

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

Nguyễn Ngọc Thủy

**PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC TẮM COMPOSITE ÁP ĐIỆN
CÓ GÂN GIA CƯỜNG CHỊU TẢI TRỌNG KHÍ ĐỘNG**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội – 2020

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

Người hướng dẫn khoa học: GS.TS Nguyễn Thái Chung

Phản biện 1: GS.TSKH Nguyễn Tiến Khiêm

Phản biện 2: GS.TS Trần Ích Thịnh

Phản biện 3: GS.TS Trần Minh Tú

Luận án sẽ được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số 2880/QĐ-HV, ngày 03 tháng 9 năm 2020 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi giờ ngày tháng năm 2020

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Nguyễn Thái Chung, Nguyễn Ngọc Thủy (2016), *Nghiên cứu ổn định tuyến tính của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của tải trọng điều hòa*, Tuyển tập công trình Hội nghị Khoa học toàn quốc “Vật liệu và kết cấu Composite: Cơ học, Công nghệ và Ứng dụng”, Đại học Nha Trang, trang 89-96 (ISBN:978-604-82-2026-6).

2. Nguyễn Thái Chung, Nguyễn Ngọc Thủy (2017), *Nghiên cứu điều khiển dao động tự do của tấm composite áp điện có gân gia cường sử dụng lý thuyết bậc cao*, Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Học viện KTQS, Tập 3, Quyển 1, trang 163-170 (ISBN: 978-604-913-721-1).

3. Nguyễn Ngọc Thủy, Nguyễn Thái Chung (2017), *Phân tích động lực học của tấm composite lớp áp điện có gân gia cường sử dụng lý thuyết bậc cao*, Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Học viện KTQS, Tập 3, Quyển 2, trang 1197-1204 (ISBN: 978-604-913-722-8).

4. Nguyễn Thái Chung, Nguyễn Ngọc Thủy (2018), *Flutter Analysis for Smart Stiffened Plates using Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators*, Tạp chí Xây dựng Việt Nam, số 608, trang 208-211 (ISSN 0866-8762).

5. Nguyen Thai Chung, Nguyen Ngoc Thuy, Duong Thi Ngoc Thu and Le Hai Chau (2019), *Numerical and Experimental Analysis of the Dynamic Behavior of Piezoelectric Stiffened Composite Plates Subjected to Airflow*, Mathematical Problems in Engineering (Article ID: 2697242), 10 page (SCIE).

6. Nguyễn Ngọc Thủy, Nguyễn Thái Chung (2019), *Experimental Analysis of the Dynamic Behaviors of Piezoelectric Stiffened Composite Plates*, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN Quân sự, số 59, trang 196-204 (ISSN 1859-1043).

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Việc nghiên cứu tính toán, ứng dụng đối với kết cấu dạng tấm, dầm, vỏ composite áp điện được khá nhiều nhà khoa học trên thế giới và trong nước quan tâm nghiên cứu, trong đó tập trung chủ yếu vào các hướng: tính toán bền, dao động và ổn định. Tuy nhiên, việc ứng dụng kết cấu dạng tấm, dầm, vỏ composite có lớp áp điện, nhất là các kết cấu có biện pháp gia cường vào các lĩnh vực kỹ thuật đến nay còn ít nghiên cứu nhưng tiềm năng sử dụng chúng là rất lớn. Do vậy, vấn đề “*Phân tích động lực học tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động*” mà tác giả luận án tập trung giải quyết có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

- *Đối tượng nghiên cứu của luận án*: Tấm composite có gân gia cường được gắn các lớp hoặc các miếng áp điện (trong đó mỗi lớp composite là vật liệu đồng phương) chịu tải trọng khí động do dòng khí chuyển động gây ra.

- *Phạm vi nghiên cứu của luận án*: Động lực học phi tuyến và ổn định của kết cấu tấm composite áp điện có gân gia cường.

3. Phương pháp nghiên cứu

Kết hợp phương pháp nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm. Về lý thuyết, sử dụng lý thuyết tấm mỏng Mindlin và phương pháp PTHH. Về thực nghiệm, xây dựng mô hình và tiến hành thí nghiệm đo đáp ứng động của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động trong buồng thổi gió.

4. Cấu trúc luận án

Luận án được cấu trúc gồm: Mở đầu, 4 chương, phần kết luận và kiến nghị, tài liệu tham khảo và phụ lục.

Mở đầu: Trình bày tính cấp thiết của vấn đề nghiên cứu

Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Chương 2. Phân tích phi tuyến động lực học tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động

Chương 3. Khảo sát số và thảo luận

Chương 4. Nghiên cứu thực nghiệm

Kết luận và kiến nghị: Trình bày những kết quả mới của luận án và các kiến nghị của tác giả rút ra từ nội dung nghiên cứu.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Trình bày tổng quan về hiện tượng áp điện, ứng dụng, kết cấu composite áp điện, các mô hình lực khí động, các kết quả tính toán kết cấu composite áp điện ở trong nước và nước ngoài. Từ các công trình đã công bố, trên cơ sở các vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu và phát triển, tác giả luận án tập trung nghiên cứu: ***“Phân tích động lực học tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động”***. Theo đó, luận án sẽ tập trung giải quyết các nội dung chủ yếu sau:

1. Nghiên cứu tổng quan về hiện tượng áp điện, ứng dụng, kết cấu composite áp điện, các mô hình lực khí động sử dụng trong tính toán kết cấu, tổng quan về tính toán kết cấu composite áp điện làm cơ sở giải quyết bài toán phân tích động lực học tấm composite áp điện có gân gia cường.

2. Xây dựng thuật toán PTHH và chương trình máy tính phân tích dao động của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của tải trọng khí động theo thời gian, trong đó xem xét đến tổng cản của hệ: cản áp điện, cản kết cấu.

3. Khảo sát số trên các lớp bài toán khác nhau với các thông số thay đổi nhằm lựa chọn các thông số hợp lý làm giảm dao động và tăng khả năng ổn định cho tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của tải trọng khí động theo thời gian.

4. Nghiên cứu thực nghiệm, xác định phản ứng động của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động trong buồng thổi.

CHƯƠNG 2

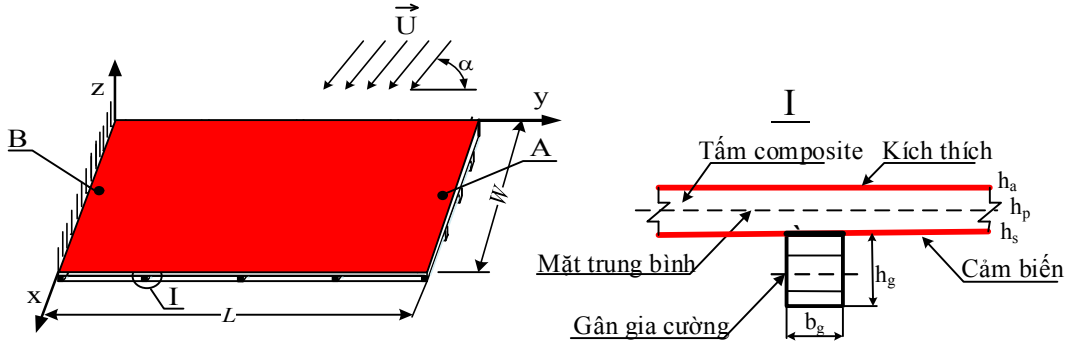
PHÂN TÍCH PHI TUYẾN ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TẤM COMPOSITE ÁP ĐIỆN CÓ GÂN GIA CƯỜNG CHỊU TẢI TRỌNG KHÍ ĐỘNG

2.1. Đặt vấn đề

Trong chương này, tác giả luận án tập trung xây dựng mô hình, các quan hệ ứng xử cơ - điện, thuật toán PTHH và chương trình tính để giải quyết bài toán đặt ra. Tác giả luận án sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất của Mindlin và quan hệ phi tuyến giữa biến dạng - chuyển vị để thiết lập thuật toán điều khiển dao động của tấm composite áp điện trên cơ sở áp dụng tính chất thuận nghịch của vật liệu áp điện dưới tác dụng của tải trọng khí động.

2.2. Đặt bài toán và các giả thiết

Xét tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động do dòng khí đi chuyển với vận tốc U tạo với mặt phẳng xoy một góc α gây ra (Hình 2.1).



Hình 2.1. Mô hình bài toán

Các giả thiết: Tấm và gân liên kết bám dính tuyệt đối, tấm thỏa mãn điều kiện lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất của Mindlin, vật liệu của tấm và gân làm việc trong giới hạn đàn hồi. Mỗi lớp của tấm và gân gia cường là vật liệu composite đồng phương. Vật liệu áp điện biến dạng bé, đàn hồi tuyến tính, các hệ số đàn hồi, hệ số tương tác áp điện và các hệ số điện môi không thay đổi trong quá trình tấm biến dạng. Lớp áp điện bám dính tuyệt đối với lớp composite của tấm. Bỏ qua hiệu ứng rôi của dòng khí và chấp nhận phương pháp độc lập, công tác dụng của tải trọng.

