kênh độ cao, chuyển động của máy bay được mô tả bằng hệ phương trình phi tuyến [1]:

$$\begin{cases} \dot{V} = \dfrac{P}{m}\cos\alpha - \dfrac{qS}{m}C_D - g\sin(\vartheta - \alpha) \\ \dot{\alpha} = \omega_y - \dfrac{P}{mV}\sin\alpha - \dfrac{qS}{m}C_L\cos(\vartheta - \alpha) \\ \dot{\vartheta} = \omega_y \\ \dot{\omega}_y = \dfrac{qSb_A}{I_y}m_y \end{cases} \quad (1)$$

trong đó ϑ - góc gật; C_L, C_D - hệ số lực nâng khí động, hệ số lực cản khí động; m_y - hệ số mômen khí động theo kênh chúc ngóc; I_y – mômen quán tính theo trục Oy.

Các hệ số lực nâng, hệ số lực cản và hệ số mômen trong (1) được xác định trong hệ tọa độ liên kết như sau [1]:

$$\begin{cases} C_x = \dfrac{1}{q_V S}(ma_x - P);\ C_z = \dfrac{ma_z}{q_V S};\ m_y = \dfrac{1}{q_V Sb_A}I_y\dot{\omega}_y \\ C_L = C_x\sin\alpha - C_z\cos\alpha;\ C_D = -C_x\cos\alpha - C_z\sin\alpha \end{cases} \quad (2)$$

với C_x, C_z - hệ số lực cản và lực nâng không thứ nguyên, được tính trong hệ toạ độ tốc độ; a_x - gia tốc tuyến tính; a_z - gia tốc pháp tuyến, vuông góc với vectơ tốc độ trong mặt phẳng đứng.

Mô hình hệ số lực nâng của máy bay viết dưới dạng các hệ số khí động đối với thành phần phi tuyến [1]:

$$C_L = C_{L_0} + C_L^{\Delta V}\frac{\Delta V}{V_0} + C_L^{\Delta\alpha}\Delta\alpha + C_L^{\alpha^2}(\Delta\alpha)^2 + \\ + C_L^{\omega_{oy}}\frac{\omega_{oy}b_A}{2V_0} + C_L^{\omega_{oy}^2}\left(\frac{\omega_{oy}b_A}{2V_0}\right)^2 + C_L^{\delta_e}\delta_e \quad (3)$$

ở đây: C_{L_0} – hệ số lực nâng khi $\alpha = \alpha_0, V = V_0, \omega_{oy} = 0.$

Việc xác định thành phần hệ số khí động học tương ứng với các thành phần phi tuyến là rất phức tạp. Trong bài báo này, tác giả đề xuất sử dụng xấp xỉ sự phụ thuộc phi tuyến này bởi mô hình mạng nơron phản ứng đột biến (SRM).

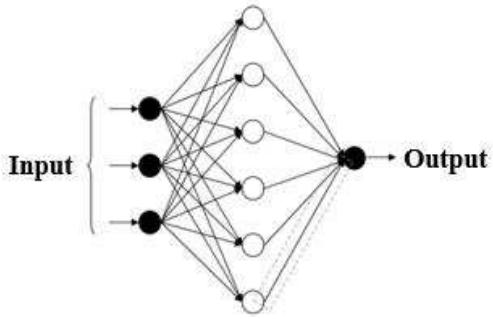
3. Cơ sở cho chiến lược huấn luyện hai giai đoạn

3.1. Mô hình và cấu trúc SNN

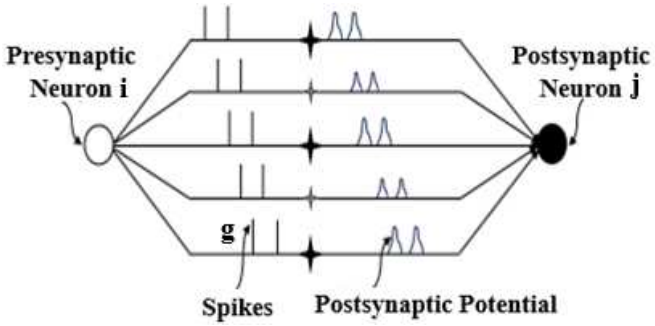
**** Cấu trúc SNN***

Trong [16] đã giới thiệu một cấu trúc của mạng nơron đột biến như trong Hình 2. Một nơron đột biến sau khớp nối có thể kết nối với một nơron đột biệt trước khớp nối bằng nhiều

khớp nối như Hình 3. Trong quá trình hoạt động, một nơron đột biến có thể nhận nhiều đột biến đầu vào từ các nơron đột biến trong lớp trước đó, đồng thời chúng cũng có thể kích hoạt nhiều đột biến đầu ra tương ứng.



