

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**

**BỘ QUỐC PHÒNG**

**HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ**

---

**ĐÀO SĨ LUẬT**

**NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP HỆ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ THỐNG TRUYỀN  
ĐỘNG ĐIỆN NHIỀU ĐỘNG CƠ LIÊN KẾT ĐÀN HỒI BẰNG PHƯƠNG PHÁP  
NỘI SUY THỰC.**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**HÀ NỘI - 2022**

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI  
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG**

Người hướng dẫn khoa học: **1- TS. Nguyễn Phú Đăng**  
**2- TS. Phạm Văn Thuận**

Phản biện 1: GS. TS Lê Hùng Lân

Phản biện 2: PGS. TS Nguyễn Văn Liên

Phản biện 3: PGS. TS Nguyễn Thanh Tiên

**Có thể tìm hiểu luận án tại:**

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viện Quốc gia

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của đề tài

Trong thực tế có nhiều đối tượng điều khiển có độ dài không gian xác định mà động học của chúng được mô tả bởi các phương trình vi phân đạo hàm riêng, các phương trình tích phân, vi - tích phân và các dạng khác nữa. Việc giải riêng rẽ các phương trình này là vấn đề rất phức tạp mà hầu như phương pháp nào cũng đều phải sử dụng các giải pháp xấp xỉ, không đưa ra được lời giải tổng quát. Vì vậy, đề tài “*Nghiên cứu tổng hợp hệ điều khiển cho hệ thống truyền động điện nhiều động cơ liên kết đàn hồi bằng phương pháp nội suy thực*” đặt vấn đề tổng hợp bộ điều chỉnh trong vòng điều khiển kín của hệ thống điều khiển với sự tham gia của đối tượng có tham số phân bố, nhằm xác định hàm truyền đạt hệ kín thỏa mãn các tiêu chuẩn đầu ra cho trước mà không phải thực hiện công đoạn xấp xỉ trung gian là có tính cấp thiết.

### 2. Mục đích của đề tài

- Phát triển phương pháp và thuật toán ước lượng hàm truyền đạt mô tả đối tượng có tham số phân bố.
- Phát triển phương pháp và thuật toán tổng hợp bộ điều chỉnh của các hệ thống điều khiển đối tượng có tham số phân bố dựa trên phương pháp nội suy thực.
- Tổng hợp hệ truyền động điện nhiều động cơ chủ động có chứa phần tử liên kết đàn hồi.

### 3. Đối tượng nghiên cứu

Hệ thống điều khiển tự động các đối tượng có tham số phân bố nói chung và cụ thể là hệ truyền động điện nhiều động cơ chủ động có chứa phần tử liên kết đàn hồi.

### 4. Phạm vi nghiên cứu

Các phương pháp và cách thức nâng cao chất lượng tổng hợp bộ điều chỉnh cho các hệ thống có tham số phân bố. Mô phỏng, đánh giá kết quả tổng hợp và xây dựng mô hình thực nghiệm hệ truyền động điện hai động cơ có liên kết đàn hồi.

### 5. Phương pháp nghiên cứu

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết tổng hợp hệ thống điều khiển đối tượng có tham số phân bố bằng phương pháp nội suy thực.
- Xây dựng thuật toán tổng hợp, mô phỏng, đánh giá kết quả trên Matlab & Simulink và thực hiện tính toán tham số bộ điều chỉnh của hệ truyền động điện hai động cơ không đồng bộ có chứa băng tải liên kết đàn hồi.

## 6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

- Ý nghĩa khoa học:

+ Xây dựng thuật toán ước lượng hàm truyền đạt mô tả đối tượng có tham số phân bố bằng phương pháp nội suy thực. Xây dựng chương trình và đánh giá sai số ước lượng hàm truyền đạt mô tả bằng tải đàn hồi.

+ Thiết lập cơ sở tổng hợp bộ điều chỉnh của các hệ thống điều khiển đối tượng có tham số phân bố bằng phương pháp nội suy thực. Thực hiện tổng hợp các vòng điều khiển, xây dựng chương trình mô phỏng và đánh giá hệ thống trên máy tính cho hệ truyền động điện hai động cơ không đồng bộ có chứa băng tải đàn hồi với các tham số cụ thể.

- Ý nghĩa thực tiễn:

Kết quả nghiên cứu của đề tài có thể được ứng dụng vào việc nâng cao chất lượng làm việc của các dây chuyền sản xuất tự động có chứa hệ truyền động điện nhiều động cơ liên thuộc nhau về tốc độ, cần độ chính xác cao như: dây chuyền cán thép, sản xuất giấy, thiết bị gia công màng mỏng, dây chuyền bọc cáp, máy kéo sợi, dây chuyền đóng hộp,...

## 7. Bố cục của luận án

Nội dung của luận án được trình bày trong 163 trang A4, gồm: Mở đầu, 4 chương, kết luận và phụ lục:

Chương 1. Bài toán điều khiển hệ truyền động điện nhiều động cơ có chứa phần tử liên kết đàn hồi

Chương 2. Ước lượng hàm truyền đạt mô tả các đối tượng có tham số phân bố

Chương 3. Cơ sở tổng hợp hệ thống điều khiển ứng dụng phương pháp nội suy thực

Chương 4. Xây dựng hệ truyền động điện hai động cơ có chứa băng tải đàn hồi dạng vòng kín

## Chương 1

# BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN NHIỀU ĐỘNG CƠ CÓ CHỨA PHẦN TỬ LIÊN KẾT ĐÀN HỒI

### 1.1. Tổng quan hệ truyền động điện có chứa phần tử liên kết đàn hồi

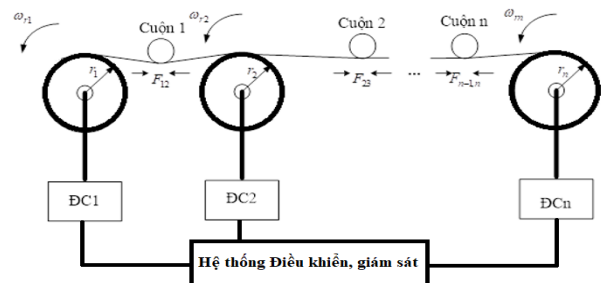
Trong thực tế tồn tại một lớp rộng các đối tượng vật lý như: các thiết bị vệ tinh liên kết bằng dây với trạm không gian, các panel năng lượng mặt trời cung cấp nguồn cho các trạm không gian, các đối tượng năng lượng và nhiệt của động cơ đốt trong, các thiết bị luyện kim, nung, sấy, các hệ truyền động điện có chứa phần tử cơ học đàn hồi, các thiết bị thám hiểm dưới nước được lai dắt bằng cáp, v.v. đều có độ dài không gian xác định, các tham số vật lý của chúng không chỉ phụ thuộc thời gian, mà còn phụ thuộc kích thước không gian. Hàm trạng thái  $Q(x,t)$  của chúng thay đổi theo thời gian  $t$  hay tọa độ không gian  $x$ , được mô tả bởi các phương trình vi phân đạo hàm riêng, phương trình tích phân, vi-tích phân hoặc các phương trình khác nữa. Vì vậy, hàm truyền đạt mô tả chúng thường là biểu thức phức tạp:

$$W_{dt}(x, \xi, s) = f(s, e^{\frac{A(s)}{B(s)}}, \sqrt{s}, \cos(s), \sin(s), sh(s), ch(s), \dots), \quad (1.1)$$

chứa không chỉ đối số  $s$  như với hệ tuyến tính mà còn cả các thành phần quán tính và siêu việt (hàm của  $s$ :  $e^{\frac{A(s)}{B(s)}}, \sqrt{s}, \cos s, \sin s, shs, chs$ , v.v.). Điều này làm cho việc hiện thực hóa các hệ thống điều khiển cho những đối tượng như vậy phức tạp hơn nhiều so với hệ có tham số tập trung như cần phải thực hiện giám sát trạng thái của đối tượng theo không gian với mục đích quan sát kết quả của quá trình điều khiển và sử dụng các tín hiệu hồi tiếp, hay khi cần tổng hợp các bộ điều chỉnh của hệ thống điều khiển với các tác động điều khiển phân bố theo không gian.

Các hệ truyền động điện tự động nhiều động cơ liên thuộc nhau bởi các phần tử liên kết đàn hồi (hình 1.1) là thành phần cơ bản trong hầu hết các dây chuyền sản xuất, robot công nghiệp, thiết bị gia công cơ khí, như hệ thống máy cán thép liên tục, dây chuyền sản xuất giấy, thiết bị gia công màng mỏng quang học, dây chuyền bọc cáp, máy kéo sợi, dây chuyền đóng hộp, các robot tự động trong các dây chuyền sản xuất lắp ráp ô tô, sản xuất linh kiện điện tử,.... Chất lượng điều khiển các hệ thống

này sẽ quyết định độ chính xác và chất lượng làm việc của toàn bộ dây chuyền....



**Hình 1.1.** Cấu trúc hệ truyền động nhiều động cơ liên thuộc nhau bởi băng tải đàn hồi

Hệ thống điều khiển truyền động nhiều động cơ có chứa băng tải đàn hồi cần phải đáp ứng các yêu cầu: đồng bộ cao về tốc độ giữa các động cơ; tính tác động nhanh và độ chính xác điều chỉnh cao. Trong quá trình hệ thống làm việc đường kính tang tháo, quần có thể thay đổi. Nếu tốc độ các động cơ không thay đổi thì lực căng của băng tải sẽ biến thiên. Vì vậy hệ thống điều khiển phải điều chỉnh được cả tốc độ và mômen nhằm ổn định lực căng của băng tải.

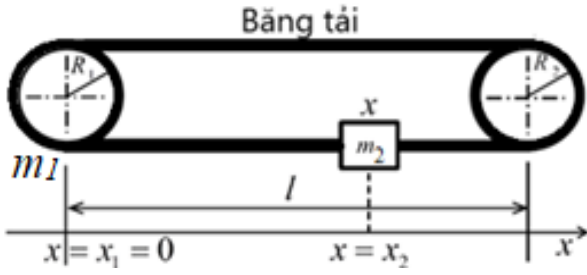
## 1.2. Đánh giá các nghiên cứu trong và ngoài nước

Việc phát triển các hệ thống điều khiển cho hệ truyền động nhiều động cơ liên kết với nhau bởi băng tải đàn hồi đã được khảo sát trong nhiều nghiên cứu. Ưu nhược điểm của các phương pháp điều khiển được tóm tắt như sau: Bộ điều khiển PID đơn giản nhưng do mối quan hệ giữa lực căng và tốc độ gây hạn chế hiệu suất bộ điều khiển. Thiết kế bộ điều khiển bền vững có thể đảm bảo sự ổn định tốt với nhiễu. Tuy nhiên, giới hạn thay đổi các tham số vật lý chỉ trong phạm vi nhỏ. Phương pháp điều khiển tối ưu đa biến giảm các tác động chéo, nhưng đòi hỏi một mô hình chính xác và phải đo được các thông số. Các phương pháp điều khiển thông minh, như điều khiển logic mờ và mạng nơ-ron, thường tốn nhiều thời gian, khó thiết kế và hiện thực hóa. Các phương pháp điều khiển tiên tiến, chẳng hạn như điều khiển phản hồi dựa trên bộ quan sát và H $\infty$  quá phức tạp để thực hiện và không phổ biến trong công nghiệp.