2.3. Quan hệ ứng xử cơ học của tấm composite lớp có gân gia cường

2.3.1. Quan hệ ứng xử cơ học của tấm composite lớp:

2.3.1.1. Quan hệ biến dạng và chuyển vị:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\varepsilon_b\} \\ \{\varepsilon_s\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\varepsilon_b^L\} + \{\varepsilon^N\} \\ \{\varepsilon_s\} \end{Bmatrix}. \quad (2.11)$$

2.3.1.2. Quan hệ ứng suất và biến dạng:

$$\{\sigma\}_k^c = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

2.3.1.3. Các thành phần nội lực:

a. Lực màng:

$$\{N^c(x,y,t)\} = \{N^c\} = \left(\{N_x \ N_y \ N_{xy}\}^c \right)^T = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left(\{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}_k^c \right)^T dz, \quad (2.15)$$

b. Mô men uốn và xoắn:

$$\{M^c(x,y,t)\} = \{M^c\} = \left(\{M_x \ M_y \ M_{xy}\}^c \right)^T = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} z \left(\{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}_k^c \right)^T dz, \quad (2.16)$$

c. Lực cắt:

$$\{Q^c(x,y,t)\} = \{Q^c\} = \left\{ \begin{matrix} Q_x \\ Q_y \end{matrix} \right\}^c = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left\{ \begin{matrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{matrix} \right\}_k^c dz = \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix}^c \left\{ \begin{matrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{matrix} \right\}, \quad (2.17)$$

2.3.1.4. Các quan hệ ứng xử cơ học của tấm composite lớp:

$$\left\{ \begin{matrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \end{matrix} \right\}^c = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [0] \\ [B] & [D] & [0] \\ [0] & [0] & [F] \end{bmatrix}^c \left\{ \begin{matrix} \{\varepsilon^o\} + \{\varepsilon^N\} \\ \{\kappa\} \\ \{\varepsilon_s\} \end{matrix} \right\}, \quad (2.25)$$

2.3.2. Quan hệ ứng xử cơ học của gân gia cường

2.3.2.1. Trường chuyển vị:

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z, t) = u_0(x, t) - z\theta_y(x, t), \\ v &= v(x, y, z, t) = v_0(x, t) + z\theta_x(x, t), \\ w &= w(x, y, z, t) = w_0(x, t) - y\theta_x(x, t), \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.3.2.2. Trường biến dạng:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^L\} + \{\varepsilon^{NL}\} = \left\{ \begin{matrix} \varepsilon_x^L \\ \gamma_{xz}^L \\ \gamma_{xy}^L \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \varepsilon_x^{NL} \\ \gamma_{xz}^{NL} \\ \gamma_{xy}^{NL} \end{matrix} \right\}, \quad (2.30)$$

2.3.2.3. Trường ứng suất:

$$\left\{ \begin{matrix} \sigma_x \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \varepsilon_x^L \\ \gamma_{xz}^L \\ \gamma_{xy}^L \end{matrix} \right\} + \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \varepsilon_x^{NL} \\ \gamma_{xz}^{NL} \\ \gamma_{xy}^{NL} \end{matrix} \right\}. \quad (2.34)$$

2.4. Quan hệ ứng xử cơ học của tấm composite có lớp áp điện

2.4.1. Ứng xử cơ học của lớp áp điện:

Quan hệ ứng suất - biến dạng:

$$\{\sigma\}_k^p = [\bar{C}]_k \{\varepsilon\}_k - [e]_k \{E\}_k, \quad (2.35)$$

Khi áp điện thế tĩnh lên bề mặt lớp áp điện thì trong lớp áp điện sẽ sinh ra điện trường E, lúc này ứng suất trên lớp áp điện thứ k sẽ có 2 thành phần: ứng suất do cơ học và ứng suất do điện trường gây ra, ta có:

$$\{\sigma\}_k^p = \{\sigma\}_k^M - \{\sigma\}_k^E, \quad (2.39)$$

2.4.2. Ứng xử của tấm n lớp composite và m lớp áp điện

Phương trình ứng xử cơ học của tấm gồm n lớp composite và m lớp áp điện như sau:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \\ \{D^p\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [0] & [\bar{e}] \\ [B] & [D] & [0] & [\bar{e}] \\ [0] & [0] & [F] & [\tilde{e}] \\ [\bar{e}] & [\bar{e}] & [\tilde{e}] & [\bar{p}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^o\} + \{\varepsilon^N\} \\ \{\kappa\} \\ \{\varepsilon_s\} \\ \{-E\}_k \end{Bmatrix}, \quad (2.43)$$

2.5. Thiết lập phương trình vi phân mô tả dao động phi tuyến của phần tử tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động

2.5.1. Phần tử tấm composite có lớp áp điện:

Phương trình vi phân mô tả dao động của phần tử tấm composite có lớp áp điện như sau:

$$\begin{aligned} [M_{uu}^e] \{\ddot{q}_e^M\} + [C_R^e] \{\dot{q}_e^M\} + \left([K_{uu}^e] + [K_{u\phi}^e] [K_{\phi\phi}^e]^{-1} [K_{\phi u}^e] \right) \{q_e^M\} = \\ = \{F_e^M\} + [K_{u\phi}^e] [K_{\phi\phi}^e]^{-1} \{Q_c^e\}, \end{aligned} \quad (2.91)$$

2.5.2. Phần tử tấm composite áp điện có gân gia cường

Với giả thiết liên kết giữa tấm và gân là lý tưởng, chuyển vị tại mặt dưới của tấm đồng nhất với chuyển vị tại mặt trên của gân.

Quan hệ giữa chuyển vị tại vị trí nút chung thứ i giữa phần tử gân và phần tử tấm biểu diễn như sau:

$$\begin{Bmatrix} u_{0gxi} \\ v_{0gxi} \\ w_{0gxi} \\ \phi_{gxi} \\ \phi_{gyi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0,5(h + h_{gx}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{0i} \\ v_{0i} \\ w_{0i} \\ \phi_{xi} \\ \phi_{yi} \end{Bmatrix} \quad (2.107)$$

$$\text{hay: } \{q_i^{gx}\} = [T_x] \{q_i\} \quad (2.108)$$

Quan hệ giữa chuyển vị nút của phần tử gân song song với trục ox với phần tử tấm có cùng chung nút có dạng:

$$\{q_e^{gx}\} = [T^{gx}] \{q_e\} \quad (2.110)$$

$$\text{với: } [T^{gx}] = [T_x] \cdot \text{diag}(9,9) \quad (2.111)$$

Quan hệ giữa chuyển vị nút giữa phần tử gân song song với trục oy với phần tử tấm xác định tương tự như với trục ox.

Phương trình vi phân mô tả dao động của phần tử tấm composite áp điện có gân gia cường như sau:

$$[M_{uu}^{epg}] \{\ddot{q}_e^M\} + \left([C_A^e] + [C_R^{epg}] \right) \{\dot{q}_e^M\} + [K_{ME}^{epg}] \{q_e^M\} = \{F_e^M\}. \quad (2.124)$$

2.5.3. Phần tử tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động

Trường hợp tổng quát, lực khí động tác dụng lên phần tử tấm gồm hai thành phần: áp lực khí động phân bố được tính theo mô hình Scanlan và áp lực khí động phân bố tính theo áp lực gió phân bố vuông góc với một diện tích tấm. Phương trình mô tả lực khí động tác dụng lên phần tử tấm như sau:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_w = \frac{1}{2} \rho_a (U \cos \alpha)^2 B \left[\begin{array}{l} KH_1^*(K) \frac{\dot{w}}{U \cos \alpha} + \\ + KH_2^*(K) \frac{B \dot{\theta}_x}{U \cos \alpha} + \\ + K^2 H_3^*(K) \theta_x \end{array} \right] + \frac{1}{2} C_p \rho_a (U \sin \alpha)^2 \\ m_\theta = \frac{1}{2} \rho_a (U \cos \alpha)^2 B^2 \left[\begin{array}{l} KA_1^*(K) \frac{\dot{w}}{U \cos \alpha} + KA_2^*(K) \frac{B \dot{\theta}_x}{U \cos \alpha} + \\ + K^2 A_3^*(K) \theta_x \end{array} \right] \end{array} \right. \quad (2.129)$$

Phương trình mô tả dao động phi tuyến của phần tử tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động và lực cơ học như sau:

$$[M_{uu}^{epg}] \{\ddot{q}_e^M\} + \left([C_A^e] + [C_R^{epg}] + [C_{air}^e] \right) \{\dot{q}_e^M\} + \left([K_{ME}^{epg}] + [K_{air}^e] \right) \{q_e^M\} = \{f_{can}^M\}. \quad (2.138)$$

2.5.4. Xây dựng ma trận tổng thể của kết cấu từ các ma trận phần tử

Sau khi tập hợp các ma trận, véc tơ tải trọng tổng thể như đã trình bày ở trên, ta có phương trình mô tả dao động phi tuyến hình học của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động và lực cơ học như sau:

$$[M] \{\ddot{q}\} + [C_{RAa}] \{\dot{q}\} + [K_{MEa}] \{q\} = \{R\}. \quad (2.145)$$

2.6. Thuật toán PTHH giải phương trình dao động của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động

Luận án tập trung giải quyết 2 dạng bài toán:

- Bài toán dao động riêng tuyến tính, tần số riêng ω_i , của tấm được xác định khi giải phương trình:

$$\left[\left[\bar{K}_U^L \right] - \omega^2 \left[\bar{M}_U \right] \right] = 0, \quad (2.147)$$

Tương ứng với tần số riêng ω_i , các véc tơ riêng $\{q_i\}$ của tấm lúc này được xác định bởi phương trình:

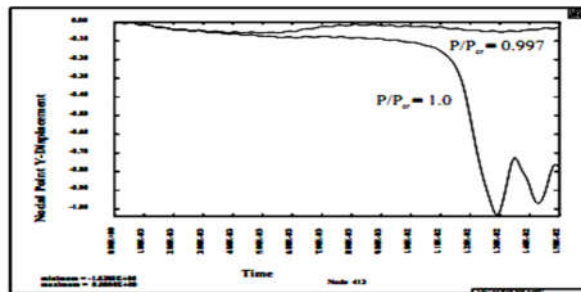
$$\left(\left[\bar{K}_U^L \right] - \omega_i^2 \left[\bar{M}_U \right] \right) \{q_i\} = \{0\}. \quad (2.148)$$

- Với bài toán dao động cưỡng bức phi tuyến, phương trình được tác giả giải trên cơ sở sử dụng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark kết hợp với phương pháp lặp Newton – Raphson.

2.7. Phân tích ổn định của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động

2.7.1. Tiêu chuẩn ổn định động của Budiansky – Roth

Nội dung của tiêu chuẩn được phát biểu: Việc giải phương trình dao động ứng với các điều kiện khác nhau của tải trọng cho ta các đáp ứng động khác nhau, trong một điều kiện nào đó, biên độ chuyển vị lớn nhất của hệ tăng theo thời gian và có bước nhảy đột ngột, hệ thực hiện dao động quanh vị trí cân bằng mới khác với vị trí cân bằng ban đầu (Hình 2.5) thì kết cấu được xem là mất ổn định, tải trọng tương ứng để xảy ra hiện tượng này được gọi là lực tới hạn. Thời điểm lân cận quanh vị trí xuất hiện bước nhảy đột ngột của chuyển vị lớn nhất trong biểu đồ đáp ứng động theo thời gian được gọi là thời điểm kết cấu mất ổn định.