Hình 2. Cấu trúc SNN



Hình 3. Kết nối giữa các nơron trước và sau khớp nối

**** Mô hình phản ứng đột biến***

Trạng thái bên trong $u_j(t)$ của nơron *j* sau khớp nối ở lớp *m* tại *t* được mô hình hóa [16]:

$$u_j(t) = \sum_{i=1}^{F_{m+1}} \sum_{k=1}^{S} \sum_{g=1}^{G_i} w_{ij}^k \varepsilon(t - t_i^{(g)} - d^k) + \psi(t - t_j^{(f)}) \quad (4)$$

$$\varepsilon(z) = \left[\exp(-\frac{z}{\tau_d}) - \exp(-\frac{z}{\tau_u}) \right] H(z) \quad (5)$$

$$z = t - t_i^{(g)} - d^k \quad (6)$$

trong đó: $t_j^{(f)}$ - thời điểm đột biến đầu ra thứ *f* gần nhất trước thời điểm *t*; $\varepsilon(z)$ - hàm phản ứng đột biến; τ_u - thời gian của sườn lên; τ_d - thời gian phân rã; $H(z)$ - biểu thị hàm bước Heavyside: $H(z) = 1$ nếu $z \geq 0$ và $H(z) = 0$ nếu $z < 0$; d^k - độ trễ khớp nối thứ *k*; $t_i^{(g)}$ - thời điểm đột biến thứ *g* của nơron *i* trước khớp nối; w_{ij}^k - trọng số khớp nối thứ *k* của nơron *i* trước khớp nối và nơron *j* sau khớp nối; F_{m+1} - số lượng nơron trước khớp nối trong lớp $m+1$; S - số lượng khớp nối giữa một nơron *i* trước khớp nối và một nơron *j* sau khớp nối; G_i - số lượng đột biến được kích hoạt nơron *i* trước khớp nối; ψ - hàm phục hồi điện thế hoạt động của nơron về điện thế nghỉ sau khi kích hoạt một đột biến.

3.2. Các thuật toán đề xuất

**** Thuật toán lan truyền ngược với thời gian phân rã thích nghi (τ_d - PSP)***

Thuật toán này cũng thực hiện tối thiểu hóa hàm sai số cho các đột biến đầu ra như sau:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{F_m} \left(t_{out}^j - t_{out}^d \right)^2 \quad (7)$$

trong đó: F_m - số lượng nơron trong lớp đầu ra; t_{out}^j - thời điểm đột biến đầu ra thực tế; t_{out}^d - thời điểm đột biến đầu ra mong muốn của nơron thứ *j* trong lớp đầu ra.

Để tối thiểu hóa hàm sai số E, việc cập nhật biến thời gian phân rã τ_d cho các hàm phản ứng đột biến được thực hiện giữa các lớp của SNN.

$$\tau_d^{k+1} = \tau_d^k + \Delta\tau_d^k \quad (8)$$

Quy tắc cập nhật Delta tổng quát được sử dụng để lan truyền ngược sai số và điều chỉnh biến thời gian phân rã τ_d như sau:

$$\Delta\tau_d^k = -\lambda\frac{\partial E}{\partial\tau_d^k} \tag{9}$$

Việc tính toán lượng cập nhật thời gian phân rã $\Delta\tau_d$ cho các khớp nối giữa nơron trong lớp ẩn và nơron trong lớp đầu ra, cũng như nơron trong lớp ẩn liên kết với nơron trong lớp đầu vào được giới thiệu chi tiết ở trong [16].