Trong khuôn khổ của phép nội suy, việc sử dụng các điểm nút trên trục thực là hướng nghiên cứu triển vọng cho việc tổng hợp các hệ thống điều khiển đối tượng, được mô tả bằng các hàm truyền đạt có chứa các thành phần quán tính và siêu việt (1.1). Vì vậy, luận án đề xuất và thiết lập các cơ sở ứng dụng phương pháp nội suy thực tổng hợp hệ thống điều khiển cho hệ thống truyền động điện nhiều động cơ có chứa liên kết đàn hồi.

## 1.3. Xây dựng mô hình hệ truyền động điện nhiều động cơ có chứa phần tử liên kết đàn hồi

Với cấu trúc hệ truyền động trên hình 1.1, băng tải đàn hồi liên kết các động cơ của hệ có các tham số (khối lượng, độ đàn hồi, ...) phụ thuộc vào kích thước không gian của nó. Phần tử này có khối lượng và độ cứng phân bố đều. Trong thực tế, thay vì xác định sự biến thiên hàm đầu ra (lực căng, vận tốc dài) tại mọi điểm của băng tải theo thời gian, băng tải khảo sát được chuyển về hệ hai khối lượng ( $n = 2$ ), bao gồm: phần khối lượng băng tải liên kết với động cơ  $m_1$ , tập trung tại điểm có tọa độ  $x = x_1 = 0$  và phần băng tải có khối lượng  $m_2$ , tập trung tại điểm có tọa độ  $x = x_2$ . Tọa độ đầu ra chính là vị trí băng tải có tọa độ  $x_2$  và khối lượng  $m_2$ .



**Hình 1.2.** Mô hình khảo sát băng tải đàn hồi dạng vòng kín

$$W_{dt}(s) = W(x_2, 0, s) = \frac{V_\lambda(x_2, s)}{F_d(0, s)} = \frac{q.sh(s)ch(\lambda s)}{sh^2 s + \mu_1 \mu_2 s^2 (ch^2 s - ch^2 \lambda s) + (\mu_1 + \mu_2)s.sh2s}, \quad (1.2)$$

với,  $\mu_1 = \eta_1 / l = m_1 / m_k$ ,  $\mu_2 = \eta_2 / l = m_2 / m_k$ ,  $m_k = \rho l$  - khối lượng toàn băng tải;  $q = 1 / 2a$  - hệ số truyền của phần tử đàn hồi, còn  $\lambda = 1 - 2x_2 / l$  - tọa độ không gian đầu ra của hệ, còn hàm truyền đạt liên hệ giữa lực trên tang quán chủ động ( $F_d(0, s)$ ) tại  $x_1 = 0$  và vận tốc của nó  $V_d(0, s)$  tại  $x_2 = 0$  sẽ có dạng:

$$W_{dt}^*(s) = W(0, 0, s) = \frac{V_d(0, s)}{F_d(0, s)} = \frac{q[sh2s + s\mu_2(ch^2 s - ch^2 \lambda s)]}{[sh^2 s + (\mu_1 + \mu_2)s.sh2s + \mu_1 \mu_2 s^2 (ch^2 s - ch^2 \lambda s)]} \quad (1.3)$$

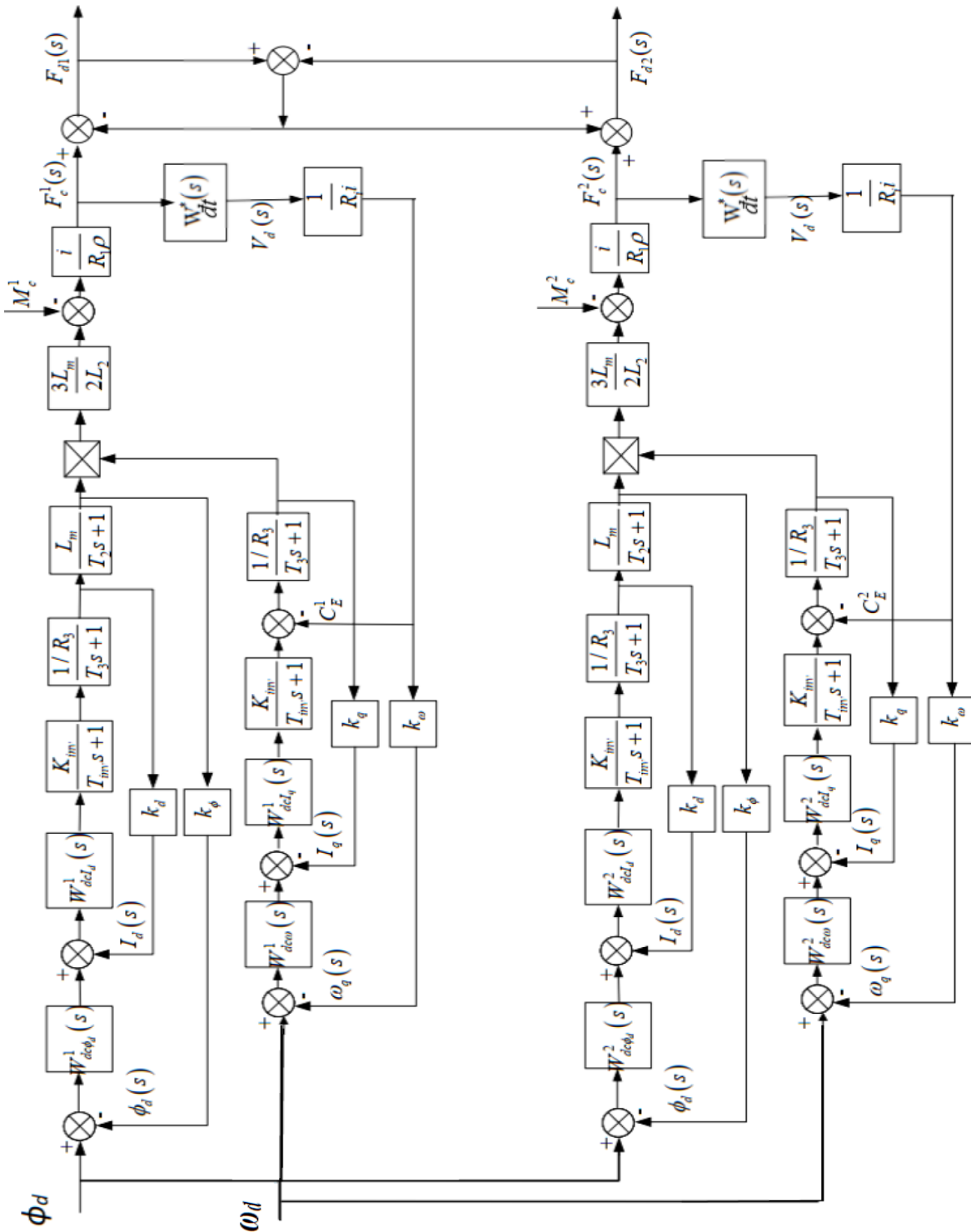
Dựa trên sơ đồ cấu trúc động cơ điện không đồng bộ trong hệ tọa độ quay ( $d, q$ ) định hướng theo véc tơ từ thông tổng của roto, sơ đồ cấu trúc tổng quát của hệ truyền động điện hai động cơ không đồng bộ, có tính đến ảnh hưởng của băng tải đàn hồi (1.3) được đưa vào mạch hồi tiếp của vòng điều khiển tốc độ sẽ có dạng như trên hình 1.3. Trong đó, hệ thống điều khiển cho mỗi động cơ độc lập nhau gồm hai vòng điều khiển: từ thông và tốc độ, còn vận tốc dài của băng tải được lấy ra tại đầu trục động cơ sẽ được đưa vào mạch hồi tiếp của vòng lặp tốc độ.

#### 1.4. Thiết lập vấn đề nghiên cứu

Luận án sẽ đề xuất và thiết lập các cơ sở ứng dụng phương pháp nội suy thực tính toán và hiệu chỉnh tham số bộ điều chỉnh cho hệ truyền động điện có cấu trúc như trên hình 1.3, với các nội dung chính:

1. Phân tích, đánh giá ưu nhược điểm của các phương pháp điều khiển và xây dựng mô hình hệ truyền động điện nhiều động cơ có liên kết đàn hồi.
2. Đề xuất và hiện thực hóa trên máy tính thuật toán ước lượng hàm truyền đạt mô tả băng tải đàn hồi bằng phương pháp nội suy thực.
3. Tổng hợp các vòng điều khiển cho hệ truyền động điện tự động nhiều động cơ có chứa băng tải đàn hồi trên cơ sở ứng dụng phương pháp nội suy thực. Mô phỏng, đánh giá hệ thống sau tổng hợp trên máy tính

4. Tính toán, xây dựng mô hình thực nghiệm hệ truyền động điện hai động cơ chủ động liên thuộc nhau bởi băng tải đàn hồi dạng vòng kín.



Hình 1.3. Sơ đồ cấu trúc hệ truyền động điện hai động cơ không đồng bộ có tính đến ảnh hưởng của băng tải đàn hồi được vào vòng tốc độ

### 1.5. Kết luận chương 1

Chương 1 đã phân tích tổng quan vấn đề điều khiển các đối tượng có tham số phân bố. Mô hình hóa băng tải đàn hồi, đề xuất cấu trúc hệ truyền động điện có tính đến ảnh hưởng của băng tải đàn hồi và đánh giá ưu nhược điểm của các phương pháp khác nhau điều khiển lớp đối tượng này. Từ đó, đề xuất phương pháp nội suy thực là phương pháp cơ bản tổng hợp các hệ thống điều khiển có tham số phân bố.



## Chương 2

### ƯỚC LƯỢNG HÀM TRUYỀN ĐẠT MÔ TẢ CÁC ĐỐI TƯỢNG CÓ THAM SỐ PHÂN BỐ

Như đã phân tích trong mục 1.3, việc khảo sát bằng tải đàn hồi tại các tọa độ không gian cố định đưa đến hàm truyền đạt mô tả nó có chứa các thành phần quán tính và siêu việt (1.2), (1.3). Thông thường, để tổng hợp hệ thống như vậy, người ta thực hiện xấp xỉ hàm truyền đạt gốc (1.2), (1.3) bằng các phân thức hữu tỷ biểu diễn hệ tuyến tính. Việc này làm tăng sai số tính toán và mất đi các tính chất đặc trưng của hệ thống có tham số phân bố, nhưng cho phép ứng dụng các cơ sở lý thuyết cho hệ tuyến tính đã được nghiên cứu toàn diện.

Các phương pháp ước lượng hàm truyền đạt (1.2), (1.3), được xem xét trong nhiều nghiên cứu, chẳng hạn: xấp xỉ hóa sử dụng các đa thức Chebyshev hay các đa thức Bessel. Phương pháp ước lượng phổ biến là ứng dụng các chuỗi hội tụ và xấp xỉ Pade. Tuy nhiên, việc phân tích hàm (1.2), (1.3) thành các chuỗi gặp nhiều khó khăn do sự phức tạp của nó, đồng thời làm tăng sai số ước lượng. Phương pháp tần số có những hạn chế nhất định liên quan đến việc chuyển hàm ban đầu (1.2), (1.3) ở dạng phức về dạng có đối số thực. Vì vậy, chương này sẽ xây dựng thuật toán ước lượng hàm truyền đạt (1.2), (1.3) dựa trên cơ sở của phương pháp nội suy thực nhằm khắc phục những hạn chế kể trên.