Hình 2.5. Biểu đồ dấu hiệu mất ổn định động theo tiêu chuẩn Budiansky - Roth

2.7.2. Phân tích ổn định của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động

Sử dụng tiêu chuẩn ổn định động của Budiansky – Roth [25], để xem xét ổn định động của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải

trọng khí động như mục tiêu đặt ra trong luận án, sử dụng thuật toán đã trình bày trong mục 2.6 để giải phương trình (2.145), xây dựng các đồ thị đáp ứng động tương ứng của điểm có chuyển vị lớn nhất, tùy theo tính chất của đồ thị có được cho phép ta kết luận về khả năng ổn định và từ đó cho ta giá trị lực tới hạn của tấm.

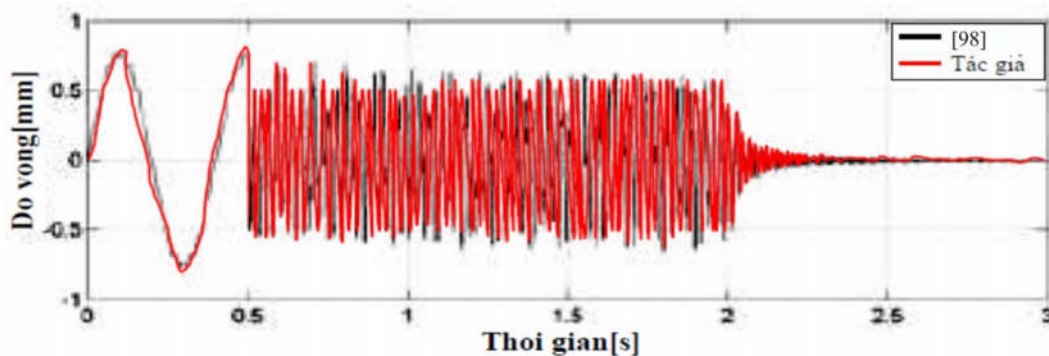
2.8. Giới thiệu chương trình và kiểm tra mức độ tin cậy

2.8.1. Giới thiệu chương trình tính

Chương trình tính có tên SMART_STIFFENED_PLATE_2018, chạy trên máy tính với hệ điều hành Windows XP, có khả năng phân tích phi tuyến động lực học tấm composite có lớp hoặc miếng áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của tải trọng khí động và tải trọng cơ học.

2.8.2. Kiểm tra độ tin cậy của chương trình

Sử dụng Chương trình tính SMART_STIFFENED_PLATE_2018 đã lập, tác giả giải bài toán dao động của tấm composite áp điện như trong công trình của tác giả V. Balamurugan và cộng sự [98] đã công bố. Kết quả so sánh đáp ứng chuyển vị tại điểm đặt lực của tác giả và của các tác giả [98] được thể hiện trong hình 2.10.



Hình 2.10. Đáp ứng chuyển vị của tấm theo thời gian

Chuyển vị lớn nhất của tấm do các tác giả [98] tính là 0,766mm và của tác giả luận án tính là 0,778mm, với sai số 1,57%.

Nhận xét: Từ kết quả tính toán và so sánh với sai số như trên cho thấy thuật toán và chương trình tính SMART_STIFFENED_PLATE_2018 do tác giả luận án đã lập là có cơ sở tin cậy.

2.9. Kết luận chương 2

Một số kết quả chính đạt được trong chương này:

- Xây dựng được hệ phương trình vi phân mô tả dao động phi tuyến của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động theo mô hình Scanlan và tải trọng cơ học, trong đó tính chất cản của kết cấu và cản áp điện được kể đến.

- Xây dựng được thuật toán PTHH giải hệ phương trình vi phân mô tả dao động phi tuyến của kết cấu tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động bằng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark và lặp Newton-Raphson. Thiết lập chương trình máy tính trong môi trường ANSYS 13.5 cụ thể hóa thuật toán đã xây dựng, chương trình tính đã được kiểm chứng và có cơ sở tin cậy.

CHƯƠNG 3 KHẢO SÁT SỐ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặt vấn đề

Với thuật toán và chương trình đã lập ở chương 2, trong chương này tác giả tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố như: tính chất của áp điện, tính chất cản, đặc trưng tải trọng, kích thước hình học, vật liệu, điều kiện liên kết đến khả năng dao động và ổn định của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động do dòng khí chuyển động gây nên bằng khảo sát số. Các nhận xét, khuyến cáo kỹ thuật sẽ được đưa ra trên cơ sở các kết quả nghiên cứu số với từng bài toán cụ thể xét trong luận án.

3.2. Bài toán xuất phát

Thông số kết cấu: Tấm composite có lớp áp điện, với kích thước $0,5\text{m} \times 0,4\text{m} \times 0,00335\text{m}$ ($L \times W \times h$). Tấm được cấu tạo gồm 4 lớp composite Graphite/Epoxy T300/976, mỗi lớp dày 0,8mm và hai lớp vật liệu áp điện PZT-5A bố trí theo quy luật $[p/-\theta/\theta/\theta/-\theta/p]$, mỗi lớp dày 0,075mm, ký hiệu “p” chỉ lớp áp điện, “ θ ” chỉ góc cốt của lớp composite ($\theta = 45^\circ$). Tấm được gia cường bởi 10 gân bằng vật liệu composite cùng loại với tấm (5 gân dọc và 5 gân ngang), khoảng cách giữa các gân theo mỗi chiều bằng nhau. Các gân có mặt cắt ngang chữ nhật $0,003\text{m} \times 0,0048\text{m}$ ($b_g \times h_g$).

Thông số vật liệu: Graphite/Epoxy T300/976 có $E_{11} = 150 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$; $E_{22} = E_{33} = 9 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$; $G_{12} = G_{13} = 7,1 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$; $G_{23} = 2,5 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$; $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{32} = 0,3$; $\rho_{GE} = 1600 \text{ kg/m}^3$ và vật liệu PZT-5A có $E_{pzt} = 63 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$; $G_{pzt} = 24,2 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$; $\nu_{pzt} = 0,3$, $\rho_{pzt} = 7600 \text{ kg/m}^3$; $d_{31} = d_{32} = 2,54 \times 10^{-10} \text{ m/V}$; $p_{11} = p_{22} = p_{33} = 15 \times 10^{-9} \text{ F/m}$.

Điều kiện liên kết: Tấm bị ngàm 1 cạnh ngắn, 3 cạnh còn lại tự do.

Thông số tải trọng: Tấm chịu điện áp đặt V và dòng khí có vận tốc U tác dụng trong mặt phẳng tạo với mặt phẳng tấm một góc α , song song với mặt phẳng xoz , trong đó $V = 50\text{v}$, $U = 20\text{m/s}$, $\alpha = 30^\circ$.

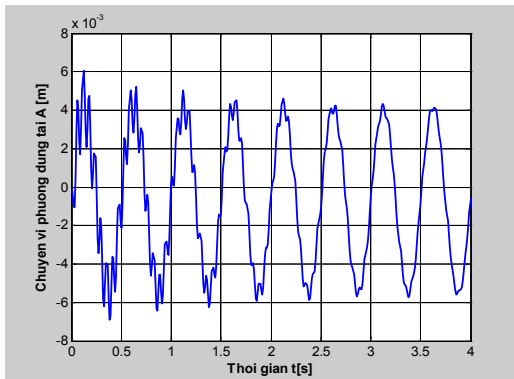
Điểm xuất phát: Điểm A (giữa cạnh ngắn tự do) và điểm B (giữa cạnh ngàm).

Bài toán dao động riêng: Giải bài toán dao động riêng, tác giả nhận được các tần số riêng và dạng dao động riêng, trong đó 8 tần số riêng đầu tiên trong bài toán xuất phát với trường hợp có điện áp (50 V) và không có điện áp (0V) như trong Bảng 3.1.

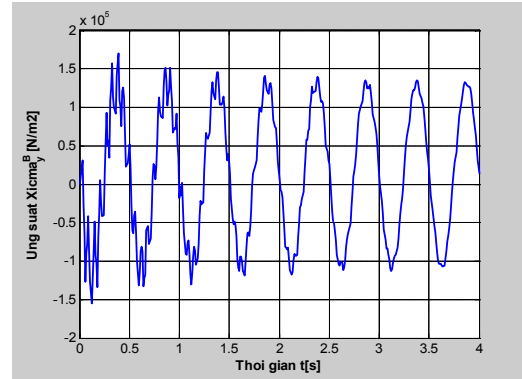
Bảng 3.1. Tám tần số riêng đầu tiên của tấm

TT	Tần số riêng f [Hz]	50v (có áp điện)	0v (không có áp điện)
1	f_1	18,81	17,32
2	f_2	52,96	49,66
3	f_3	117,07	115,27
4	f_4	185,80	178,92
5	f_5	277,02	261,33
6	f_6	329,33	316,27
7	f_7	398,70	384,96
8	f_8	408,79	388,48

Bài toán động lực học: Kết quả đáp ứng độ võng w , vận tốc \dot{w} , gia tốc \ddot{w} tại điểm A và đáp ứng ứng suất tại điểm B như trên hình 3.3, 3.6.



Hình 3.3. Đáp ứng độ võng w^A



Hình 3.6. Đáp ứng ứng suất σ_y^B

Bảng 3.2. Giá trị lớn nhất của các đại lượng tính

Tham số	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w^A \cdot 10^{-3}$ [m]	$\dot{w}^A \cdot 10^{-2}$ [m/s]	\ddot{w}^A [m/s ²]	$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m ²]	ϵ_y
Giá trị LN	6,923	31,970	36,832	16,991	$8,317 \cdot 10^{-6}$

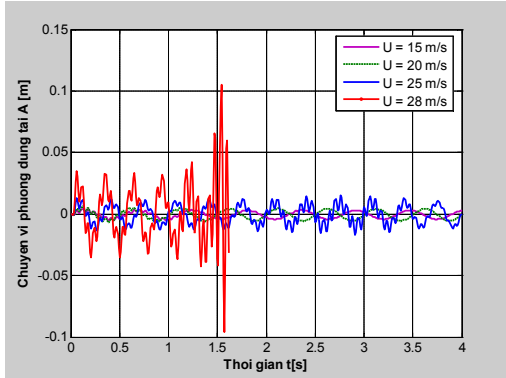
Nhận xét: Kết quả khảo sát cho thấy giá trị của các đáp ứng chuyển vị, vận tốc, gia tốc và ứng suất đều có xu hướng giảm dần theo thời gian. Điều này cho thấy vận tốc dòng khí sinh ra lực khí động vẫn trong phạm vi làm việc ổn định của tấm.