**** Thuật toán lan truyền ngược sai số đột biến chuẩn hóa (NSEBP)***

Thuật toán NSEBP được trình bày chi tiết trong [13]. Giả sử yêu cầu nơron thứ *j* kích hoạt một đột biến mong muốn tại thời điểm t_{out}^j. Nhưng thực tế điện áp của nơron *j* xác định được là $U\left(t_{out}^j\right)$ khác với điện áp ngưỡng U_{thres}. Sai số E ở đầu ra của mạng được xác định như:

$$E = U_{thres} - U\left(t_{out}^j\right) \tag{10}$$

Sai số E gồm hai thành phần E_{w}^n, E_t^n và phân bố tới *n* lớp nhờ tham số phân bố *r* như sau:

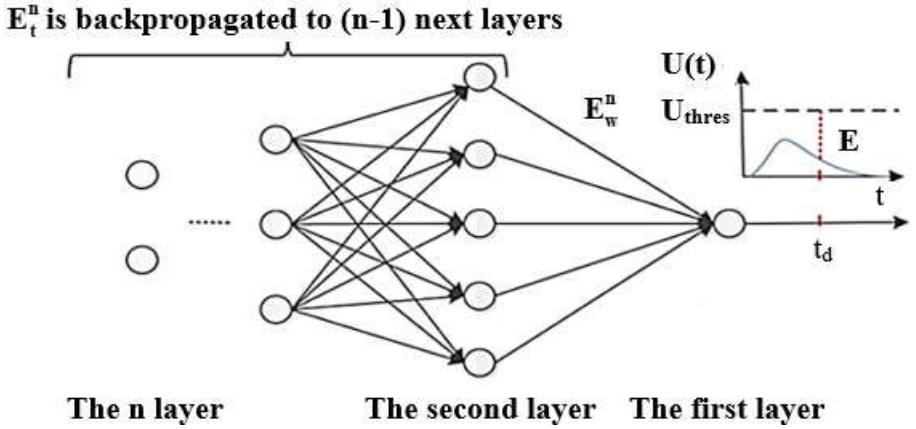
$$E_{\mathrm{w}}^n = rE \tag{11}$$

$$E_t^n = (1-r)E \tag{12}$$

trong đó: E_{w}^n - sai số đối với lớp hiện tại; E_t^n - sai số được lan truyền tới n-1 lớp sau đó. Phân bố sai số cho các lớp được thể hiện trên hình 4.

Việc huấn luyện mạng gồm hai phần:

- Thay đổi trọng số liên kết để loại bỏ E_{w}^n khi luyện lớp hiện tại
- Biến động thời điểm đột biến đầu vào để lan truyền ngược sai số E_t^n



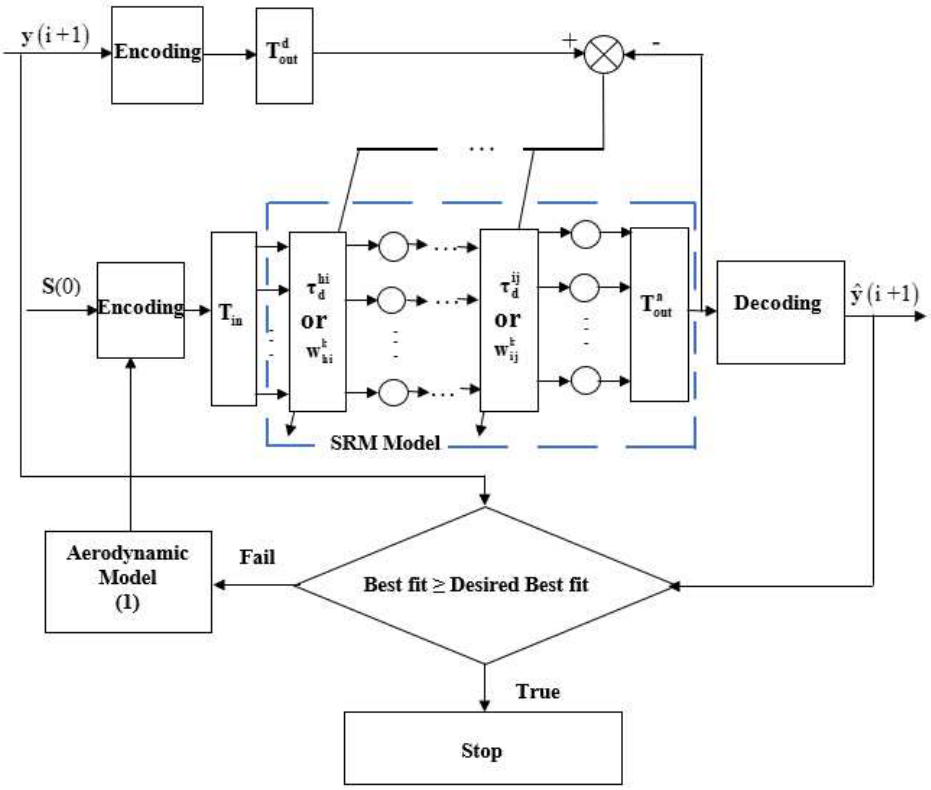
Hình 4. Phân bố sai số đối với các lớp trong SNN có n lớp