#### 2.1. Phương pháp nội suy thực (Real Interpolation Method - RIM)

Phương pháp nội suy thực có liên quan đến lớp các phương pháp thao tác trong miền ảnh, được hình thành dựa trên phép biến đổi tích phân thực:

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-\delta t} dt, \quad (2.1)$$

là trường hợp riêng của phép biến đổi Laplace khi biến phức  $s$  bị suy biến thành thuần thực  $s = \delta$  (phần ảo bằng không  $\omega = 0$ ). Khi hàm  $f(t)$  là đặc trưng quá độ xung  $f(t) = k(t)$ , thì tích phân (2.1) chính là hàm truyền thực ( $F(\delta) = W(\delta)$ ).

Để nhận được các mô hình số tương ứng với hàm liên tục ban đầu, người ta cho các điểm nút nội suy  $\delta_i (i = 1, 2, \dots, \eta)$  và tìm giá trị  $F(\delta_i)$  của hàm thực  $F(\delta)$  tương ứng. Cuối cùng, chúng ta nhận được tập giá trị  $\{F(\delta_i)\}_\eta = \{F(\delta_1), F(\delta_2), \dots, F(\delta_\eta)\}$ , được gọi là đặc trưng số của hàm  $F(\delta)$ . Trong đó, số các phần tử  $\eta$  đóng vai trò là độ dài của đặc trưng số  $\{F(\delta_i)\}_\eta$ .

## 2.2. Cơ sở ước lượng hàm truyền đạt mô tả các đối tượng có tham số phân bố bằng phương pháp nội suy thực

Bài toán đặt ra là cần tìm một biểu thức dạng phân thức hữu tỷ:

$$W_e(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + 1}, \quad (2.2)$$

có tham số cấu trúc  $m, n$  và các hệ số  $a_i, b_j (i = \overline{1, n}; j = \overline{0, m})$ , xấp xỉ với hàm gốc (1.2) hoặc (1.3) bởi sai số  $(\Delta)$  nào đó, được xác định theo tiêu chuẩn cho trước. Để ước lượng các hàm (1.2), (1.3) bằng phương pháp nội suy thực, trước tiên cần thực hiện chuyển các hàm  $W_e(s), W_{dt}(s)$  về dạng có đối số thực  $\delta$ , sau đó xác định đặc trưng số  $\{W_e(\delta_i)\}_\eta, \{W_{dt}(\delta_i)\}_\eta$  của các hàm thực  $W_e(\delta), W_{dt}(\delta)$  tương ứng. Cuối cùng thiết lập và giải hệ phương trình có chứa các hệ số cần tìm  $a_i, b_j (i = \overline{1, n}; j = \overline{0, m})$  của hàm  $W_e(\delta)$ :

$$\{W_e(\delta_i)\}_\eta = \{W_{dt}(\delta_i)\}_\eta; \delta_i, i = \overline{1, \eta}, \eta = m + n + 1. \quad (2.3)$$

Lưu ý rằng, khoảng phân bố các điểm nút nội suy  $[\delta_1, \delta_\eta]$  thường được chọn từ điều kiện:

$$\begin{cases} \delta_1 \geq 0 \\ W_{dt}(\delta_\eta) = (0.1 \div 0.2) [W_{dt}(0) - W_{dt}(\infty)] + W_{dt}(\infty) \end{cases} \quad (2.4)$$

Ngoài ra, cần thiết lập quy luật phân bố điểm nút. Với phân bố đều, giá trị các điểm nút  $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$  được xác định theo công thức:

$$\delta_i = i \frac{\delta_\eta}{\eta}, i = \overline{1, \eta - 1}, \quad (2.5)$$

còn hệ số  $b_0$  có thể tìm được từ điều kiện:

$$b_0 = W_{dt}(0); b_0 = 10^{\frac{20 \cdot \lg(A(\omega)) + 20 \cdot \lg \omega}{20}}; A(\omega) = |W_{dt}(j\omega)|. \quad (2.6)$$

## 2.3. Đánh giá sai số ước lượng

Việc tính toán sai số ước lượng theo các đặc trưng trong miền thời gian được thực hiện thông qua sai lệch tuyệt đối cực đại:

$$\Delta h = \max_t |h_{dt}(t) - h_e(t)| \leq \Delta h_{CF}, \quad (2.7)$$

với  $\Delta h_{CF}$  - sai số cho phép. Tuy nhiên cách này không cho phép nhận được đặc trưng  $h_{dt}(t)$  từ hàm truyền đạt gốc  $W_{dt}(s)$ , do không tồn tại biến đổi Laplace ngược.

Để đánh giá sai số ước lượng trong miền tần số, trước tiên hàm  $W_{dt}(s)$  được chuyển thành  $W_{dt}(j\omega)$ , sau đó các phần thực  $P(\omega) = \text{Re}[W_{dt}(j\omega)]$  và ảo  $Q(\omega) = \text{Im}[W_{dt}(j\omega)]$  được tách riêng. Tuy nhiên, việc này không đơn giản với đối tượng có tham số phân bố và thường không thể nhận được lời giải chính xác do hàm  $L_{dt}(\omega)$  tồn tại cực trị tại các tần số nhất định.

Phương pháp nội suy thực cho phép thiết lập tiêu chuẩn đánh giá sai số xấp xỉ giữa  $W_{dt}(s)$  và  $W_e(s)$  thông qua các mô hình thực  $W_{dt}(\delta)$  và  $W_e(\delta)$ :

$$\Delta W = \max_{\delta; (m,n); \{\delta_i\}_\eta} |\Delta W(\delta)| = \max_{\delta; (m,n); \{\delta_i\}_\eta} |W_{dt}(\delta) - W_e(\delta)|, \delta \in [C, \infty), C \geq 0. \quad (2.8)$$

#### 2.4. Xác định mô hình xấp xỉ tối ưu

Có thể giảm sai số xấp xỉ (2.8) bằng cách lặp theo các tham số  $m, n$  và điểm nút  $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$  khác nhau. Trước hết, chúng ta cố định giá trị của tham số cấu trúc và coi hàm ước lượng nhận được với bộ điểm nút nào đó là lần lặp thứ nhất được ký hiệu bởi chỉ số (1):  $(m, n)^{(1)}, \{\delta_i\}_\eta^{(1)}, W_e^{(1)}(\delta), \Delta W^{(1)}(\delta), \Delta W^{(1)}$ .

$$\Delta W^{(1)} = \max_{\delta; (m,n)^{(1)}; \{\delta_i\}_\eta^{(1)}} |\Delta W^{(1)}(\delta)| = \max_{\delta; (m,n)^{(1)}; \{\delta_i\}_\eta^{(1)}} |W_{dt}(\delta) - W_e^{(1)}(\delta)|, \delta \in [C, \infty), C \geq 0 \quad (2.9)$$

Bước lặp thứ hai thực hiện tính toán các đại lượng tương ứng:  $W_e^{(2)}(\delta), \Delta W^{(2)}(\delta), \Delta W^{(2)}$  với bộ điểm nút mới  $\delta_i^{(2)}, i = \overline{1, \eta}$ . Việc chọn các điểm nút nội suy  $\{\delta_i^{(n)}\}_\eta$  ở lần lặp  $n$  phải đảm bảo giảm sai số ước lượng, có thể được xác định theo biểu thức:

$$\delta_i^{(n)} = i \frac{\delta_\eta^{(n)}}{\eta}, i = \overline{1, \eta - 1}; \delta_\eta^{(n)} = \delta_\eta^{(n-1)} \pm \frac{1}{n} \delta_\eta^{(n-1)}; n = 2, 3, \dots \quad (2.10)$$

Thuật toán lặp (2.10) được thực hiện với các tham số cấu trúc khác nhau:  $(m, n)^{(2)}, (m, n)^{(3)}, \dots$  cho đến khi nhận được mô hình ước lượng tối ưu  $W_e^{on}(s) (\Delta W \rightarrow \min)$ .

## 2.5. Nâng cao độ chính xác xấp xỉ dựa trên sự phân bố không đều các điểm nút nội suy

Do hàm sai lệch  $\Delta W(\delta) = W_{dt}(\delta) - W_e(\delta)$  tồn tại các cực trị khác nhau, nên có thể giảm sai số trên từng khoảng  $[\delta_i, \delta_{i+1}]$  nhờ các luật phân bố không đều điểm nút nội suy. Diễn hình là thiết lập giá trị các điểm nút  $\{\delta_i\}_\eta$  trùng với điểm không của các đa thức Chebyshev:

$$\delta_i = \frac{1+x_i}{1-x_i} a, i = \overline{1, \eta}, \quad (2.11)$$

với  $a$  - tham số thực nào đó được dùng để hiệu chỉnh sai số ước lượng, còn  $\{x_i\}_\eta$  là các điểm không của đa thức Chebyshev loại một bậc  $\eta$  ( $T_\eta(x) = 0$ ):

$$T_0(x) = 1; T_1(x) = x; T_2(x) = x^2 - \frac{1}{2}; \dots; T_{\eta+1}(x) = xT_\eta(x) - \frac{1}{4}T_{\eta-1}(x); x \in [-1, 1]. \quad (2.12)$$

Cách khác là thực hiện thay đổi đồng thời tất cả các điểm nút nội suy  $\{\delta_i\}_\eta$  nhằm giảm các sai lệch cực đại  $\max_{\delta \in [\delta_i, \delta_{i+1}]} |\Delta W(\delta)|$  trên từng khoảng  $[\delta_i, \delta_{i+1}]$  có tính đến sự tăng giá trị sai lệch ở khoảng khác, cho đến khi sai lệch  $\Delta W_i = \max_{\delta \in [\delta_{i-1}, \delta_i]} |W_{dt}(\delta) - W_e(\delta)|$  trên các khoảng  $\delta \in [\delta_{i-1}, \delta_i], i = \overline{1, \eta+1}$  sẽ bằng nhau hoặc hiệu của chúng nhỏ hơn đại lượng  $\varepsilon$  nào đó để nhận được mô hình ước lượng tối ưu  $W_e^{on}(\delta)$ :

$$\Delta_{ij} = |\Delta W_i - \Delta W_j| = \left| \max_{\delta \in [\delta_{i-1}, \delta_i]} |W_{dt}(\delta) - W_e^{on}(\delta)| - \max_{\delta \in [\delta_{j-1}, \delta_j]} |W_{dt}(\delta) - W_e^{on}(\delta)| \right| \leq \varepsilon; \forall i, j = \overline{1, \eta+1}; i \neq j \quad (2.13)$$

## 2.6. Xây dựng chương trình tự động ước lượng

Từ các phân tích trên đây, thủ tục ước lượng hàm truyền đạt (1.2), (1.3) bằng phương pháp nội suy thực sẽ bao gồm các bước:

*Bước 1.* Lựa chọn tham số cấu trúc  $m, n$  của hàm  $W_e(s)$  (2.1) và xác định số các hệ số cần tìm  $\eta = m + n + 1$ . Xác định  $b_0$  của hàm xấp xỉ  $W_e(s)$  theo (2.6).

*Bước 2.* Thiết lập các điểm nút nội suy  $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$  theo (2.5) hoặc (2.11).