3.3. Ảnh hưởng của một số yếu tố đến dao động và ổn định của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tải trọng khí động

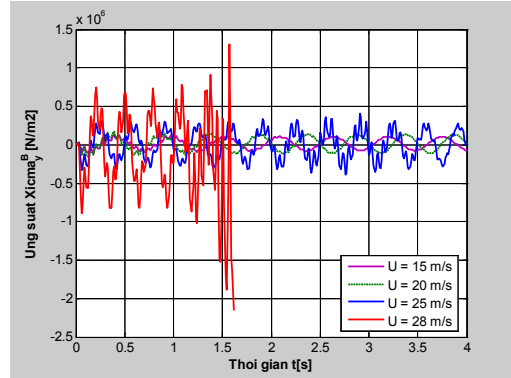
3.3.1. Ảnh hưởng của vận tốc dòng khí

Phân tích bài toán với vận tốc dòng khí biến thiên từ 15m/s

(54km/h), đến 28m/s (100,8km/h). Kết quả đáp ứng độ võng và ứng suất tại các điểm tính như hình 3.8 và 3.11.



Hình 3.8. Đáp ứng độ võng w



Hình 3.11. Đáp ứng ứng suất σ_y

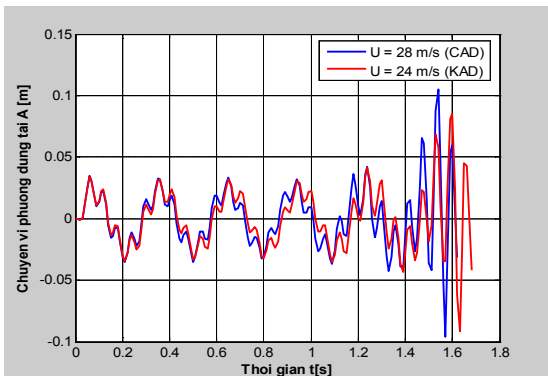
Bảng 3.3. Giá trị lớn nhất của các đại lượng tính khi thay đổi U

U [m/s]	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w \cdot 10^{-3}$ [m]	$\dot{w} \cdot 10^{-2}$ [m/s]	\ddot{w} [m/s ²]	$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m ²]	$\varepsilon_y \cdot 10^{-6}$
15	5,321	25,458	33,116	13,336	6,644
20	6,923	31,970	36,832	16,991	8,317
25	16,904	96,806	90,117	40,121	17,481
28	Đáp ứng tăng dần theo thời gian				

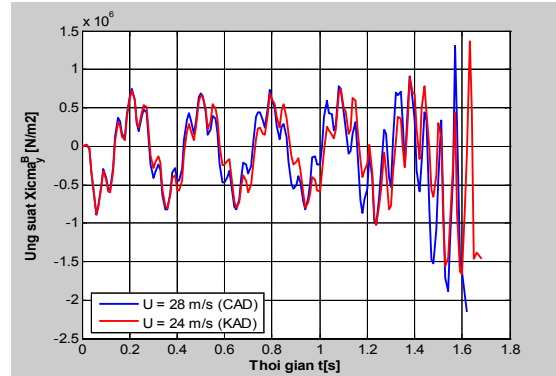
Nhận xét: Ảnh hưởng của vận tốc U của dòng khí tới dao động của tấm là khá lớn, cụ thể: Khi $U = 15\text{m/s}$, dao động của tấm có xu hướng tắt dần, chuyển vị lớn nhất $w_{\max} = 5,321 \cdot 10^{-3}$ m. Khi $U = 25\text{m/s}$, dao động của tấm bình ổn (biên độ không đổi) và chuyển vị $w = 16,904 \cdot 10^{-3}$ m. Tiếp tục tăng vận tốc U với $\Delta U = 1\text{m/s}$, nhận thấy khi vận $U_{\text{th}} = 28\text{m/s}$, độ võng của điểm tính tăng theo thời gian, có thể xem tấm bị mất ổn định.

3.3.2. Ảnh hưởng của lớp áp điện

Khảo sát tấm composite có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động khi có lớp áp điện và không có lớp áp điện. Kết quả đáp ứng độ võng và ứng suất tại các điểm tính như hình 3.13 và 3.16.



Hình 3.13. Đáp ứng độ võng w

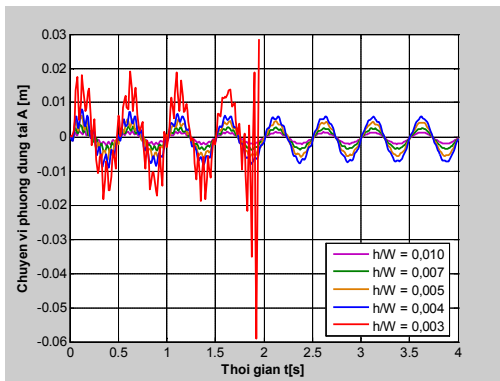


Hình 3.16. Đáp ứng ứng suất σ_y

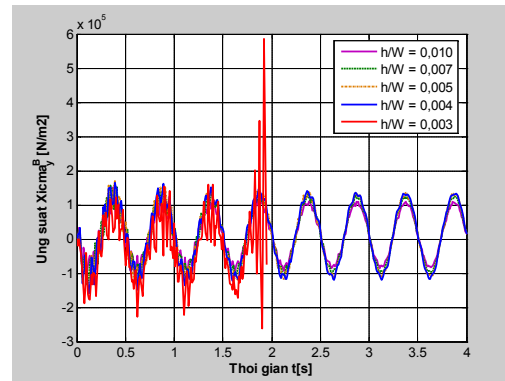
Nhận xét: Từ kết quả khảo sát cho thấy, với trường hợp có lớp áp điện (CAD) thì tấm composite có gân gia cường được ổn định đến vận tốc dòng khí là 28 m/s, trong khi đó nếu tấm composite có gân gia cường không có lớp áp điện (KAD) thì tấm ổn định đến vận tốc dòng khí là 24 m/s sau đó là tấm mất ổn định. Qua đó cho thấy, lớp áp điện có tác dụng làm giảm dao động của tấm composite có gân gia cường dưới tác dụng của vận tốc dòng khí.

3.3.3. Ảnh hưởng của tỷ số giữa chiều dày và bề rộng của tấm (h/W)

Giải bài toán với tỷ số h/W thay đổi từ 0,003 đến 0,010 (thay đổi chiều dày tấm). Kết quả đáp ứng chuyển vị và ứng suất của tấm với các tỷ số h/W khác nhau như hình 3.18, 3.21 và được thể hiện trong bảng 3.4



Hình 3.18. Đáp ứng độ võng w



Hình 3.21. Đáp ứng ứng suất σ_y

Bảng 3.4. Giá trị lớn nhất của các tham số khảo sát theo tỉ số h/W

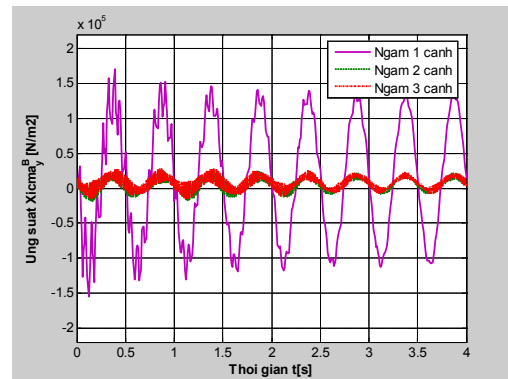
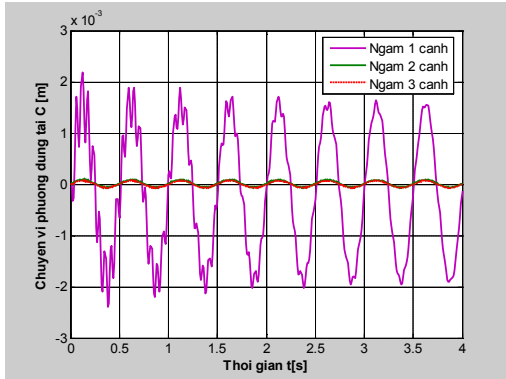
Tỉ số h/W	0,010	0,007	0,005	0,004	0,003
$w_{\max} \cdot 10^{-3}$ [m]	2,463	4,332	6,923	9,025	Tăng theo thời gian
$\dot{w}_{\max} \cdot 10^{-2}$ [m/s]	18,598	21,992	31,970	37,847	
\ddot{w}_{\max} [m/s ²]	27,913	36,126	36,832	44,939	
$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m ²]	15,030	15,731	16,991	16,386	
$\varepsilon_y \cdot 10^{-6}$	5,647	7,466	8,317	9,780	

Nhận xét: Tỷ số giữa chiều dày và bề rộng (h/W) của tấm khá nhạy cảm với đáp ứng động của tấm: Khi tỷ số h/W thay đổi từ 0,007 đến 0,004 thì giá trị chuyển vị lớn nhất tăng lên 2,08 lần, giá trị ứng suất tăng nhưng không đáng kể (4,2%). Với giá trị $h/W = 0,003$, chuyển vị tăng theo thời gian và có xu hướng không dừng, điều này dẫn đến khả năng tấm bị mất ổn định. Điều này làm cơ sở cho tính toán điều khiển dao động và ổn định kết cấu tấm khi chịu tác dụng của lực khí động.

3.3.4. Ảnh hưởng của điều kiện liên kết

Để xem xét quy luật cơ học về đáp ứng động lực học của tấm để từ đó cho phép đánh giá sự phù hợp của thuật toán và độ tin cậy của chương trình tính, trong phần này tác giả giải bài toán với 3 trường hợp liên kết:

Ngàm 1 cạnh ngấn, ngàm 2 cạnh ngấn và ngàm 3 cạnh (1 cạnh ngấn tự do). Điểm xuất kết quả so sánh là điểm C ở chính giữa mặt trên tấm và điểm B ở chính giữa cạnh bị ngàm ở trường hợp ngàm 1 cạnh ngấn.