3.2. Khảo sát cơ sở cho chiến lược huấn luyện SNN hai giai đoạn

Cấu trúc SNN kênh độ cao theo mô hình SRM được sử dụng để khảo sát chiến lược huấn luyện đề xuất trong việc nhận dạng hệ số lực nâng (3) được thể hiện trong Hình 5.

Véc tơ biến đầu vào $\boldsymbol{S}(0) = [\alpha(0), \varphi(0), \omega_{oy}(0), V(0), \delta_e(0)]^{\mathrm{T}}$ tại thời điểm ban đầu $t = 0$ và véc tơ dữ liệu đo là $\boldsymbol{y}(i+1) = [\alpha(i+1), \varphi(i+1), \omega_{oy}(i+1), V(i+1), a_{ox}(i+1), a_{oz}(i+1)]^{\mathrm{T}}$ đối với các

tham số chuyển động của máy bay được mã hóa thành chuỗi thời điểm đột biến đưa vào SNN. Việc kiểm tra điều kiện dừng của thuật toán luyện mạng là sự phù hợp giữa $\boldsymbol{y}(i+1)$ và $\hat{\boldsymbol{y}}(i+1)$ thông qua chỉ số "Best fit" ("Best fit desired" được chọn ở đây là 95%) hoặc khi đạt được giá trị sai số thiết lập. Công thức mã hóa tín hiệu đầu vào thành thời điểm đột biến và giải mã thời điểm đột biến đầu ra thành giá trị liên tục tương tự trong [18]:



Hình 5. Cấu trúc SNN để nhận dạng hệ số lực nâng

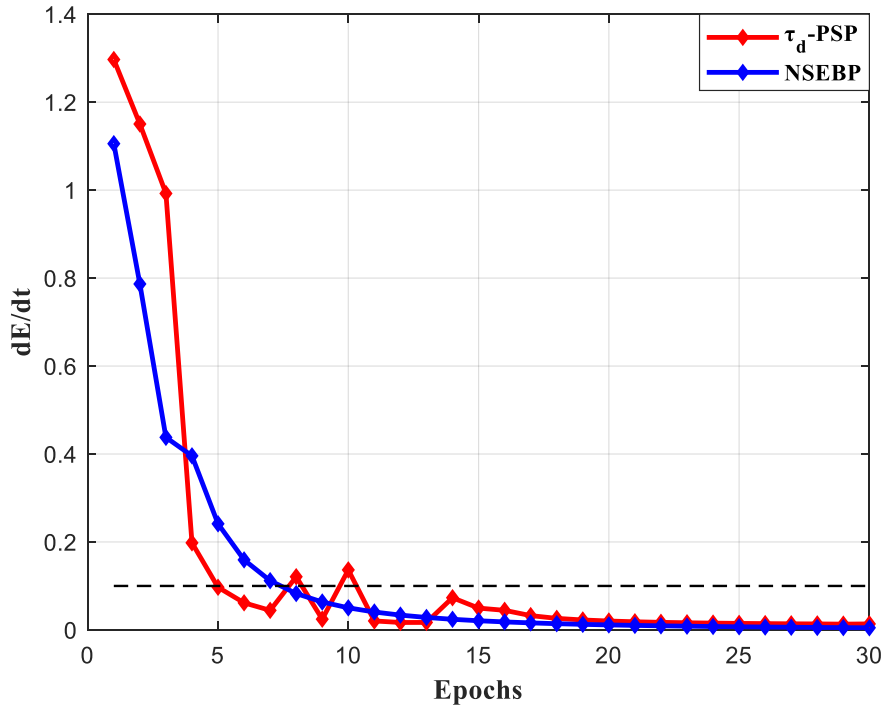
Để khảo sát và xây dựng cơ sở cho chiến lược huấn luyện mạng hai giai đoạn, tác giả sẽ khảo sát hiệu quả huấn luyện SNN với hai thuật toán được đề cập trong mục 3.2 và tập dữ liệu thiết bị bay được ghi lại từ các chuyến bay thực tế của máy bay SU-30 để nhận dạng các tham số khí động của máy bay trong các giai đoạn cất cánh [17]. SNN được xây dựng với cấu trúc 5-20-10-1: 5 nơron đầu vào tương ứng với véc tơ biến đầu vào **S**(0), 20 nơron lớp ẩn thứ nhất, 10 nơron lớp ẩn thứ hai và 1 nơron đầu ra tương ứng với C_L.