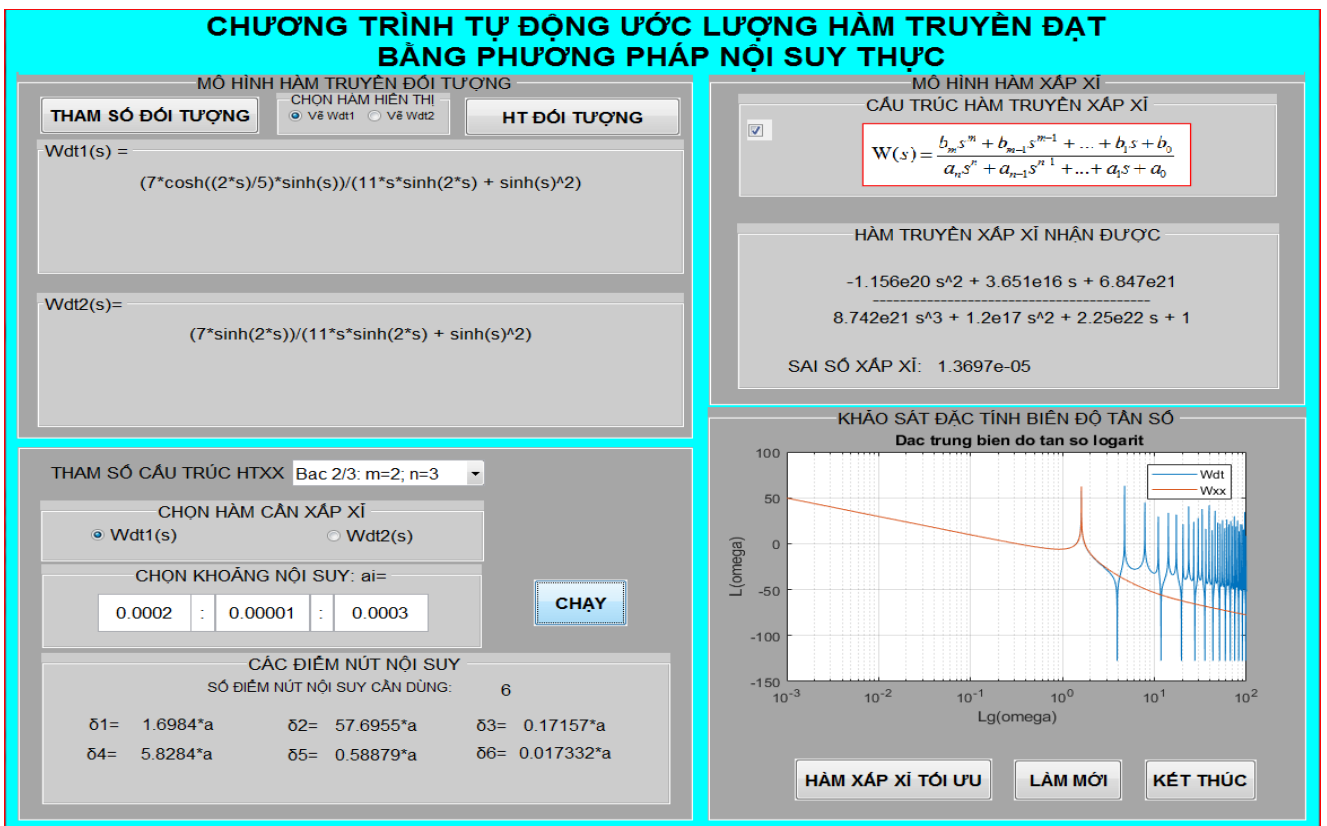
*Bước 3.* Xác định các đặc trưng số  $\{W_e(\delta_i)\}_\eta, \{W_{dt}(\delta_i)\}_\eta$  theo các điểm nút  $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$

và hàm thực  $W_e(\delta), W_{dt}(\delta)$  đã biết. Thiết lập và giải hệ phương trình (2.3).

*Bước 4.* Xác định sai số ước lượng theo (2.8).

*Bước 5.* Quay lại bước 2 với các điểm nút nội suy khác nhau hoặc bước 1 với các tham số cấu trúc khác nhau để nhận được mô hình xấp xỉ tối ưu theo (2.13).

Dưới đây chúng ta sẽ tìm mô hình xấp xỉ dạng (2.1) của hàm truyền đạt (1.2), (1.3) với các tham số cấu trúc  $m, n$  khác nhau. Giao diện chính của chương trình ước lượng như trên hình 2.1. Các kết quả ước lượng hàm truyền đạt (1.2), (1.3) với  $q=7, \lambda=0.4, \mu_1 = m_1 / m_k = 11, \mu_2 = m_2 / m_k = 0$ , theo các tham số cấu trúc  $m, n$  khác nhau được liệt kê trong bảng 2.1.



**Hình 2.1.** Giao diện chương trình tự động ước lượng hàm truyền đạt (1.2),(1.3)

**Bảng 2.1.** Kết quả xấp xỉ hàm truyền đạt (1.2), (1.3)

Tham số $(m, n)$	Mô hình xấp xỉ tối ưu $W_e^{on}(s)$ của hàm (1.23)	Sai số ước lượng $\Delta W$	Mô hình xấp xỉ tối ưu $W_e^{on}(s)$ của hàm (1.24)	Sai số ước lượng $\Delta W$

(0,1)	$\frac{1.251}{4.11s - 10^{-8}}$	0.0885	$\frac{2.042}{3.355s + 10^{-7}}$	$6.33 * 10^{-3}$
(1,1)	$\frac{-0.1786s + 1.874}{6.147s + 10^{-5}}$	$5.99 * 10^{-2}$	$\frac{6.514 * 10^{-3}s + 1.039}{1.707s + 10^{-8}}$	0.10977
(2,2)	$\frac{3.45361s^2 - 114.7s + 372.7}{0.6219s^2 + 1164s + 1}$	132.185	$\frac{3.077 * 10^{-2}s^2 + 0.8065s + 2.04}{1.325s^2 + 3.352s + 10^{-10}}$	$2.05 * 10^{-4}$
(2,3)	$\frac{-0.1156s^2 + 3.651 * 10^{-5}s + 6.847}{8.742s^3 + 1.2 * 10^{-5}s^2 + 22.5s + 10^{-21}}$	$1.37 * 10^{-5}$	$\frac{5.146s^2 + 3.083 * 10^{-3}s + 12.92}{8.14s^3 + 5.06 * 10^{-3}s^2 + 21.2s + 10^{-14}}$	$1.23 * 10^{-6}$

## 2.7. Kết luận chương 2

Chương 2 đã đề xuất và khảo sát một giải pháp mới, cho phép ước lượng hàm truyền mô tả bằng tải đàn hồi trong các hệ truyền động điện tự động nhiều động cơ ứng dụng phương pháp nội suy thực. Thuật toán và chương trình theo RIM đã được xây dựng để xấp xỉ hàm truyền gốc mô tả phần tử liên kết đàn hồi có chứa các thành phần quán tính và siêu việt (1.2), (1.3) bằng hàm truyền đạt dạng phân thức hữu tỉ. Bên cạnh việc đưa ra dạng hàm cụ thể, chương trình còn tính sai số ước lượng với các hàm truyền đạt xấp xỉ khác nhau, từ đó cho phép xác định cấu trúc và tham số của mô hình ước lượng tối ưu.

### Chương 3

## CƠ SỞ TỔNG HỢP HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP NỘI SUY THỰC

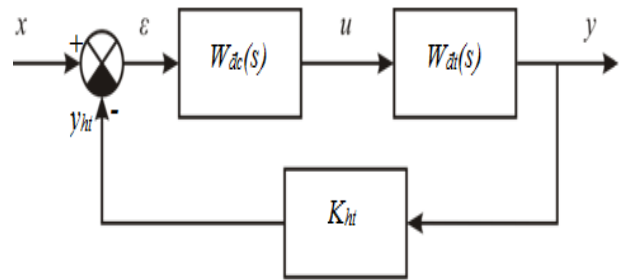
Chương này sẽ phân tích và thiết lập thuật toán tổng hợp bộ điều chỉnh đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng yêu cầu cũng như nâng cao độ chính xác tổng hợp ứng dụng phương pháp nội suy thực, cho phép thao tác trực tiếp với hàm truyền đạt của đối tượng mà không phải thực hiện công đoạn xấp xỉ hóa.

### 3.1. Thiết lập bài toán

Xét hệ thống điều khiển một vòng phản hồi âm như trên hình 3.1. Cần xác định hàm truyền của bộ điều chỉnh:

$$W_{đc}(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (m \leq n), \quad (3.1)$$

và hệ số hồi tiếp  $K_{ht}$  sao cho hệ thống thỏa mãn điều kiện:



**Hình 3.1:** Sơ đồ hệ thống điều khiển tự động một vòng lặp

$$\begin{cases} \sigma_{yc} - \Delta\sigma \leq \sigma_{th} \leq \sigma_{yc} + \Delta\sigma \\ t_{qd}^{th} \leq t_{qd}^{yc} \end{cases}, \quad (3.2)$$

hoặc:

$$\begin{cases} \sigma_{yc} - \Delta\sigma \leq \sigma_{th} \leq \sigma_{yc} + \Delta\sigma \\ t_{qd}^{th} \rightarrow t_{qd}^{\min} \end{cases}, \quad (3.3)$$

với,  $\sigma_{yc}$  - độ quá chỉnh yêu cầu của hệ;  $\sigma_{th}$  - độ quá chỉnh của hệ được tổng hợp;  $\Delta\sigma$  - sai lệch độ quá chỉnh cho phép giữa hệ thống mong muốn và tổng hợp;  $t_{qd}^{yc}$  - thời gian quá độ yêu cầu của hệ mong muốn;  $t_{qd}^{th}$  - thời gian quá độ của hệ được tổng hợp;  $t_{qd}^{\min}$  - thời gian quá độ nhỏ nhất có thể đạt được của hệ được tổng hợp. Trong thực tế, khi không tồn tại bộ điều chỉnh (3.1) để hệ thống thỏa mãn điều kiện chặt (3.2), thì chuyển đến điều kiện (3.3), trong đó độ quá chỉnh tuân theo giới hạn chặt còn thời gian quá độ là nhỏ nhất (giá trị này vẫn lớn hơn giá trị yêu cầu  $t_{qd}^{\min} > t_{qd}^{yc}$ ). Việc chuyển từ điều kiện (3.2) sang (3.3) nhằm đảm bảo bài toán tổng hợp luôn có lời giải mà vẫn không mất đi tính tổng quát.

### 3.2. Thuật toán tổng hợp bộ điều chỉnh

Thủ tục tìm bộ điều chỉnh bằng phương pháp nội suy thực bao gồm các bước:

- *Bước 1:* Lựa chọn cấu trúc bộ điều chỉnh và thiết lập phương trình tổng hợp dựa

trên sơ đồ cấu trúc trên hình 3.1:

$$W_{dc}(s) \cong \frac{W_{mm}^k(s)}{W_{dt}(s) - W_{dt}(s)W_{mm}^k(s)K_{ht}}. \quad (3.4)$$

- *Bước 2*: Xác định hệ số hồi tiếp  $K_{ht}$  và hàm truyền mong muốn  $W_{mm}^k(s)$ . Thực tế, đại lượng  $K_{ht}$  có thể tìm được dựa trên phương trình tĩnh của hệ thống và điều kiện hệ số truyền mạch hở ( $K_p$ ) phải dương:

$$K_p = \frac{y_t - \Delta y}{x_v - K_{ht}(y_t - \Delta y)}; x_v - K_{ht}(y_t - \Delta y) > 0, \quad (3.5)$$

trong đó,  $x_v$  - tín hiệu đầu vào cho trước,  $y_t$  - đầu ra xác lập,  $\Delta y$  - sai số tĩnh, còn hàm truyền kín mong muốn  $W_{mm}^k(s)$  được xác định theo biểu thức:

$$W_{mm}^k(s) = \frac{\frac{\alpha_1 s + 1}{2} H_\infty}{\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + 1}; \alpha_0 = \frac{[\ln(\frac{H_{\max}}{H_\infty} - 1)]^2}{\frac{9}{t_{qd}^{yc}} \{[\ln(\frac{H_{\max}}{H_\infty} - 1)] + \pi^2\}}; \alpha_1 = \frac{6\alpha_0}{t_{qd}^{yc}}, \quad (3.6)$$

với:  $H_\infty$  - tín hiệu đầu ra xác lập;  $H_{\max}$  - giá trị cực đại của đặc trưng quá độ.