Hình 3.23. Đáp ứng độ võng w

Hình 3.26. Đáp ứng ứng suất σ_y

Bảng 3.5. Giá trị lớn nhất của các tham số khảo sát theo điều kiện biên

Điều kiện biên	Ngàm 1 cạnh	Ngàm 2 cạnh	Ngàm 3 cạnh
$w_{\max}^C \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$	2,386	0,106	0,089
$\dot{w}_{\max}^C \cdot 10^{-2} \text{ [m/s]}$	14,693	5,915	3,413
$\ddot{w}_{\max}^C \text{ [m/s}^2\text{]}$	19,739	11,700	6,796
$\sigma_y^B \cdot 10^4 \text{ [N/m}^2\text{]}$	16,992	2,615	2,830
$\varepsilon_y^B \cdot 10^{-6}$	8,318	2,725	2,665

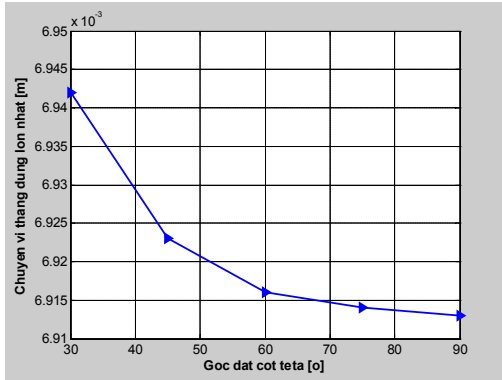
Nhận xét: Khi điều kiện liên kết thay đổi, đáp ứng động lực học của tấm cũng thay đổi: Với 3 trường hợp liên kết khảo sát, trường hợp ngàm 2 cạnh đối xứng cho thấy ứng suất trên cạnh bị ngàm là nhỏ nhất, trong khi đó chuyển vị của trường hợp ngàm 3 cạnh (1 cạnh tự do) là nhỏ nhất. Điều này hoàn toàn phù hợp với quy luật cơ học.

3.3.5. Ảnh hưởng của góc đặt cốt của tấm

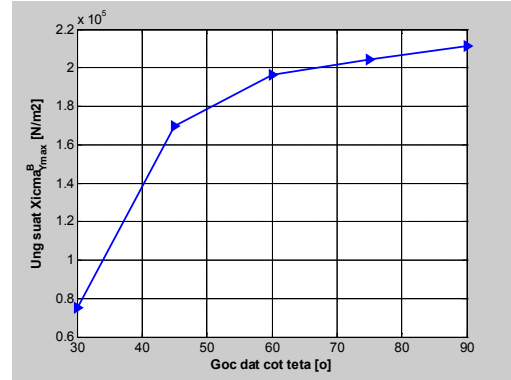
Khảo sát bài toán với góc đặt cốt của tấm $[p/-\theta^0/\theta^0/-\theta^0/p]$, góc cốt θ biến thiên từ 0^0 đến 90^0 . Kết quả biến thiên của giá trị lớn nhất về chuyển vị và ứng suất tại điểm tính thể hiện trong bảng 3.6 và hình 3.28, 3.31.

Bảng 3.6. Biến thiên giá trị lớn nhất của các đại lượng đến góc θ

$\theta \text{ [}^\circ\text{]}$	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$	$\dot{w} \cdot 10^{-2} \text{ [m/s]}$	$\ddot{w} \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\sigma_y \cdot 10^4 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$\varepsilon_y \cdot 10^{-6}$
30	6,942	32,419	36,194	7,506	18,948
45	6,923	31,970	36,832	16,991	8,317
60	6,916	31,759	37,065	19,659	4,596
75	6,914	31,674	37,130	20,456	2,538
90	6,913	31,646	37,150	21,118	0,308



Hình 3.28. Đáp ứng độ võng max

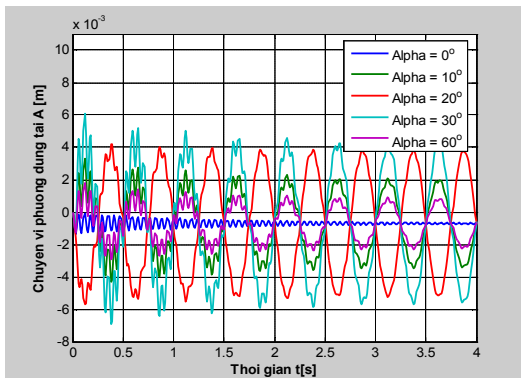


Hình 3.31. Đáp ứng ứng suất max

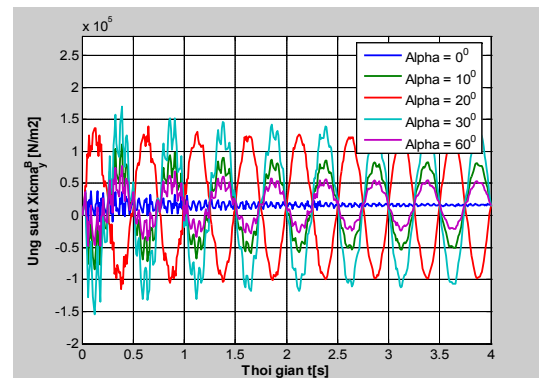
Nhận xét: Góc đặt cột của tấm có ảnh hưởng rõ rệt đến độ cứng của tấm, điều này thông qua sự thay đổi của các giá trị chuyển vị, biến dạng của tấm theo đại lượng này. Qua khảo sát ở trên, cho thấy với góc đặt cột $\theta \in [45^0 \div 90^0]$ là hợp lý nhất.

3.3.6. Ảnh hưởng của góc tới dòng khí

Giải bài toán với các trường hợp góc tới α của dòng khí thay đổi từ 0^0 đến 60^0 , kết quả đáp ứng chuyển vị và ứng suất của tấm được thể hiện như trên các đồ thị hình 3.33, 3.36 và bảng 3.7.



Hình 3.33. Đáp ứng độ võng



Hình 3.39. Đáp ứng ứng suất σ_y^B

Bảng 3.7. Giá trị lớn nhất của các tham số khảo sát theo góc tới α

α [0]	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w \cdot 10^{-3}$ [m]	$\dot{w} \cdot 10^{-2}$ [m/s]	\ddot{w} [m/s 2]	$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m 2]	$\epsilon_y \cdot 10^{-6}$
0	1,342	16,786	25,087	3,941	2,506
10	4,329	23,207	31,553	11,054	5,660
20	5,712	17,617	25,127	13,872	6,616
30	6,923	31,970	36,832	16,991	8,317
40	4,711	15,273	22,904	11,756	5,554
50	2,685	19,689	28,214	7,263	3,950
60	2,930	20,155	28,706	7,784	4,214

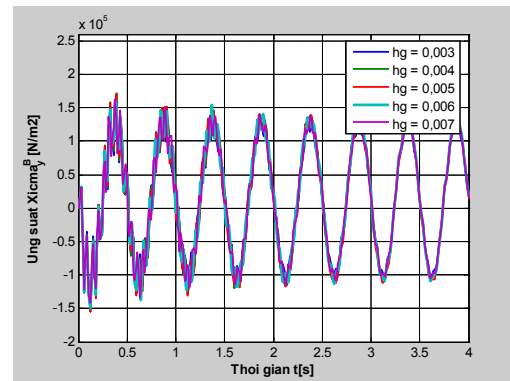
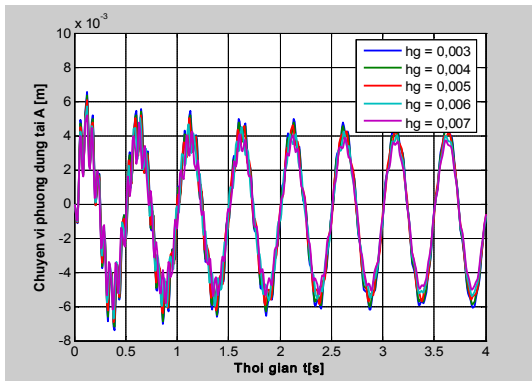
Nhận xét: Khi góc tới thay đổi từ 0^0 đến 60^0 , đáp ứng động của tấm thay đổi khá phức tạp, sự thay đổi không theo quy luật rõ nét. Trong khoảng khảo sát, khi góc tới thay đổi từ 10^0 đến 40^0 thì các đáp ứng chuyển vị, ứng suất và biến dạng đạt giá trị lớn.

3.3.7. Ảnh hưởng của kích thước gân

Thay đổi tỷ số chiều cao/bề rộng (h_g/b_g) của mặt cắt ngang gân bằng cách giữ nguyên b_g , thay đổi h_g , kết quả về đáp ứng chuyển vị và ứng suất của tấm thể hiện trên bảng 3.8 và các đồ thị hình 3.43 và 3.47.

Bảng 3.8. Giá trị cực trị của chuyển vị tại điểm tính khi thay đổi h_g

h_g [m]	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w \cdot 10^{-3}$ [m]	$\dot{w} \cdot 10^{-2}$ [m/s]	\ddot{w} [m/s ²]	$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m ²]	$\varepsilon_y \cdot 10^{-6}$
0,003	7,419	34,231	46,274	16,253	8,467
0,004	7,190	31,609	41,995	17,205	8,326
0,005	6,923	31,970	36,832	16,991	8,317
0,006	6,700	30,985	31,889	15,976	8,299
0,007	6,188	27,540	29,467	16,293	8,221



Hình 3.43. Đáp ứng chuyển vị w^A

Hình 3.49. Đáp ứng ứng suất σ_y^B

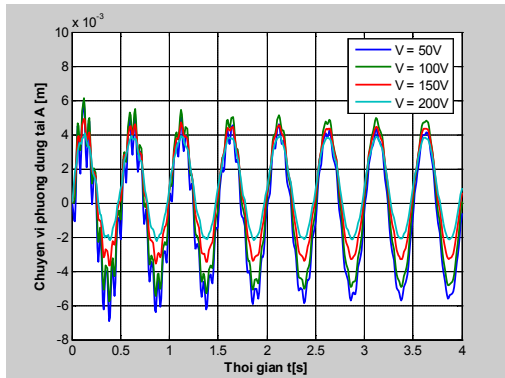
Nhận xét: Khi tỷ số h_g/b_g tăng thì giá trị lớn nhất về chuyển vị, vận tốc và gia tốc tại điểm tính đều giảm, trong khi ứng suất và biến dạng tại điểm tính thay đổi không rõ quy luật. Với thông số khảo sát của bài toán, có thể nhận thấy chiều cao gân từ 5 mm đến 7 mm là phù hợp.