**** Khảo sát hiệu quả huấn luyện của thuật toán τ_d - PSP :***

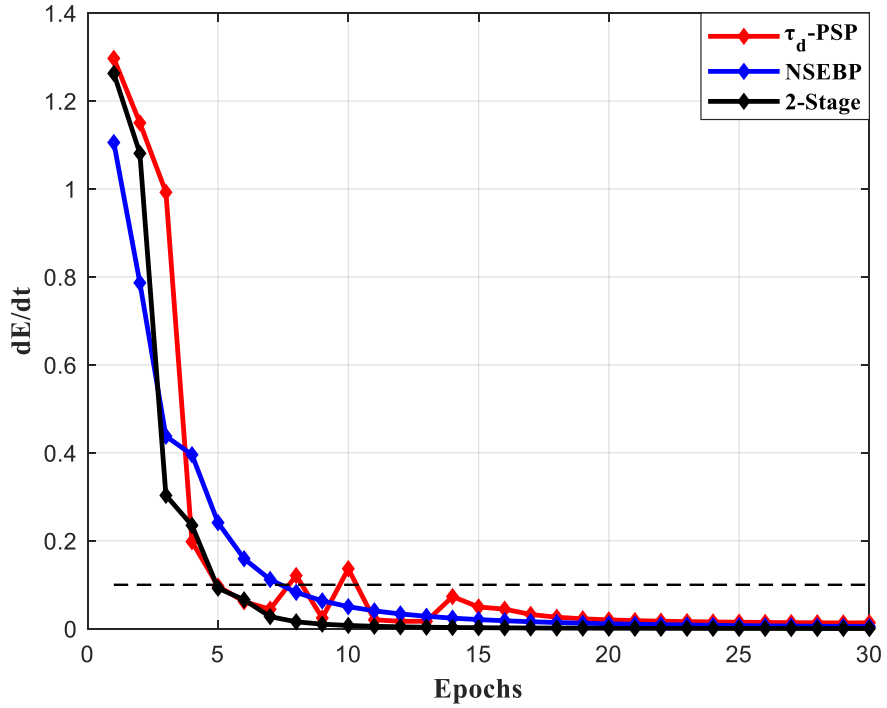
Để khảo sát hiệu quả thuật toán τ_d-PSP, một số tham số đặc trưng của SNN được thiết lập: $\tau_u = 6ms$; $\tau_d \in [10\text{ms} \div 13\text{ms}]$; trọng số khớp nối cố định $\omega_{ij}^k = \omega_{hi}^k = 0.5$; tốc độ học $\lambda = 0.5$.

**** Khảo sát hiệu quả huấn luyện của thuật toán NSEBP:***

Để khảo sát hiệu quả thuật toán NSEBP, một số tham số đặc trưng của SNN được thiết lập như sau: $\tau_u = 6ms$, $\tau_d = 12ms$; trọng số khớp nối ban đầu $\omega_{ij}^k = \omega_{hi}^k = 0.5$; tốc độ học $\lambda = 0.5$. Kết quả khảo sát đánh giá trung bình trên 100 lần chạy để đảm bảo tính thống kê.



Hình 6. Sai số đầu ra SNN được huấn luyện bởi NSEBP và τ_d-PSP



Hình 7. So sánh sai số đầu ra SNN được luyện bởi NSEBP, τ_d-PSP và chiến lược đề xuất

**** Một số kết luận nhận được sau khảo sát:***

- Thuật toán τ_d-PSP có tốc độ suy giảm sai số đầu ra (đường màu đỏ) của mạng ở giai đoạn đầu (6 epochs) nhanh hơn so với thuật toán NSEBP (đường màu xanh) được minh họa như trong Hình 6.