- *Bước 3*: Chuyển phương trình (3.4) về dạng thực:

$$W_{dc}(\delta) \cong \frac{W_{mm}^k(\delta)}{W_{dt}(\delta) - W_{dt}(\delta)W_{mm}^k(\delta)K_{ht}}, \quad (3.7)$$

và xác định các đặc trưng số  $\{W_{mm}^k(\delta_i)\}_\eta; \{W_{dt}(\delta_i)\}_\eta; \{W_{dc}(\delta_i)\}_\eta$  với bộ điểm nút  $\{\delta_i\}_\eta: \delta_i = i\delta_\eta / \eta (i = \overline{1, \eta})$ .

- *Bước 4*: Thiết lập và giải hệ phương trình:

$$W_{dc}(\delta_i) = \frac{b_m \delta_i^m + b_{m-1} \delta_i^{m-1} + \dots + b_1 \delta_i + b_0}{a_n \delta_i^n + a_{n-1} \delta_i^{n-1} + \dots + a_1 \delta_i + 1} = \frac{W_{mm}^k(\delta_i)}{W_{dt}(\delta_i) - W_{dt}(\delta_i)W_{mm}^k(\delta_i)K_{ht}}; i = \overline{1, \eta} \quad (3.8)$$

để xác định các hệ số cần tìm  $(a_i, b_j)$  của bộ điều chỉnh (3.1).

- *Bước 5*: Xác định các chỉ tiêu chất lượng  $(\sigma_{th}, t_{qd}^{th})$  của hệ thống với bộ điều chỉnh vừa nhận được và so sánh với các chỉ tiêu yêu cầu  $(\sigma_{yc}, t_{qd}^{yc})$ . Trong trường hợp các chỉ tiêu này không thỏa mãn điều kiện (3.2) hoặc (3.3), chúng ta cần thiết lập các bộ điểm nút nội suy mới  $(\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta, i = 1 \div \eta: \delta_i^{(k)}$  - bộ điểm nút ở lần lặp thứ  $k$ ;  $\delta_i^{(k+1)}$  - bộ điểm nút ở lần lặp thứ  $k+1$ ;  $\Delta\delta$  - số gia của đối số thực  $\delta$ ) và lặp lại các bước tính toán trên cho đến khi hệ thống sau tổng hợp có chỉ tiêu chất lượng thỏa mãn các yêu cầu đặt ra.



### 3.3. Hiệu chuẩn độ quá chỉnh của hệ thống sau tổng hợp

Nếu việc lặp theo điểm nút nội suy vẫn chưa đưa đến lời giải cần tìm (tức hệ thống không thỏa mãn điều kiện (3.2) hoặc (3.3)) thì cần tiến hành hiệu chỉnh theo các biến công cụ khác như: độ quá chỉnh và thời gian quá độ yêu cầu, hoặc đưa vào các hàm trọng lượng đặc biệt.

- Độ quá chỉnh và thời gian quá độ có mối quan hệ tương hỗ với nhau, tức là việc tăng/giảm chỉ tiêu này sẽ làm thay đổi chỉ tiêu còn lại. Vì vậy, để đạt được độ quá chỉnh  $\sigma_{th}$  đủ nhỏ cần tăng thời gian quá độ yêu cầu  $t_{qd}^{yc}$  và ngược lại.

- Một phương án hiệu chuẩn khác để hệ được tổng hợp có độ quá chỉnh  $\sigma_{th}$  thỏa mãn điều kiện (3.2) là thay đổi trước giá trị của độ quá chỉnh yêu cầu  $\sigma_{yc}$  trong lân cận của độ quá chỉnh đã cho. Khi  $\sigma_{th} > \sigma_{yc} + \Delta\sigma_{yc}$ , thì cần giảm giá trị của độ quá chỉnh mong muốn  $\sigma_{yc}$  đến đại lượng  $\sigma_{yc\_min}$ , còn ngược lại  $\sigma_{th} < \sigma_{yc} - \Delta\sigma_{yc}$ , cần tăng giá trị mong muốn  $\sigma_{yc}$  đến đại lượng  $\sigma_{yc\_max}$ .

- Một cách khác để hiệu chuẩn độ quá chỉnh của hệ được tổng hợp là thay thế nhân tử  $e^{-\delta t}$  trong tích phân thực (2.1) bằng các hàm trọng lượng dạng đặc biệt  $w(t)$ , chẳng hạn:  $w(t) = e^{-\delta t}(1 - e^{-\delta t})$ . Phương pháp này cho phép đạt được độ quá chỉnh yêu cầu mà không phụ thuộc vào việc phải thay đổi các thông tin ban đầu  $\sigma_{yc}, t_{qd}^{yc}$ . Tuy nhiên, việc dùng hàm trọng lượng như vậy không cho phép chuyển đổi qua lại giữa biến đổi tích phân thực (2.1) và biến đổi Laplace. Ngoài ra, không có quy tắc chung để thiết lập các hàm trọng lượng này, mà nó được xác định theo từng bài toán cụ thể và chủ yếu dựa vào kinh nghiệm của người thiết kế. Ở đây, hàm  $w(t) = e^{-\delta t}(1 - e^{-\delta t})$  được thiết lập sao cho đồ thị hàm quá độ của hệ mong muốn  $h_{mm}^k(t)$  và  $w(t)$  đồng dạng với nhau, còn điểm nút nội suy  $\delta_i$  được xác định từ điều kiện: thời điểm đạt giá trị cực đại của các hàm  $h_{mm}^k(t)$  và  $w(t)$  trùng nhau. Vì vậy, cách thức này chỉ được sử dụng trong những trường hợp riêng.

### 3.4. Tổng hợp các hệ thống điều khiển tự động nhiều vòng

Các hệ thống cơ điện tử thường gồm một số vòng điều khiển lồng nhau như chỉ ra trên hình 3.2, có phương trình tổng hợp tổng quát:

$$W_{mm}^k(s) \cong F[W_1(s), \dots, W_k(s), K_1, \dots, K_k, W_1^{KD}(s), \dots, W_k^{KD}(s)], \quad (3.9)$$

chứa hàm truyền mong muốn của hệ kín  $W_{mm}^k(s)$ ,  $k$  bộ điều chỉnh,  $k$  hệ số hồi tiếp  $W_i(s), K_i; i = \overline{1, k}$  và các hàm truyền của phần không đổi  $W_i^{KD}(s)$  có chứa đối tượng điều khiển  $W_{dt}(s)$ . Việc tổng hợp các hệ thống như vậy bằng phương pháp nội suy thực thường được thực hiện theo hai cách:

1. *Tổng hợp lần lượt từng vòng điều khiển*, được thực hiện tuần tự cho từng vòng

lập từ trong ra ngoài theo thuật toán đã chỉ ra trong mục 3.2. Theo cách này, cần giải quyết hai vấn đề:

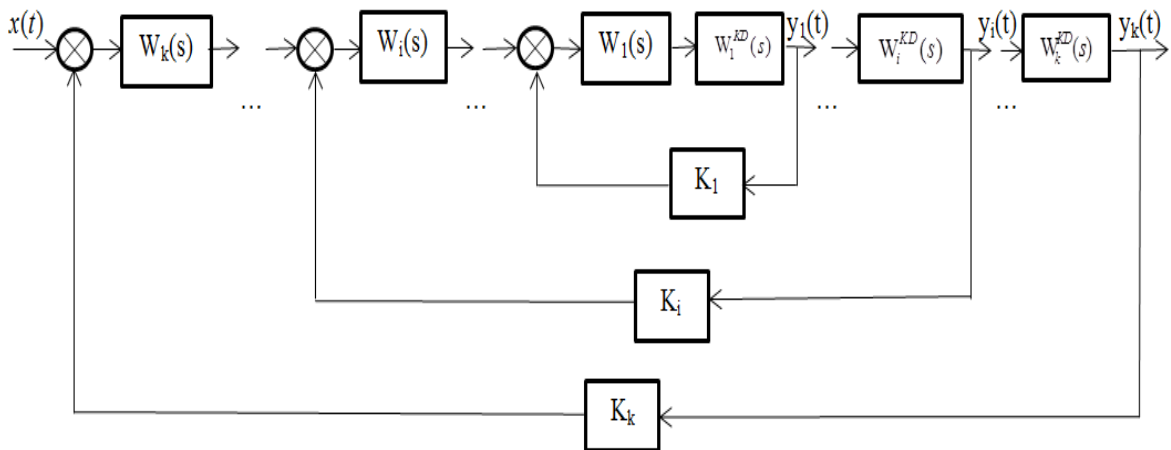
*Thứ nhất*, xác định hàm truyền đạt của phần không đổi  $W_i^{KD}(s), i = \overline{1, k}$ , có liên hệ với đối tượng điều khiển  $W_{dt}(s)$ . Để xác định chúng, trước hết các liên kết phản hồi được mở ra, các hệ số phản hồi  $K_i, i = \overline{1, k}$  không được tính đến còn các bộ điều chỉnh bằng 1 ( $W_i(s) = 1, i = \overline{1, k}$ ). Sau đó, đặt lên hệ thống tín hiệu hình thang  $x(t)$  và xác định tín hiệu đầu ra tương ứng ( $y_i(t), i = \overline{1, k}$ ). Khi này, hàm truyền thực được xác định theo các dữ liệu nhận được:

$$W_{dt}(\delta) = W_{y_k x}(\delta); W_1^{KD}(\delta) = W_{y_1 x}(\delta); W_i^{KD}(\delta) = \frac{W_{y_i x}(\delta)}{W_{y_{i-1} x}(\delta)}, i = \overline{2, k} \quad (3.10)$$

*Thứ hai*, xác định hàm truyền tham chiếu  $W_i^M(s)$  theo các chỉ tiêu yêu cầu ( $\sigma_{yc}^i, t_{qd}^i$ ) của vòng lặp thứ  $i$ . Thời gian quá độ yêu cầu  $t_{qd}^i$  được xác định theo hằng số thời gian đã biết  $T_i$  của phần không đổi tương ứng  $W_i^{KD}(s)$ :

$$t_{qd}^i = 3 \cdot d \cdot T_i; d = 0,5 \div 10, \quad (3.11)$$

còn độ quá chỉnh yêu cầu  $\sigma_{yc}^i$  được coi là một tham số hiệu chỉnh. Lưu ý rằng, khi giải phương trình (3.9), các hệ số hồi tiếp của mỗi vòng lặp  $K_i$  có thể nhận giá trị  $K_i = 1/H_i$ , còn các điểm nút  $\delta$  phân bố đều, điểm nút đầu tiên có thể được xác định bằng biểu thức:  $\delta_1 = 3,5/t_{qd}^i$ . Ưu điểm của cách tổng hợp này là có thể kiểm soát tốt chất lượng làm việc của từng vòng, nhưng việc hiệu chỉnh phải được thực hiện tuần tự và vì vậy khối lượng tính toán lớn.