3.3.8. Ảnh hưởng của điện áp V áp đặt lên lớp áp điện

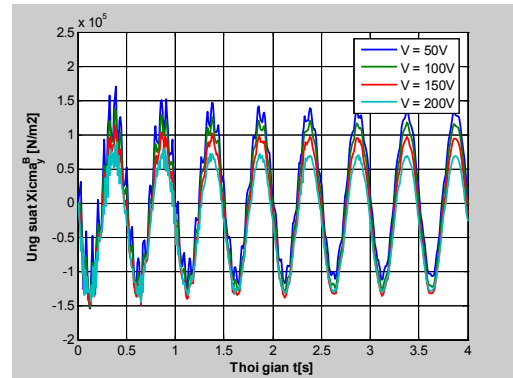
Tác giả tiến hành khảo sát bài toán với điện áp đặt lên tấm áp điện V thay đổi từ 50V đến 200V. Kết quả sự biến thiên về chuyển dịch lớn nhất tại điểm A và biến thiên về ứng suất pháp lớn nhất tại điểm B thể hiện như bảng 3.9 và các đồ thị hình 3.53, 3.56.

Bảng 3.9. Giá trị cực trị của chuyển vị tại điểm tính khi thay đổi V

V (Vol)	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w \cdot 10^{-2}$ [m]	$\dot{w} \cdot 10^{-2}$ [m/s]	\ddot{w} [m/s ²]	$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m ²]	$\varepsilon_y \cdot 10^{-6}$
50	6,923	31,970	36,832	16,991	8,317
100	5,776	19,936	15,003	15,299	6,758
150	4,928	17,666	14,673	14,988	5,891
200	4,103	15,897	14,053	14,498	5,125



Hình 3.53. Đáp ứng chuyển vị w^A



Hình 3.56. Đáp ứng ứng suất σ_y^B

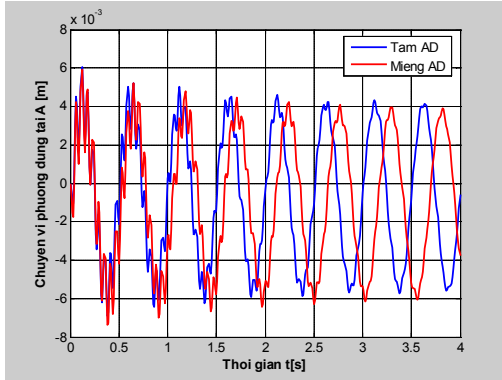
Nhận xét: Điện áp áp đặt lên lớp áp điện có tác dụng làm giảm dao động của tấm, cụ thể khi điện áp tăng biên độ dao động của tấm giảm. Điều này cho thấy khả năng điều khiển, tăng độ cứng của tấm composite áp điện có gân gia cường bằng vật liệu áp điện.

3.3.9. Ảnh hưởng của kích thước tấm áp điện

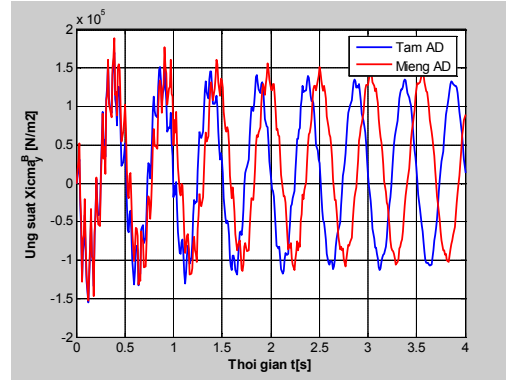
Xem xét bài toán với việc thay 2 tấm áp điện phía trên và phía dưới tấm composite như đã xét bằng 2 miếng áp điện giống nhau, bố trí tại mặt trên và mặt dưới đối xứng qua mặt phẳng trung bình tấm, chiều dày mỗi miếng như lớp áp điện trong tấm composite áp điện đã xét, miếng áp điện có chiều rộng bằng chiều rộng tấm composite, chiều dài bằng 2/3 chiều dài tấm composite. Kết quả, sự biến thiên về chuyển vị lớn nhất tại điểm A và ứng suất pháp lớn nhất tại điểm B thể hiện như bảng 3.10 và đồ thị hình 3.58 và 3.61.

Bảng 3.10. Giá trị lớn nhất của các đại lượng khi thay đổi kích thước áp điện

Trường hợp	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w \cdot 10^{-3}$ [m]	$\dot{w} \cdot 10^{-2}$ [m/s]	\ddot{w} [m/s ²]	$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m ²]	$\varepsilon_y \cdot 10^{-6}$
Tấm AD	6,923	31,970	36,832	16,991	8,317
Miếng AD	7,379	36,169	48,777	18,862	9,373



Hình 3.58. Đáp ứng chuyển vị w^A



Hình 3.61. Đáp ứng ứng suất σ_y^B

Nhận xét: Kích thước lớp áp điện có tác dụng tăng “cứng” cho tấm, điều này thể hiện qua các đáp ứng chuyển vị, vận tốc, gia tốc và ứng suất tại các điểm tính, các giá trị này đều giảm khi diện tích lớp áp điện tăng.

3.3.10. Ảnh hưởng của tính chất cản

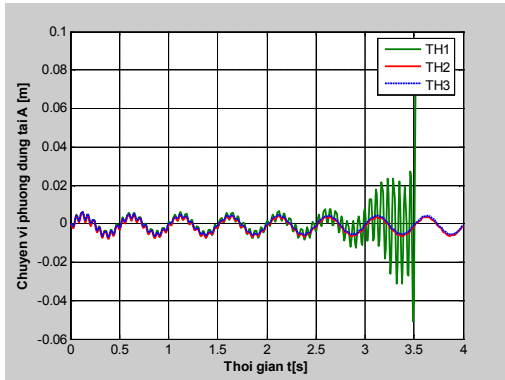
Xét 3 trường hợp:

- Trường hợp 1 (TH1): Chỉ kể đến cản áp điện, không kể đến cản kết cấu ($\xi = 0$), gọi là *cản áp điện*;
- Trường hợp 2 (TH2): Chỉ kể đến cản kết cấu, không kể đến cản áp điện ($G_v = 0$), gọi là *cản kết cấu*;
- Trường hợp 3 (TH3): Kể đến tổng cản (cản kết cấu, cản áp điện) – như bài toán xuất phát mục 3.2 đã trình bày ở trên, gọi là *tổng cản*;

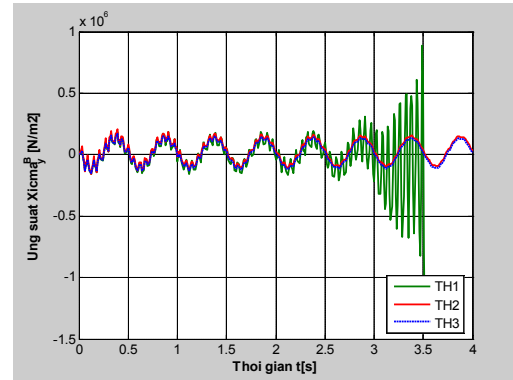
Kết quả sự biến thiên chuyển vị, vận tốc, gia tốc tại điểm tính (điểm A và B) thuộc tấm thể hiện như bảng 3.11 và các hình 3.63 và 3.66.

Bảng 3.11. Giá trị cực trị của chuyển vị tại điểm tính khi thay đổi khi thay đổi thành phần lực cản

Tính chất cản	Chuyển vị	Vận tốc	Gia tốc	Ứng suất	Biến dạng
	$w \cdot 10^{-3}$ [m]	$\dot{w} \cdot 10^{-2}$ [m/s]	\ddot{w} [m/s ²]	$\sigma_y \cdot 10^4$ [N/m ²]	$\varepsilon_y \cdot 10^{-6}$
TH1	Biên độ tăng dần theo thời gian				
TH2	8,068	44,514	61,654	20,605	10,666
TH3	6,923	31,970	36,832	16,991	8,317



Hình 3.63. Đáp ứng chuyển vị w^A



Hình 3.66. Đáp ứng ứng suất σ_y^B

Nhận xét: Với bài toán khảo sát, khi xét đến cả kết cấu và đặc biệt khi phối hợp giữa cả áp điện và kết cấu (tổng cả) thì tâm dao động bình ổn, trong khi nếu quan niệm chỉ kể đến cả áp điện thì dao động của tâm với biên độ tăng dần theo thời gian, tâm có hiện tượng mất ổn định.

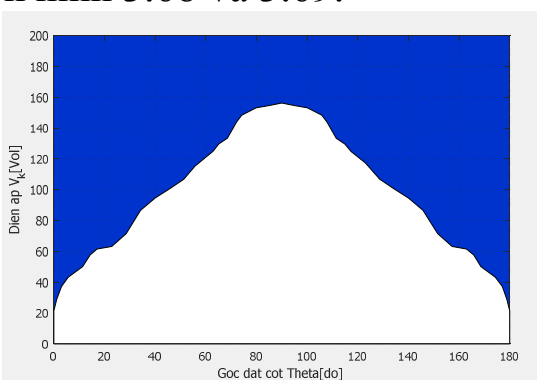
3.3.11. Miền ổn định của tấm khi các tham số thay đổi

Miền ổn định trong trường hợp 2 tham số thay đổi là tập hợp tất cả các điểm trên mặt phẳng tọa độ mà mỗi trục thể hiện sự biến thiên của một tham số lựa chọn. Giải bài toán khi thay đổi giá trị của tham số này, còn tham số kia không thay đổi, sẽ nhận được một điểm trên mặt phẳng tọa độ được tô màu đậm (nếu là hệ ổn định), để trống (nếu là hệ mất ổn định). Khảo sát bài toán xuất phát với 2 trường hợp:

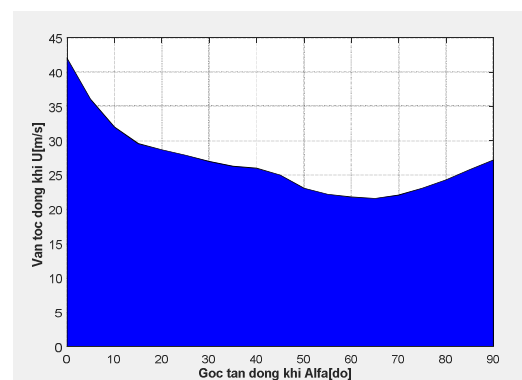
TH1: Góc đặt cột θ và điện áp áp đặt V thay đổi, trong đó θ biến thiên từ 0° đến 180° và V biến thiên từ $0V$ đến $150V$;

TH2: Góc tới α của dòng khí và vận tốc dòng khí U thay đổi, trong đó α biến thiên từ 0° đến 90° và U biến thiên từ $0m/s$ đến $50m/s$.