- Tuy nhiên, khi sai số cảng giảm về một giá trị cực tiểu tới hạn, τ_d-PSP thể hiện sự không ổn định so với thuật toán NSEBP được minh họa trong Hình 6. Cụ thể, từ epochs thứ 7 trong hình 6, sai số đầu ra của mạng bắt đầu có sự dao động.

- Trong khi đó, sai số đầu ra của mạng được huấn luyện bằng NSEBP có tốc độ suy giảm chậm hơn nhưng giá trị lại nhỏ và ổn định hơn thuật toán τ_d-PSP như trong Hình 6.

- Nó có thể dễ dàng nhận thấy rằng τ_d-PSP có tốc độ suy giảm sai số trong giai đoạn đầu (6 epochs đầu tiên) nhanh hơn, còn thuật toán NSEBP có mức độ suy giảm đều và ổn định hơn. Do đó, tác giả đề xuất chiến lược luyện mạng SNN theo hai giai đoạn để có thể tận dụng được các ưu điểm của hai thuật toán trong việc cải thiện hiệu suất và độ chính xác cho luyện SNN trong nhận dạng hệ số lực nâng máy bay Su-30. Cụ thể, 6 epochs đầu tiên SNN được huấn luyện với τ_d-PSP, giai đoạn còn lại SNN được huấn luyện bởi NSEBP.

4. Nhận dạng hệ số lực nâng theo mô hình và chiến lược đề xuất

4.1. Dữ liệu phục vụ nhận dạng

Với mục đích nhận dạng hệ số lực nâng cho một dạng máy bay trong giai đoạn cất cánh, bài báo sử dụng bộ tham số theo thuyết minh kỹ thuật của máy bay Su–30MK2. Các tham số kỹ thuật và kích thước hình học cơ bản của máy bay Su–30MK2 phục vụ cho nhận dạng hệ số lực nâng như sau [19]**:**

- Lực đẩy động cơ: P = 74600 N
- Gia tốc trọng trường: g = 9,8 m/s^2
- Khối lượng máy bay: m = 24900 kg
- Mômen quán tính trục $Oy: I_y$ = 62010 kg.m^2
- Diện tích đặc trưng cánh nâng: S = 65 m^2
- Cung khí động cánh nâng: b_A = 4,6 m
- Sải cánh nâng: l = 14,1 m
- Áp suất khí động: $q_V = \rho V^2/2$, trong đó mật độ không khí ρ thay đổi tương ứng với sự thay đổi độ cao $450 \div 5000$ m; tốc độ máy bay thay đổi $0 \div 690$ m/s.

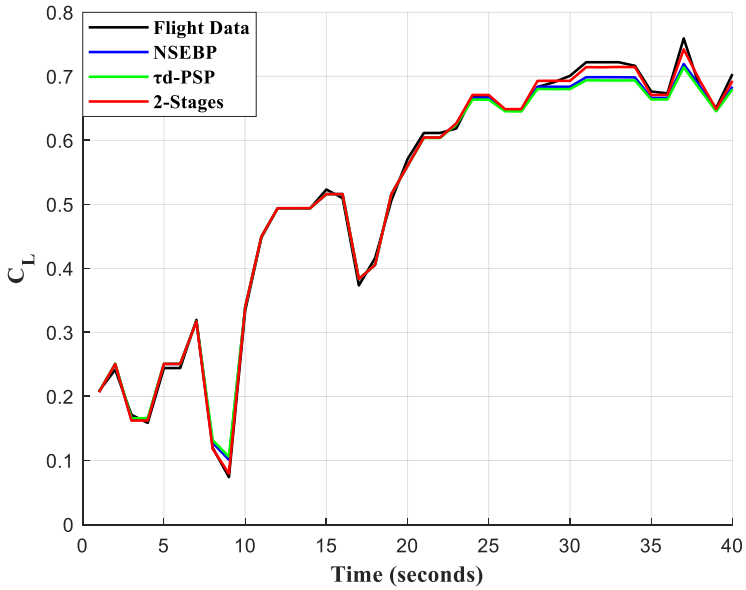
Tham số phục vụ nhận dạng trong giai đoạn cất cánh nhận được từ bộ ghi dữ liệu chuyến bay được giải mã và đọc lại sau mỗi ban bay, bao gồm: góc tấn công α, góc chúc góc ϑ, tốc độ góc chúc góc ω_{oy}, góc lệch cánh lái độ cao δ_e, gia tốc máy bay theo trục đứng a_z và trục dọc a_x [17]**.** Các tham số đo được này tương ứng với:

- Độ cao bay: H = 267- 3000 m;
- Tốc độ máy bay: V = 0 - 537 m/s;
- Áp suất khí động: $q_V = \rho V^2/2$ N/m^2 , thay đổi với tốc độ máy bay và mật độ không khí tại độ cao tương ứng.

4.2. Kết quả nhận dạng hệ số lực nâng

Chương trình nhận dạng được viết trên phần mềm MATLAB. Kết quả nhận dạng hệ số lực nâng của máy bay Su-30 khi mạng được huấn luyện bởi τ_d-PSP, NSEBP và chiến lược đề xuất như Hình 8. Có thể thấy rằng, hệ số lực nâng được nhận dạng bởi chiến lược đề xuất

(đường màu đỏ) bám sát đường dữ liệu đo thực tế (đường màu đen) hơn so với các đường màu xanh lá (τ_d-PSP) và đường màu xanh lam (NSEBP).



Hình 8. Kết quả nhận dạng hệ số lực nâng bởi ba thuật toán

Bảng 1 cho thấy rằng độ chính xác của hệ số lực nâng được nhận dạng bởi ba thuật toán đều cao hơn 97%, trong đó chiến lược đề xuất là cao nhất với 98.87%. Điều này đã khẳng định rằng chiến lược đề xuất có hiệu quả cao trong bài toán nhận dạng các tham số khí động của máy bay.

Bảng 1. Độ chính xác của hệ số lực nâng được nhận dạng bởi ba thuật toán

Thuật toán	τ_d-PSP	NSEBP	2-Stages
C_L	97.84 %	97.95 %	98.87 %

5. Nhận dạng hệ số lực nâng theo mô hình và chiến lược đề xuất

Từ kết quả nhận dạng trong Phần 4, chúng ta có thể thấy rằng thuật toán đề xuất đã cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của các tham số được nhận dạng so với hai thuật toán ban đầu. Đây là những cơ sở ban đầu để có thể tiếp tục nghiên cứu và ứng dụng SNN với chiến lược huấn luyện 2 giai đoạn cho các nhiệm vụ khác.

Trong các nghiên cứu tiếp theo cần thực hiện nhận dạng trên nhiều tập dữ liệu khác nhau, trong các điều kiện bay khác nhau, đồng thời nghiên cứu, xác định khoảng tin cậy đối với các hệ số khí động sau khi nhận dạng được để có thể khẳng định sự hiệu quả của thuật toán đề xuất.

Tài liệu tham khảo

[1] Eugene AM, Vladislav K, (2006). Aircraft System Identification: Theory and Practice, *1st edn. AIAA, USA*, Chapter 3: pp 27-71; Chapter 5: pp 95-179; Chapter 6: pp 181-221.

[2] Lixin W, Shang T, Ting Y, Hailiang L, Yanling W, Chen B, (2022). Longitudinal Aerodynamic Parameter Identification for Blended-Wing-Body Aircraft Based on a Wind Tunnel Virtual Flight Test, *Aerospace*.

https://doi.org/10.3390/aerospace9110689

[3] Jitu S, Dhan S, (2018). Aerodynamic Parameters Estimation Using Radial Basis Function Neural Partial Differentiation Method, *Defence Science Journal*.
https://doi.org/10.14429/dsj.68.11843

[4] Kashu Y, Viet Khoa VH, Darshan B, Ngan L, (2022). Spiking neural networks and their applications: A review, *Brain Sci*, PMID: 35884670.
https://doi.org/10.3390/brainsci12070863

[5] Bohte, S.M., Kok, J.N., La Poutré, H, (2002). Error-backpropagation in temporally encoded networks of spiking neurons, Neurocomputing, 2002.
https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00658-0