**Hình 3.2.** Sơ đồ cấu trúc tổng quát của hệ thống điều khiển nhiều vòng

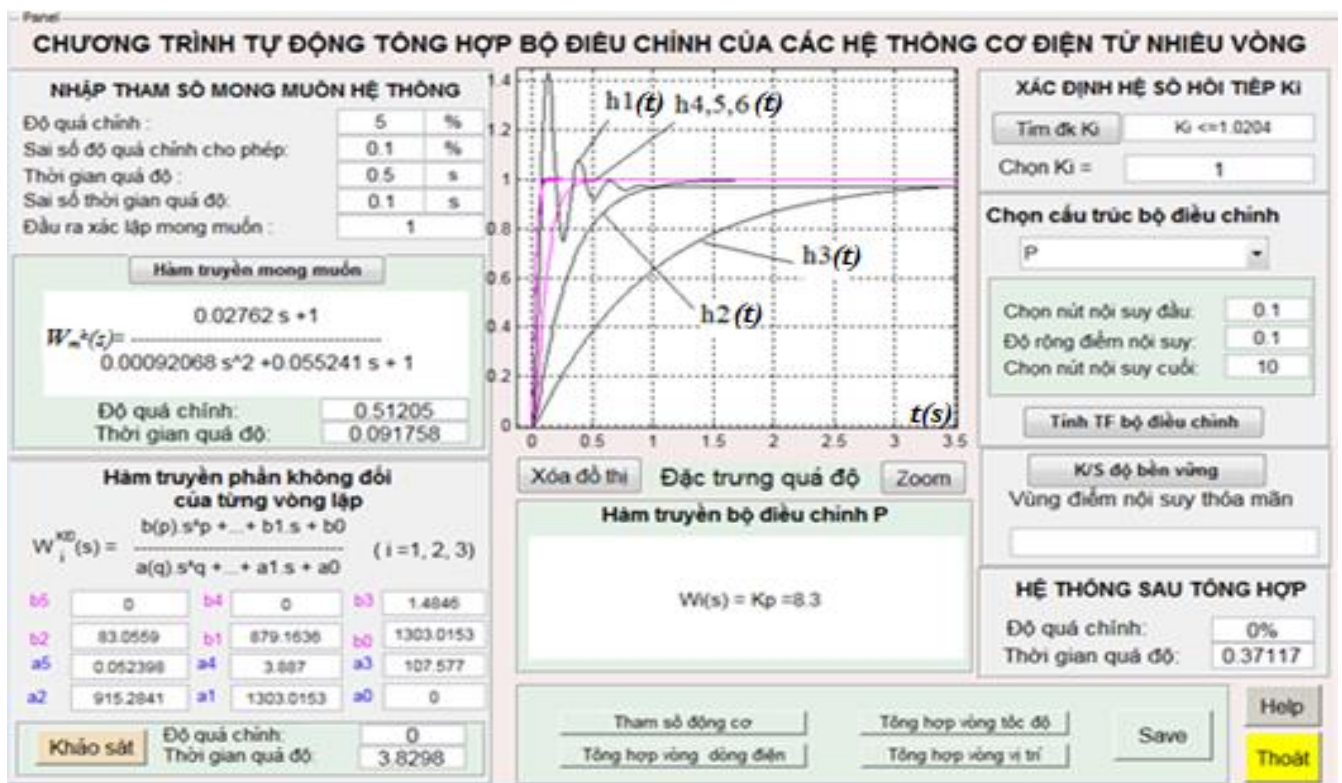
( $W_i^{KD}(s)$  – hàm truyền của phần không đổi ở vòng lặp thứ  $i$  ( $i = \overline{1, k}$ ,  $k$  – số vòng lặp của hệ thống);  $W_i(s), K_i$  – tương ứng là hàm truyền của bộ điều chỉnh và hệ số phản hồi trong vòng lặp thứ  $i$ ;  $x(t)$  – tín

hiệu vào của vòng lặp ngoài cùng;  $y_i(t)$  - tín hiệu ra của vòng lặp thứ  $i$ )

2. *Tổng hợp đồng thời các vòng điều khiển*, cho phép nhận được cùng lúc bộ điều chỉnh của tất cả các vòng lặp bằng việc giải phương trình tổng hợp (6), được thiết lập cho cả hệ thống. Cách này sẽ không cần phải xác định hàm truyền mong muốn  $W_i^M(s)$  và phần không đổi  $W_i^{KD}(s)$  của từng vòng lặp  $i = \overline{1, k}$ , nhưng có khối lượng tính toán lớn. Nó không cho phép kiểm soát chất lượng của từng vòng lặp và xuất hiện các hệ số phi tuyến. Vì vậy phương án này chỉ được sử dụng trong những trường hợp cụ thể.

### 3.5. Hiện thực hóa chương trình tổng hợp trên máy tính

Dựa trên thuật toán tổng hợp bộ điều chỉnh bằng phương pháp nội suy thực đã dẫn ra trong mục 3.2, một chương trình được xây dựng có giao diện chính như trên hình 3.3, tự động tổng hợp hệ truyền động ba vòng điều khiển: dòng, tốc độ và góc quay, sử dụng động cơ một chiều kích từ độc lập và bộ biến đổi có các tham số được cho trong bảng 3.1. Tham số các bộ điều chỉnh của từng vòng lặp được liệt kê trong bảng 3.2, còn các quá trình quá độ của hệ sau tổng hợp được chỉ ra trên hình 3.4.



**Hình 3.3.** Giao diện chương trình tổng hợp bộ điều chỉnh của hệ truyền động điện

**Bảng 3.1:** Các tham số của động cơ và bộ biến đổi

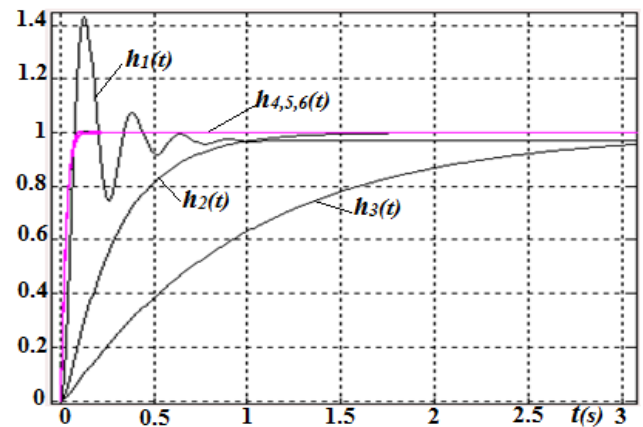
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
Công suất định mức	$P = 200(W)$	Mô men quán tính động cơ	$J = 0.08(kg.m^2)$
Điện áp phản ứng định mức	$U_a = 110(V)$	Hằng số thực nghiệm	$C_x = 0.4$

Điện áp kích từ định mức	$U_f = 110(V)$	Bộ biến đổi	
Tốc độ định mức	$n = 3000(v/p)$	Điện áp ra định mức	$U_{dm} = 230(V)$
Dòng điện phản ứng định mức	$I_a = 2.46(A)$	Điện áp điều khiển	$U_{dk} = 10(V)$
Điện trở cuộn dây phản ứng	$R_a = 0.726(\Omega)$	Tần số chuyển mạch	$f = 500(Hz)$
Điện trở cuộn dây kích từ	$R_f = 560(\Omega)$	Điện trở tương đương mạch lực	$R_{bd} = 0.06(\Omega)$

Kết quả tính toán nhận được thời gian quá độ và độ quá chỉnh trong từng vòng: dòng điện:  $t_{qd}^{th} = 0,01(s), \sigma_{th} = 12,9\%$ ; tốc độ:  $t_{qd}^{th} = 0,041(s), \sigma_{th} = 10,2\%$ ; góc quay:  $t_{qd}^{th} = 0,1(s), \sigma_{yc} = 0\%$ . Như vậy, các bộ điều chỉnh nhận được đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng yêu cầu của hệ thống. Điều này cho thấy hiệu quả của thuật toán tổng hợp dựa trên phương pháp nội suy thực.

Bảng 3.2: Tham số các bộ điều chỉnh

Vòng dòng điện	Vòng tốc độ	Vòng vị trí
$K_p = 0.74245$	$K_p = 11.1517$	$K_p = 8.3$
$K_i = 1.1402$	$K_i = 0$	$K_i = 0$
$K_d = 0.0552$	$K_d = 0.26241$	$K_d = 0$
$K_1 = 1$	$K_2 = 1$	$K_3 = 1$



Hình 3.4. Các quá trình quá độ của hệ thống trước (1,2,3) và sau tổng hợp (4,5,6)

### 3.6. Kết luận chương 3

Chương 3 đã thiết lập thuật toán tổng hợp bộ điều chỉnh theo phương pháp nội suy thực. Khảo sát các cách hiệu chỉnh tham số bộ điều chỉnh sao cho hệ thống được tổng hợp đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng cho trước. Xây dựng chương trình tự động tổng hợp cho một hệ thống cụ thể, kiểm chứng tính đúng đắn của thuật toán đã đề xuất.

## Chương 4

# XÂY DỰNG HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN HAI ĐỘNG CƠ CÓ CHỨA BĂNG TẢI ĐÀN HỒI DẠNG VÒNG KÍN

### 4.1. Tổng hợp hệ thống điều khiển

Dưới đây, chúng ta sẽ xác định các bộ điều chỉnh cho từng vòng lặp của hệ thống trên hình 1.3 theo thuật toán “tổng hợp lần lượt từng vòng” đã thiết lập trong chương 3.

#### 4.1.1. Tổng hợp vòng điều khiển từ thông

Vòng điều khiển từ thông gồm vòng lặp dòng điện và từ thông:

1. Vòng lặp dòng điện có phương trình tổng hợp dạng:

$$W_{m_d}^k(s) \cong \frac{W_{dcl_d}^1(s) \cdot \frac{K_{inv}}{T_{inv}s+1} \cdot \frac{1/R_3}{T_3s+1}}{1 + k_d \cdot W_{dcl_d}^1(s) \cdot \frac{K_{inv}}{T_{inv}s+1} \cdot \frac{1/R_3}{T_3s+1}} \quad (4.1)$$

với:  $k_d$  - Hệ số hồi tiếp của vòng lặp dòng;  $W_{dcl_d}^1(s)$  - Bộ điều chỉnh dòng điện (Chỉ số “1” biểu diễn kênh điều khiển cho động cơ thứ nhất);  $W_{m_d}^k(s)$  - hàm truyền đạt mong muốn của vòng dòng điện.