Kết quả miền ổn định của tấm cho 2 trường hợp được thể hiện như trên hình 3.68 và 3.69.



Hình 3.68. Miền ổn định và mất ổn định của tấm theo θ và V



Hình 3.69. Miền ổn định và mất ổn định của tấm theo α và U

Nhận xét: Từ miền ổn định cho thấy, cho phép xác định được các giá trị hợp lý của góc đặt cột cho lớp composite và điện thế áp đặt lên lớp áp

điện hoặc lựa chọn cặp giá trị của góc tấn và vận tốc gió hợp lý để điều khiển khả năng ổn định của tấm một cách chủ động.

3.4. Kết luận chương 3

- Khảo sát số trên nhiều lớp bài toán tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động, trong đó các thông số vật liệu, kết cấu, liên kết thay đổi. Kết quả khảo sát số cho thấy ảnh hưởng đáng kể của tốc độ dòng khí, tính chất áp điện, tỷ lệ giữa bề rộng và chiều dày tấm,..đến khả năng dao động và ổn định của tấm. Qua đó xác định được tốc độ gió tới hạn để có giải pháp về kết cấu cho phép điều khiển dao động và ổn định của tấm khi chịu tác dụng của lực khí động. Ngoài ra, xây dựng miền ổn định cho tấm với hai cặp thông số: θ - V ; U - α để lựa chọn các thông số tối ưu trong điều khiển dao động của tấm một cách chủ động và tính toán kết cấu tấm cho phù hợp với lực khí động từng điều kiện cụ thể.

- Các số liệu, nhận xét có tác dụng định hướng nghiên cứu đáp ứng động lực học, ổn định của kết cấu tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động áp dụng trong các lĩnh vực kỹ thuật.

CHƯƠNG 4

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

4.1. Đặt vấn đề

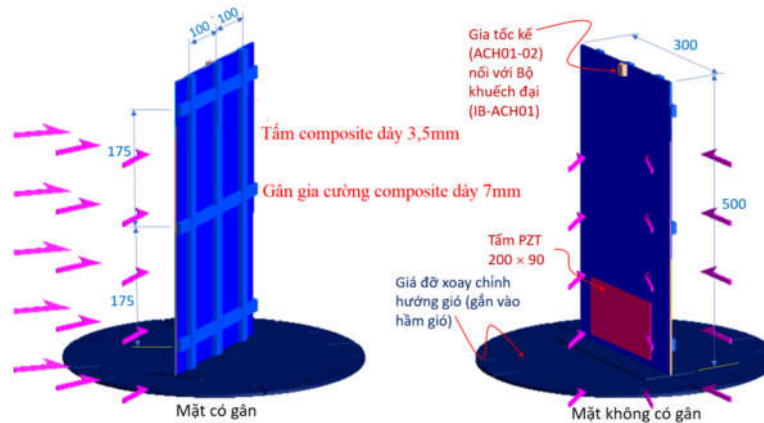
Trong chương này tác giả luận án tiến hành nghiên cứu bằng thực nghiệm nhằm xác định phản ứng động của tấm composite có miếng áp điện chịu tác dụng của lực khí động. Với các kết quả thực nghiệm thu được, tác giả sẽ tiến hành so sánh với kết quả tính toán lý thuyết bởi chương trình tính đã lập trong chương 2 nhằm góp phần khẳng định tính phù hợp của thuật toán và độ tin cậy của chương trình đã lập.

4.2. Mô tả thí nghiệm

4.2.1. Thiết lập thí nghiệm

Tấm composite có kích thước: 500x300x3,5 mm ($a \times b \times h$), tấm được gia cường bởi 3 gân dọc (500x7mm) và 3 gân ngang (300x7mm) trục giao nhau và song song với các cạnh của tấm. Tấm và gân có cùng loại vật liệu composite Graphite/Epoxy T300/976. Trên tấm có dán miếng áp điện PZT phía mặt không có gân. Tấm được liên kết ngàm một cạnh ngắn trên khung giá đỡ chuyên dụng có thể xoay chỉnh theo hướng gió tương ứng với các góc α . Giá đỡ có thể xem như cứng tuyệt đối.

- Miếng áp điện loại PZT có kích thước 200x90x0,1 mm.



Hình 4.1. Thiết lập mô hình thí nghiệm

Thông số vật liệu làm mô hình thí nghiệm như sau:

- Tấm và gân composite Graphite/Epoxy T300/976: $E_1 = 178,2$ GPa; $E_2 = 9,78$ GPa; $G_{12} = G_{13} = 7,25$ GPa; $G_{23} = 2,51$ GPa; $\nu = 0,34$; $\rho = 1600$ kg/m³.

- Tấm áp điện PZT G-1195N: $E = 63,0$ GPa; $G = 24,2$ GPa; $\nu = 0,3$, $\rho = 7600$ kg/m³; $d_{31} = d_{32} = 2.54 \times 10^{-10}$ m/V; $p_{11} = p_{22} = p_{33} = 15 \times 10^{-9}$ F/m.

4.2.2. Thiết bị đo đáp ứng động

Để xác định gia tốc và biến dạng của tấm, tác giả sử dụng cảm biến gia tốc và tấm piezo PZT liên kết trực tiếp lên tấm, tại vị trí cần đo (Hình 4.1).

4.2.3. Bộ phát tín hiệu chuẩn OG-422A

Bộ phát tín hiệu chuẩn là thiết bị phát điện áp (V) dạng hình sine và cho phép thay đổi điện áp (V) với tần số điều chỉnh tùy chọn.

4.2.4. Bộ khuếch đại piezo tuyến tính EPA-104-230

Bộ khuếch đại này dùng điều chỉnh điện áp vào, ra của tấm áp điện.

4.2.5. Bộ thu nhận dữ liệu 2 kênh áp điện HnB75B

Bộ thu nhận dữ liệu 2 kênh áp điện HnB75B cho phép thu nhận tín hiệu đo tương tự và chuyển đổi sang tín hiệu số theo thời gian thực.

4.2.6. Máy hiện sóng (oscilloscope)

Máy hiện sóng ký hiệu GWinstek GDS-2104 có chức năng ghi lại đáp ứng gia tốc của tấm tại điểm đo và lưu trữ dữ liệu vào máy tính.

4.2.7. Thiết bị tạo gió:

Thiết bị tạo gió (hầm gió hở) sử dụng động cơ 22 kw để tạo gió trong buồng thử có kích thước là 1000x1000 mm. Tốc độ thổi gió lớn nhất đạt 15m/s.

4.3. Phương pháp xác định gia tốc, biến dạng của kết cấu

4.3.1. Đo gia tốc:

Để đo gia tốc dao động tại vị trí nào đó thuộc tấm, tiến hành gắn đầu đo gia tốc cố định tại điểm cần đo, trong đó tùy theo phương gia tốc cần đo, đầu đo gia tốc được gắn vào kết cấu sao cho phương trục đầu đo trùng với phương cần đo gia tốc. Theo đó, dưới tác dụng của lực khí động, tấm

dao động và đồng thời đầu đo gia tốc dao động theo, tín hiệu đáp ứng gia tốc theo thời gian được truyền về khối thu, phân tích dữ liệu đo. Ứng với mỗi lần đo, tương ứng với một đầu đo ta có được bộ số liệu thể hiện đáp ứng gia tốc theo thời gian tại vị trí gắn đầu đo gia tốc.

4.3.2. Đo biến dạng:

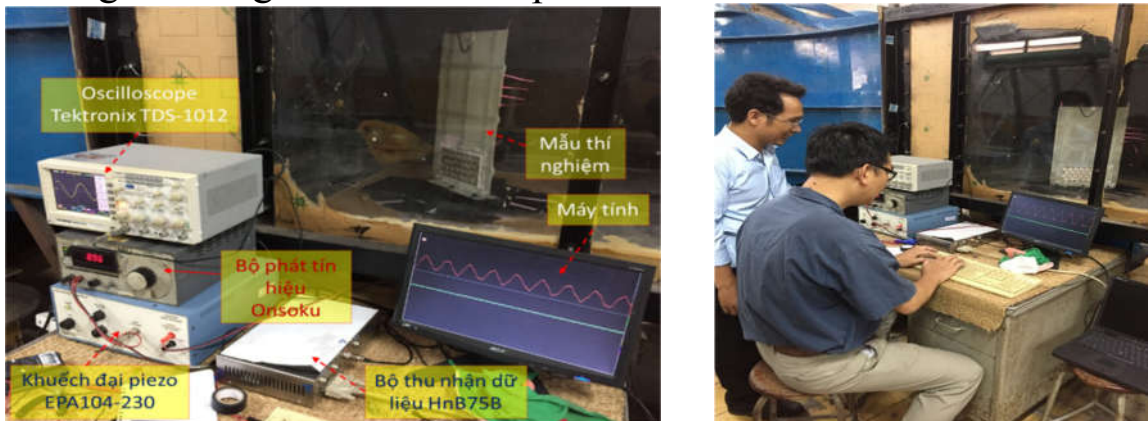
Để có được biến dạng tại một điểm trên tấm, cần dán tấm điện trở đo biến dạng tại vị trí đo. Dưới tác dụng của lực khí động, tấm bị biến dạng sẽ làm cho tấm PZT biến dạng theo, tín hiệu cơ học này được chuyển thành tín hiệu số và truyền về khối thu, xử lý tín hiệu của máy đo, kết quả có được bộ số liệu đáp ứng biến dạng theo thời gian tại điểm đo.