[6] Huijuan, F., Jiliang, L., Fei, W, (2012). Fast learning in spiking neural networks by learning rate adaptation, *Chin. J. Chem. Eng*, 20(6), pp. 1219–1224.
https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60611-9

[7] Booij, O., Tat Nguyen, H, (2005). A gradient descent rule for spiking neurons emitting multiple spikes, *Inf. Process*. Lett. 95(6), pp. 552–558.
https://doi.org/10.1016/j.ipl.2005.05.023

[8] McKennoch, S., Liu, D.L.D., Bushnell, L.G, (2006). Fast modifications of the spikeprop algorithm, *In Proceedings of the 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, vol. 16, no. 6, pp. 3970–3977.
https://doi.org/10.1109/IJCNN.2006.246918

[9] Yuling Luo., Qiang Fu., Junxiu Liu., Jim Harkin., Liam McDaid., Yi Cao, (2017). An Extended Algorithm Using Adaptation of Momentum and Learning Rate for Spiking Neurons Emitting Multiple Spikes, *Faculty of Electronic Engineering, Guangxi Normal University*, Guilin 541004, China, pp. 569-579.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-59153-7_49

[10] Ponulak F, Kasinski A, (2010). Supervised learning in spiking neural networks with ReSuMe: sequence learning, classification, and spike shifting, *Neural Computation* 22, pp. 467–510.
https://doi.org/10.1162/neco.2009.11-08-901

[11] Florian RV, (2012). The chronotron: a neuron that learns to fire temporally precise spike patterns, Romanian Institute of Science and Technology, Cluj-Napoca, Romania. *PLoS ONE*, 7: e40233, PMID: 22879876.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040233

[12] Mohemmed A, Schliebs S, Matsuda S, Kasabov N, (2012). Span: spike pattern association neuron for learning spatio-temporal spike patterns, *International Journal of Neural Systems*, 22: 1250012, PMID: 22830962.
https://doi.org/10.1142/S0129065712500128

[13] Xiurui X, Hong Q, Guisong L, Malu Z, Jurgen K, (2016). An efficient supervised training algorithm for multilayer spiking neural networks. *PLoS ONE*.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150329

[14] Gerstner W, Kistler WM, (2002). Spiking nerual models: single neurons, populations, plasticity, *1st ed. Cambridge: Cambridge University Press*.

[15] Eugene M Izhikevich, (2007). Solving the distal reward problem through linkage of STDP and dopamine signaling, *Epub,* 17(10):2443-52.
https://doi.org/10.1093/cercor/bhl152

[16] Tuan NV, Khoa TD, Dung PT, (2024). A new supervised learning algorithm with the adaptive decay time for the spike neural network, *The 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences*, Vietnam.
https://doi.org/10.1109/ICCAIS59597.2023.10382402

[17] Vinh NQ, Thanh ND, Dac HM, Khoa TD, (2020). Identify aerodynamic derivatives of the airplane attitude channel using a spiking neural network. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*.
https://doi.org/10.15394/ijaaa.2020.1490

[18] Tuan NV, Khoa TD, Dung PT, Tai HD, (2023). A spike trains encoding and decoding solution for the spiking neural networks. *Journal of Military Science and Technology*, vol 91, pp 28-34.
https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.91.2023.28-34

[19] Nguyen Van Tuan, Truong Dang Khoa, Pham Trung Dung, (2023). Nhận dạng hệ số lực nâng máy bay trong giai đoạn cất cánh sử dụng mạng nơron đột biến với mô hình nơron Izhikevich và thuật toán học sâu SpikeProp. *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật*, pp. 93-105.
https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v18.n02.690

Training spiking neural networks according to stages to improve accuracy in identifying the lift coefficient of an aircraft

Abstract: *The paper proposes a spiking neural network trained in two stages to identify the lift coefficient of an aircraft using a nonlinear model. The proposed training strategy integrates the advantages of two backpropagation algorithms to update the decay time and synaptic weights, enabling the network to minimize output error quickly and stably. Simulation results indicate that the lift coefficient identified using the proposed strategy achieves higher accuracy than traditional methods. Furthermore, the network's convergence speed with the proposed approach is faster than other conventional methods.*

Keywords: Spiking Neural Network; Spiking Error Backpropagation; The Decay Time

❑


HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ
MILITARY TECHNICAL ACADEMY