Thực hiện giải phương trình tổng hợp (4.1) với các chỉ tiêu chất lượng mong muốn cho trước:  $\sigma_{yc} = 4\%$ ;  $t_{qd}^{yc} = 0.08(s)$ ;  $H_\infty = 1$ , khi dùng động cơ và biến tần có các tham số trong bảng 4.1, chúng ta nhận được bộ điều chỉnh dòng có dạng PI và các chỉ tiêu chất lượng được dẫn ra trong bảng 4.2:

$$W_{dcl_d}^1(s) = \frac{-0.044s + 11.87}{s} \quad (4.2)$$

Bảng 4.1. Các tham số của động cơ và biến tần

Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
Điện cảm tương đương của cuộn dây Stato ( $L_1$ )	0.3135(H)	$T_3 = \frac{\sigma L_1}{R_3}$	0.00429(s)
Điện cảm tương đương của cuộn dây Roto ( $L_2$ )	0.3178(H)	$R_3 = R_1 + R_2 \frac{L_m^2}{L_2^2}$	6.602( $\Omega$ )
Điện cảm tổng ( $L_m$ )	0.301(H)	Hệ số khuếch đại biến tần ( $K_{inv}$ )	31.1
Hệ số tản toàn phần ( $\sigma$ )	0.0903	Hằng số thời gian biến tần ( $T_{inv}$ )	$0.625 \cdot 10^{-4}(s)$
Điện trở của mạch Stato ( $R_1$ )		Điện áp ra định mức ( $U_{dm}$ )	230(V)

Điện trở quy đổi về Stato của mạch Roto ( $R_2'$ )		Điện áp điều khiển ( $U_{dk}$ ),	10(V)
$T_2 = 0.09287(s); z_p = 2; J_s = 0.033$		Tần số chuyển mạch ( $f$ )	500(Hz)

2. Vòng lặp từ thông chứa vòng lặp dòng có phương trình tổng hợp, được biểu diễn bằng hệ thức:

$$W_{m\phi_d}^k(s) \cong \frac{W_{dc\phi_d}^1(s)W_{vd}(s) \cdot \frac{L_m}{T_2s+1}}{1 + k_\phi \cdot W_{dc\phi_d}^1(s)W_{vd}(s) \cdot \frac{L_m}{T_2s+1}} \quad (4.3)$$

với:  $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ ;  $W_{dc\phi_d}^1(s)$ - bộ điều chỉnh từ thông, còn hàm truyền đạt của vòng lặp dòng

$W_{vd}(s)$  với bộ điều chỉnh (4.2) được xác định theo biểu thức:

$$W_{vd}(s) = \frac{\frac{-0.044s + 11.87}{s} \cdot \frac{31.1}{0.625 \cdot 10^{-4}s + 1} \cdot \frac{0.15}{4.29 \cdot 10^{-3}s + 1}}{1 + \frac{-0.044s + 11.87}{s} \cdot \frac{31.1}{0.625 \cdot 10^{-4}s + 1} \cdot \frac{0.15}{4.29 \cdot 10^{-3}s + 1}} \quad (4.4)$$

với các tham số yêu cầu cho trước:  $\sigma_{yc} = 4\%$ ;  $t_{qd}^{yc} = 0.15(s)$ ;  $H_\infty = 1$ , Thực hiện giải phương trình tổng hợp (4.4) theo cách như tổng hợp vòng dòng điện với: khoảng nội suy:  $\delta \in [0.1 - 2]$ ; bước nội suy:  $\Delta\delta = 0.1$ ; hệ số hồi tiếp:  $k_\phi = 1$ , chúng ta nhận được bộ điều chỉnh từ thông dạng PI:

$$W_{dc\phi_d}^1(s) = \frac{7.29s + 85.73}{s}, \quad (4.5)$$

và các chỉ tiêu chất lượng của hệ sau tổng hợp được liệt kê trong bảng 4.2.

#### 4.1.2. Tổng hợp vòng điều khiển tốc độ

Với sơ đồ cấu trúc trên hình 1.3, vòng điều khiển tốc độ có hai vòng lặp: dòng điện và tốc độ. Vòng lặp dòng được tổng hợp như trong kênh điều khiển từ thông. Trong mạch điều khiển tốc độ có mặt băng tải đàn hồi ( $W_{dt}^*(s)$ ). Khi:  $q = \frac{1}{2a} = 7$ ,  $\lambda = 1 - 2x_2 / l = 0,4$

,  $\mu_1 = \frac{m_1}{m_k} = 11$ ,  $\mu_2 = \frac{m_2}{m_k} = 0$ ,  $\rho = 1$ ;  $R = 1$ ;  $i = 4$ , hàm truyền đạt (1.3) sẽ có dạng:

$$W_{dt}^*(s) = \frac{14ch(s)}{sh(s) + 22s.ch(s)} \quad (4.6)$$

Dựa trên sơ đồ hình 1.3, chúng ta thiết lập được phương trình tổng hợp cho vòng tốc độ:

$$W_{m\omega}^k(s) \cong \frac{W_{dc\omega}^1(s).W_{vd}(s).\frac{3L_m}{2L_2}.\frac{i}{R_1\rho}W_{dt}^*(s).\frac{1}{iR_1}}{1+k_\omega.W_{dc\omega}^1(s)W_{vd}(s).\frac{3L_m}{2L_2}.\frac{i}{R_1\rho}W_{dt}^*(s).\frac{1}{iR_1}} \quad (4.7)$$

với:  $W_{m\omega}^k(s)$ - hàm truyền đạt mong muốn của vòng tốc độ;  $W_{dc\omega}^1(s)$ - hàm truyền đạt của bộ điều chỉnh tốc độ;  $W_{vd}(s)$ - hàm truyền đạt của vòng dòng có dạng (4.4);  $W_{m\omega}^k(s)$ - hàm truyền đạt mong muốn của vòng tốc độ, với các tham số yêu cầu cho trước:  $\sigma_{yc} = 4\%$ ;  $t_{qd}^{yc} = 0.5(s)$ ;  $H_\infty = 3$ , sẽ có dạng:

$$W_{m\omega}^k(s) = \frac{0.2265s + 3}{9.56 * 10^{-3} s^2 + 0.15s + 1} \quad (4.8)$$

Thực hiện giải phương trình tổng hợp (4.7) theo cách như tổng hợp vòng dòng điện với: khoảng nội suy:  $\delta \in [0.1 - 2]$ ; bước nội suy:  $\Delta\delta = 0.01$ ; hệ số hồi tiếp:  $k_\omega = 1$ , chúng ta nhận được bộ điều chỉnh tốc độ dạng PI:

$$W_{dc\omega}^1(s) = \frac{55.79s + 8.68}{s}, \quad (4.9)$$

và các chỉ tiêu chất lượng của hệ sau tổng hợp được liệt kê trong bảng 4.2.

**Bảng 4.2. Kết quả tổng hợp vòng điều khiển từ thông, tốc độ**

Vòng lập	Khoảng nội suy	Bộ điều chỉnh	Đánh giá chất lượng hệ thống					
			Tham số mong muốn			Tham số tổng hợp		
			$\sigma_{yc} \%$	$t_{qd}^{yc}(s)$	$H_\infty$	$\sigma_{th} \%$	$t_{qd}^{th}(s)$	$H_\infty$
Dòng điện	[0.1 - 2]	$\frac{-0.044s + 11.87}{s}$	4	0.08	1	1.48	0.036	1
Từ thông	[0.1 - 2]	$\frac{7.29s + 85.73}{s}$	4	0.15	1	3.4	0.15	1
Tốc độ	[0.1 - 2]	$\frac{55.79s + 8.68}{s}$	4	0.5	3	1	0.36	3

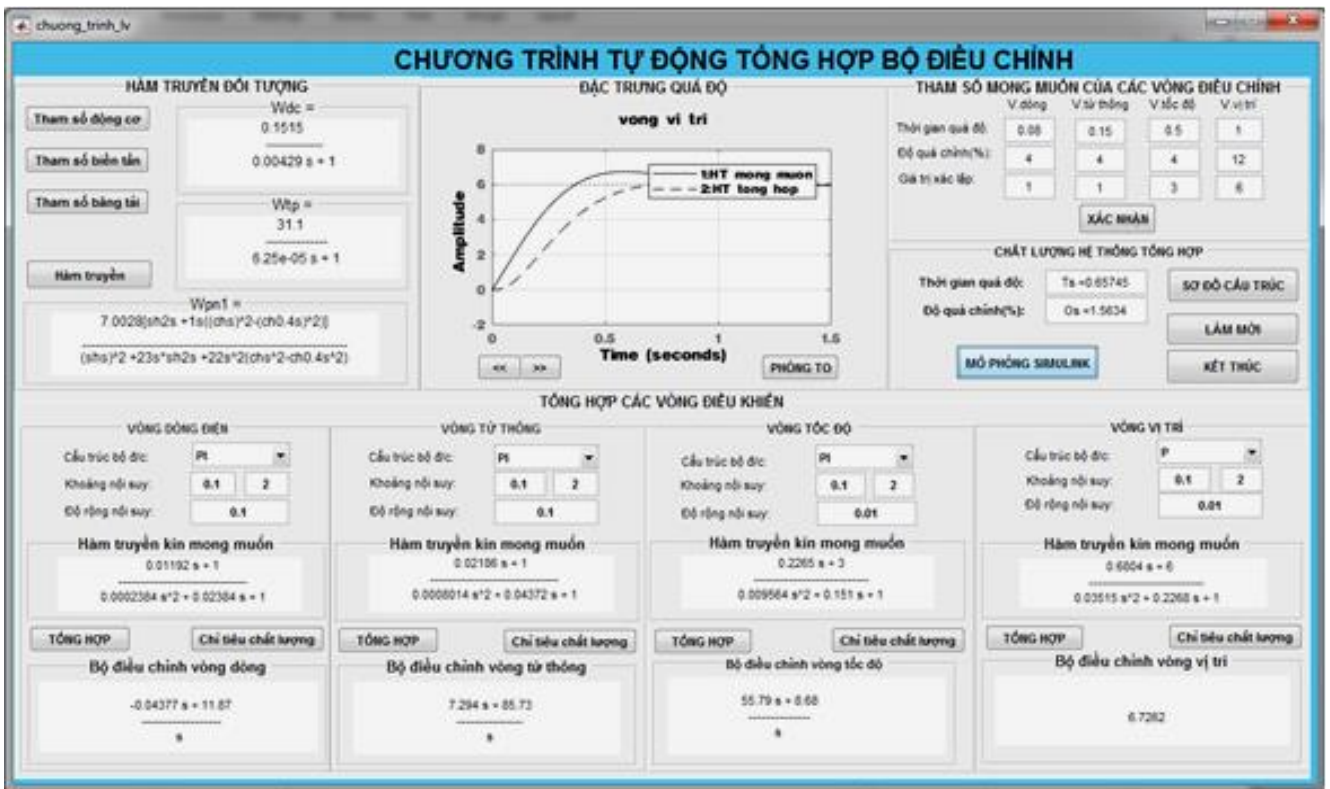
#### 4.2. Mô phỏng, đánh giá hệ thống điều khiển sau tổng hợp

Chương trình tự động tổng hợp các bộ điều chỉnh cho hệ truyền động điện hai động cơ chủ động có chứa băng tải đàn hồi (hình 1.3), có giao diện như trên hình 4.1. Để thực hiện đánh giá các chỉ tiêu chất lượng của hệ thống sau tổng hợp, chúng ta sử dụng một trong những mô hình xấp xỉ của hàm (1.3) nhận được theo thuật toán đã dẫn ra trong chương 2, được biểu diễn bằng biểu thức:

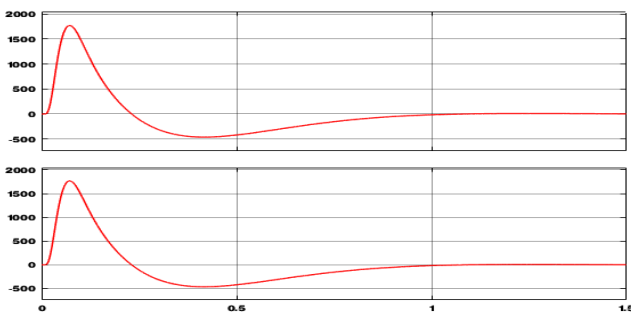
$$W_e(s) \cong \frac{0.03529s^4 - 2.55 * 10^{-6}s^3 + 0.2704s^2 - 3.299 * 10^{-8}s + 0.298}{0.1122s^5 + 0.8735s^3 + s} \quad (4.10)$$