4.4. Cơ sở phân tích và xử lý kết quả thí nghiệm

Việc thu thập, tích hợp số liệu (đáp ứng gia tốc, biến dạng theo thời gian) của mỗi lần thí nghiệm được môđun lưu trữ, xử lý có trong bộ thiết bị đo, đây là bộ số liệu thống kê cho 01 lần đo. Để có được kết quả đo đại diện, cần phải xử lý thống kê từ n lần đo, điều này được tác giả luận án thực hiện trên cơ sở của lý thuyết xử lý số liệu xác suất thống kê.

4.5. Thí nghiệm và kết quả thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm 05 lần đo ($n = 5$) để xác định được bộ số liệu đáp ứng gia tốc theo thời gian. Sau khi xử lý số liệu theo phương pháp thống kê bằng phần mềm DAS-100A chuyên dụng, ta có được đáp ứng theo thời gian của gia tốc và điện áp ra tại vị trí đo.



Hình 4.11. Bố trí thiết bị đo và thí nghiệm thực tế

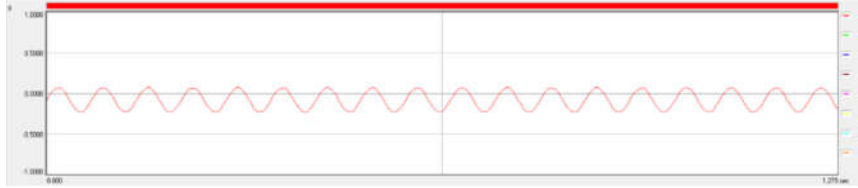
Kết quả đo:

TH1. Tấm ở góc 0° , vận tốc gió $U = 5\text{m/s}$ và 10m/s , điện áp kích $V_{in} = 9.30\text{V}$ (đỉnh), tần số kích thích $f = 6,944\text{Hz}$, $K_{amp} = 20$, tần số lấy mẫu $f_{samp} = 1000\text{ Hz}$. Điện áp cấp 186.0 V .

TH2. Tấm lệch góc $22,5^\circ$, vận tốc gió $U = 5\text{m/s}$ và 10 m/s . Điện áp kích thích $V_{in} = 9,50\text{ V}$ (đỉnh), tần số kích thích $f = 6.981\text{Hz}$, $K_{amp} = 20$, tần số lấy mẫu $f_{samp} = 1000\text{Hz}$. Điện áp cấp 190.0 V .

TH3. Tấm lạch góc 45^0 , vận tốc gió $U = 5\text{m/s}$ và 10m/s . Điện áp kích $V_{in} = 9,20\text{V}$, tần số kích thích $f = 6,993\text{Hz}$, $K_{amp} = 20$, tần số lấy mẫu $f_{samp} = 1000\text{Hz}$. Điện áp cấp $184,0\text{V}$.

Kết quả đo đáp ứng gia tốc theo thời gian của 1 lần đo với vận tốc gió $U = 5\text{m/s}$ trong trường hợp thứ nhất (TH1) thể hiện ở hình 4.14 và giá trị Max/Min của đại lượng theo thời gian được thể hiện trong bảng 4.1. Trong luận án tác giả tiến hành đo 5 lần cho mỗi trường hợp khác nhau.

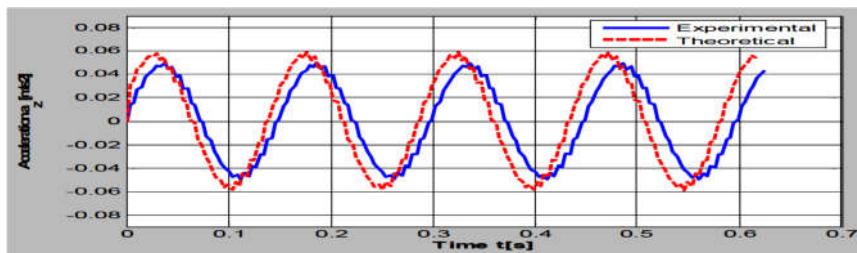


Hình 4.14. Đáp ứng gia tốc theo thời gian trong 1 lần đo

Bảng 4.1. Giá trị Max/Min theo thời gian của đại lượng 1 lần đo

CH		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	Unit
1	MAX	0.07450	0.07390	0.07330	0.07240	0.06980	g
		0.308	0.890	0.745	0.165	0.527	sec
	MIN	-0.23700	-0.23600	-0.23600	-0.23500	-0.23500	g
		0.418	0.780	0.998	0.056	0.199	sec

Kết quả so sánh đáp ứng gia tốc tại điểm đo với $U = 5\text{m/s}$, $\alpha = 45^0$ giữa tính toán lý thuyết của tác giả (chương trình SSP-2018) và thực nghiệm thể hiện trên hình 4.15.



Hình 4.15. Đáp ứng gia tốc tại điểm đo của tấm ($U = 5\text{m/s}$, $\alpha = 45^0$)

Bảng 4.2. Giá trị lớn nhất của gia tốc ($U = 5\text{m/s}$ và góc tấn của gió khác nhau)

Phương pháp	$a^{\max} [\text{m/s}^2]$	α	Sai khác [%]
Thí nghiệm	0,050	45^0	11,8
SSP_2018	0,0559		
Thí nghiệm	0,061	$22,5^0$	10,7
SSP_2018	0,0675		
Thí nghiệm	0,072	0^0	10,1
SSP_2018	0,0793		

Nhận xét: Kết quả nghiên cứu lý thuyết bằng chương trình tính SSP_2018 do tác giả lập và kết quả thí nghiệm đối với đáp ứng gia tốc tại điểm đo thuộc tấm với các góc tấn của hướng gió khác nhau là đồng dạng, với sai số lớn nhất trong 3 trường hợp là 11,8%. Điều này cho thấy thuật toán và chương trình tính SSP_2018 do tác giả lập ở chương 2 là có cơ sở để tin cậy.

4.6. Kết luận chương 4

Qua việc thí nghiệm, tác giả đã rút ra được một số kết luận như sau:

- Đáp ứng gia tốc của tấm khi thực nghiệm có độ trễ so với tính toán lý thuyết là phù hợp với thực tế. Tốc độ gió ảnh hưởng đến dao động của tấm, nhưng khi góc tấn của dòng khí lớn thì dao động của tấm lại nhỏ hơn so với góc tấn nhỏ do tấm đã bị biến dạng và trở nên “cứng” hơn. Ngoài ra, mô hình thí nghiệm chưa giống hoàn toàn so với mô hình tính toán lý thuyết nên có sai số về đáp ứng gia tốc giữa lý thuyết và thực nghiệm (sai số lớn nhất là 11,8%), tuy nhiên, sai số này trong phạm vi chấp nhận được.

- Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và tính toán lý thuyết bằng chương trình tính SSP_2018 trên mô hình tương tự là khá đồng dạng về quy luật cho thấy độ tin cậy của chương trình tính do tác giả lập ở chương 2.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. Những đóng góp mới của luận án:

1, Sử dụng phương pháp PTHH xây dựng thuật toán và chương trình tính SSP_2018 phân tích phi tuyến động lực học của tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của tải trọng khí động, trong đó đã xét đến tính chất cản tổng thể của hệ. Ngoài việc xác định đáp ứng phi tuyến động lực học, thuật toán và chương trình tính còn cho phép xem khả năng mất ổn định của tấm dưới tác dụng của lực khí động. Chương trình tính do tác giả lập đã được kiểm chứng cho thấy đảm bảo tin cậy. Nội dung cơ bản của phần này đã được công bố trong các công trình [1], [3], [4] của tác giả luận án và các cộng sự.

2, Khảo sát số trên nhiều lớp bài toán với các thông số kết cấu, tải trọng, tính chất cản, liên kết, điện áp,.. và đưa ra các nhận xét, đánh giá định lượng có ý nghĩa khoa học và thực tiễn trong lĩnh vực kỹ thuật. Xây dựng được miền ổn định động của tấm, cho phép lựa chọn các cặp thông số hợp lý để tăng khả năng ổn định và giảm dao động cho tấm. Nội dung được công bố trong các công trình [2], [5] của tác giả và các cộng sự.

3, Bộ số liệu thực nghiệm nghiên cứu đáp ứng động lực học của kết cấu tấm composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động do góp phần khẳng định sự phù hợp của thuật toán và độ tin cậy của chương trình tính do tác giả đã lập. Nội dung được công bố trong công trình [6] của tác giả và cộng sự.

II. Nhận xét và kiến nghị:

1, Tính toán phi tuyến động lực học cho phép xem xét bài toán ổn định của kết cấu tấm composite gia cường có sự tham gia của các lớp hoặc các miếng áp điện chịu tải trọng động, trong đó có kể đến tính chất cản áp điện, cản kết cấu là vấn đề khó và phức tạp, nhưng qua kết quả của luận án có thể khẳng định tính tin cậy của phương pháp và chương trình tính. Đây là điều kiện tốt cho các nghiên cứu tiếp theo đối với các kết cấu phức tạp hơn như: tấm composite áp điện lượn sóng, kết cấu vỏ composite áp điện có gân gia cường phục vụ cho các lĩnh vực kỹ thuật.

2, Ảnh hưởng của tính chất cản, tính chất áp điện, vị trí các miếng áp điện, kích thước gân, góc đặt cốt,..đến sự làm việc của tấm composite áp điện có gân gia cường là khá lớn, hầu hết các đại lượng như chuyển vị, vận tốc, gia tốc của tấm không thay đổi một cách tuyến tính. Cản áp điện kết hợp với cản kết cấu làm giảm dao động của tấm một cách đáng kể nên khi tính toán kết cấu dạng này cần phải kể đến các loại cản trên. Miền ổn định của tấm composite áp điện có gân gia cường khi chịu tải trọng động có ý nghĩa thực tiễn, qua đó có thể đánh giá khả năng ổn định hay không ổn định của kết cấu tấm.

4, Nội dung nghiên cứu của luận án có thể phát triển theo các hướng:

- Phân tích dao động và ổn định của tấm lượn sóng, vỏ composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng đồng thời của tải trọng cơ và nhiệt độ.

- Phân tích dao động và ổn định của tấm composite áp điện lượn sóng, vỏ composite áp điện có gân gia cường chịu tác dụng của lực khí động hay lực khí động và nhiệt độ.

- Nghiên cứu thực nghiệm trên các kết cấu tấm, vỏ composite áp điện có các biện pháp gia cường như: gân, lượn sóng, gấp nếp, v.v..