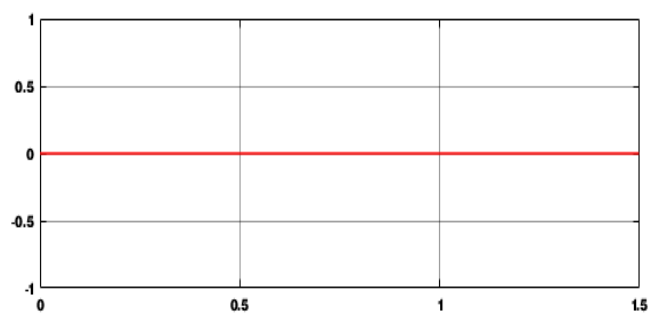
Dạng đồ thị biểu diễn sự biến thiên và sai lệch lực căng trên hai trục động cơ được chỉ ra trên hình 4.2, 4.3. Thời gian quá độ và độ quá chỉnh trong từng vòng lặp: dòng:  $t_{qd}^{vd} = 0.036(s), \sigma_{vd} = 1.48\%$ ; từ thông:  $t_{qd}^{\Phi} = 0.15(s), \sigma_{\Phi} = 3.4\%$ ; tốc độ:  $t_{qd}^{td} = 0.36(s), \sigma_{td} = 1\%$ . Các kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy: bộ điều chỉnh nhận được đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng cho trước của từng vòng điều khiển trong hệ thống. Lực căng trên hai trục động cơ (hình 4.2) biến thiên đồng điệu nhau và sai lệch lực căng của băng tải giữa hai trục động cơ do sai lệch tốc độ của các động cơ gây ra (hình 4.3) hầu như không có. Điều này khẳng định tính xác thực của phương pháp tổng hợp đề xuất, cho phép thao tác trực tiếp với mô hình gốc mô tả băng tải (1.3) mà không gặp khó khăn đáng kể nào.



Hình 4.1. Giao diện chương trình tự động tổng hợp hệ truyền động điện có chứa băng tải đàn hồi



Hình 4.2. Biến thiên lực căng của băng tải tại hai trục động cơ

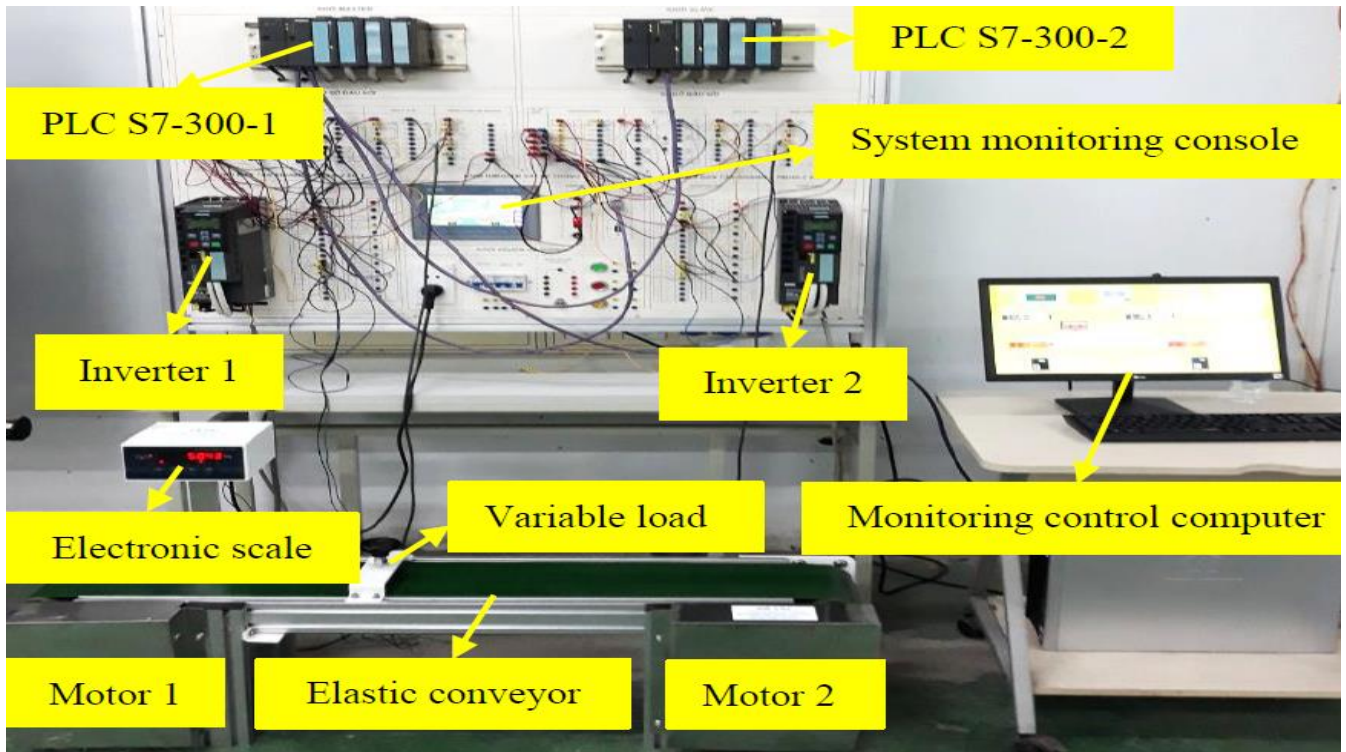


Hình 4.3. Sai lệch lực căng của băng tải tại hai trục động cơ

### 4.3. Xây dựng mô hình thực nghiệm



Việc xây dựng mô hình thực nghiệm nhằm kiểm chứng tính đúng đắn của các kết luận trên đây được thực hiện trong khuôn khổ của đề tài: “Xây dựng hệ thống truyền động điện tự động nhiều động cơ chủ động được liên kết với nhau bởi các phần tử đàn hồi” với Mã số: DTT2018-03-B, theo hợp đồng Số: 70/HĐ-SKHCN ngày 23/8/2019 với Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Đồng Nai, đã được nghiệm thu 5/2021. Mô hình thực nghiệm được chỉ ra trên hình 4.4, trong đó các thông số của bộ điều chỉnh dòng (4.2) và từ thông (4.5) được thiết lập thông qua cài đặt biến tần, còn các thông số của bộ điều chỉnh tốc độ (4.8) được thiết lập trong các bộ PID của các trạm PLC.



**Hình 4.4.** Mô hình thực nghiệm hệ truyền động hai động cơ có chứa băng tải đàn hồi dạng vòng kín

Kết quả thử nghiệm thiết bị cho thấy: Hệ thống điều khiển đảm bảo được yêu cầu ổn định và đồng bộ bám tốc độ của các động cơ trong cả chế độ quá độ và chế độ xác lập. Sai lệch lực căng của băng tải tại các trục động cơ, phát sinh do sai lệch tốc độ giữa các động cơ không đáng kể. Hệ thống thực nghiệm có độ quá chỉnh, thời gian quá độ sát với kết quả mô phỏng. Tuy nhiên kết quả kiểm tra thực tế cho thấy, hệ thống sẽ mất ổn định khi tải thay đổi lớn.

#### 4.4. Kết luận chương 4

Chương 4 đã thực hiện tính toán, mô phỏng và đánh giá chất lượng hệ thống điều khiển cho hệ truyền động hai động cơ không đồng bộ liên kết với nhau bởi băng tải đàn hồi. Thiết kế và đánh giá hệ thống thực nghiệm điều khiển, giám sát hai động cơ. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy hiệu quả của thuật toán đã đề xuất, đơn giản hóa thủ tục tổng hợp và nâng cao chất lượng hệ thống điều khiển.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 1. Kết luận

Luận án đã phát triển thuật toán ước lượng và tổng hợp hệ thống điều khiển cho hệ truyền động hai động cơ không đồng bộ có chứa băng tải đàn hồi. Các kết quả cơ bản mà luận án đã đạt được bao gồm:

1. Xây dựng mô hình hàm truyền đạt biểu diễn mối liên hệ giữa lực căng và vận tốc của băng tải tại các tọa độ không gian khác nhau. Phân tích và đánh giá các phương pháp điều khiển hệ truyền động nhiều động cơ có chứa băng tải đàn hồi.

2. Xây dựng thuật toán ước lượng hàm truyền đạt mô tả băng tải đàn hồi có chứa các thành phần quán tính và siêu việt trong các hệ truyền động điện nhiều động cơ ứng dụng phương pháp nội suy thực. Xây dựng chương trình tự động ước lượng theo thuật toán đã đề xuất và xác định mô hình ước lượng cho băng tải với các tham số cụ thể.

3. Thiết lập thuật toán tổng hợp bộ điều chỉnh của các hệ thống điều khiển tự động nhiều vòng bằng phương pháp nội suy thực và khảo sát các cách thức hiệu chỉnh tham số bộ điều chỉnh sao cho hệ thống được tổng hợp đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng cho trước. Xây dựng chương trình mô phỏng kiểm chứng thuật toán tổng hợp đã đề xuất.

4. Thực hiện tổng hợp tham số các bộ điều chỉnh của hai vòng điều khiển từ thông và tốc độ cho hệ truyền động 2 động cơ có tính đến ảnh hưởng của băng tải đàn hồi. Mô phỏng và xây dựng mô hình thực nghiệm kiểm chứng, đánh giá chất lượng của hệ thống với các bộ điều chỉnh được tổng hợp.

### 2. Hướng nghiên cứu tiếp theo

1. Phổ quát phương pháp và thuật toán tổng hợp được xây dựng dựa trên phương pháp nội suy thực cho các hệ thống có tham số phân bố cụ thể khác (các quá trình gia nhiệt, các thiết bị ngâm được lai dất bằng cáp,...), để có thể đánh giá được đầy đủ hơn hiệu quả của phương pháp đề xuất.

2. Nghiên cứu đánh giá chất lượng làm việc của hệ thống điều khiển truyền động nhiều động cơ có liên kết đàn hồi trong trường hợp tải thay đổi lớn.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. **Đào Sỹ Luật**, Mai Xuân Dũng, Nguyễn Phú Đăng, “Mô hình hóa và ước lượng phần tử liên kết đàn hồi trong các hệ truyền động điện tự động nhiều động cơ bằng phương pháp số”. Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật (Học viện KTQS), ISSN 1859 – 0209, Số 206, 5/2020, Tr. 89-98.
2. Nguyễn Phú Đăng, **Đào Sỹ Luật**, Nguyễn Đình Khánh, “Xây dựng chương trình tự động hóa tổng hợp bộ điều chỉnh của các hệ thống điều khiển tự động theo phương pháp nội suy thực”. Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật (Học viện KTQS), ISSN 1859 – 0209, No 185, 08/2017, Tr. 93 – 103.
3. **Đào Sỹ Luật**, Bùi Hải Đăng, Nguyễn Phú Đăng, “Tổng hợp nội suy bộ điều chỉnh của các hệ thống cơ điện tử nhiều vòng”. Tạp chí Nghiên cứu khoa học và Công nghệ quân sự, ISSN 1859 – 1043, No 59, 02/2019, Tr. 38 – 47.