

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Vũ Anh Tuấn

**NGHIÊN CỨU BỘ THU THẬP NĂNG LƯỢNG ÁP ĐIỆN
KIỂU XÉP CHỖ GẮN TRONG HỆ CƠ HỌC
2 BẬC TỰ DO TUYẾN TÍNH**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT CƠ KHÍ VÀ CƠ KỸ THUẬT**

Ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

Hà Nội - 2024

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học 1: GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh
Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Nguyễn Ngọc Linh

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi giờ', ngày ... tháng năm 2024.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong vài thập kỷ trở lại đây, việc nghiên cứu trong lĩnh vực thu thập năng lượng giúp loại bỏ năng lượng lãng phí có sẵn trong môi trường xung quanh, chẳng hạn như rung động, nhiệt, ánh sáng, bức xạ, gió và nước, thành năng lượng điện thay thế việc sử dụng nguồn điện từ lưới hoặc pin cho các thiết bị điện tử có công suất thấp dùng cho các cảm biến hay các thiết bị đo dùng trong xe cộ, thiết bị công trình hay các bộ phận sinh học nhân tạo đã và đang nhận được quan tâm từ nhiều nhà nghiên cứu.

Một trong những nguồn năng lượng hao phí có thể được thu thập dành cho nhiều các ứng dụng khác nhau đó là rung động từ môi trường xung quanh.

Nhiều thiết kế và phương pháp tiếp cận đã được đề xuất để chuyển đổi năng lượng cơ từ các nguồn rung động trong môi trường sang năng lượng điện dành cho các thiết bị điện tử công suất nhỏ và siêu nhỏ. Nổi bật trong số đó là cơ chế áp điện có nhiều ứng dụng rộng rãi, từ các thiết bị thu thập năng lượng (*piezoelectric energy harvester*, PEH), cho tới cảm biến (*sensor*) hay cơ cấu dẫn động (*actuator*).

Thiết bị thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng (*piezoelectric stack energy harvester* - PSEH) có cấu tạo gồm nhiều lớp gốm áp điện lắp nối tiếp nhau, xen giữa chúng là các điện cực, các điện cực này được nối với một điện trở ngoài (tải). Với đặc điểm cấu tạo như vậy, PSEH cho phép giảm khoảng cách giữa các điện cực và từ đó làm tăng hiệu quả thu thập được năng lượng khi bị biến dạng cơ học so với một khối áp điện có cùng kích thước. Bên cạnh đó, PSEH cũng có khả năng chịu được tải trọng lớn nên có thể ứng dụng cho các đối tượng kết cấu có kích thước lớn. Một số áp dụng điển hình của PSEH có thể kể đến như việc tích hợp với ba lô đeo sau lưng, đế giày, nền đường, hệ thống treo của phương tiện giao thông, đường ray xe lửa, thiết bị giảm chấn...

Trong khoảng thời gian từ năm 2010 trở về trước, các nhà nghiên cứu phần lớn đều sử dụng mô hình cơ học 1 bậc tự do để nghiên cứu các ứng dụng có gắn thiết bị thu thập năng lượng áp điện. Nhược điểm của mô hình cơ học 1 bậc tự do là chỉ hoạt động hiệu quả trong vùng cộng hưởng nên dẫn đến hiệu quả thu thập năng lượng không cao và không phản ánh đúng thực tế của các nguồn dao động. Trong khi đó, các nghiên cứu về sau đã chỉ ra rằng mô hình hệ cơ học 2 bậc tự do có dải tần số làm việc hiệu quả rộng hơn nên phù hợp với các nguồn dao động từ môi trường xung quanh thường có tần số biến thiên theo thời gian hoặc ngẫu nhiên.

Bên cạnh đó, việc tích hợp giảm rung với thu thập năng lượng điện từ rung động ngày càng trở nên hấp dẫn trong những năm gần đây do nhu cầu ngày càng quan trọng trong các ứng dụng khác nhau ngoài thực tế như hệ thống treo của

phương tiện giao thông hay thiết bị giảm chấn. Một thiết bị như vậy được gọi là thiết bị có chức năng kép và hướng nghiên cứu này vẫn đang được phát triển.

Vì vậy, luận án tập trung vào việc nghiên cứu thiết bị có chức năng kép là thiết bị giảm chấn khối lượng tích hợp bộ thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng lắp trên kết cấu chính chịu kích động điều hòa dựa trên mô hình cơ học 2 bậc tự do.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Xây dựng mô hình vật lý và phương pháp phân tích, xác định các tham số cũng như đánh giá hiệu quả giảm dao động kết hợp thu thập năng lượng của thiết bị giảm chấn khối lượng tích hợp bộ thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng lắp trên kết cấu chính chịu kích động điều hòa.

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu: thiết bị giảm chấn khối lượng tích hợp bộ thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng

Phạm vi nghiên cứu: các thông số cơ-điện của hệ thống bao gồm thiết bị giảm chấn khối lượng tích hợp bộ thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng lắp trên kết cấu chính không cần chịu kích động điều hòa.

Phương pháp nghiên cứu: luận án sử dụng phương pháp tiếp cận giải tích để thu được các kết quả lý thuyết là các tham số của đối tượng nghiên cứu. Sau đó tiến hành khảo sát số bằng phần mềm Matlab để minh họa các kết quả lý thuyết đã tìm được trước đó.

4. Nội dung nghiên cứu

Luận án bao gồm phần mở đầu, kết luận, hướng nghiên cứu tiếp theo, danh mục các công trình đã công bố liên quan đến nội dung luận án, danh mục tài liệu tham khảo và 4 chương nội dung.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

Trong chương 1, luận án đã trình bày những vấn đề sau:

- Nghiên cứu tổng quan về vật liệu áp điện và các ứng dụng trong việc thu hồi năng lượng từ rung động cho thiết bị điện tử cầm tay và cấy ghép, cũng như các hệ thống và cảm biến không dây tự cấp nguồn

- Nghiên cứu các ứng dụng thu hồi năng lượng kiểu áp điện từ rung động trong hệ cơ học 2 bậc tự do tuyến tính dành cho các kết cấu chịu tải trọng lớn trong thực tế kỹ thuật, điển hình trong đó là hướng ứng dụng dành cho thiết bị giảm chấn tích hợp thu thập năng lượng áp điện;

- Lựa chọn hướng nghiên cứu của luận án là thiết bị giảm chấn khối lượng TMD tích hợp bộ thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động điều hòa.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN THIẾT BỊ GIẢM CHẤN KHỐI LƯỢNG KIỂU ÁP ĐIỆN XẾP CHỒNG

2.1. Thiết bị giảm chấn khối lượng

2.1.1. Kết cấu chính chịu kích động nền

Xét hệ cơ học được mô tả trên Hình 2.1 bao gồm thiết bị giảm chấn khối lượng (TMD) gắn trên kết cấu chính chịu kích động nền điều hòa $z(t)$.

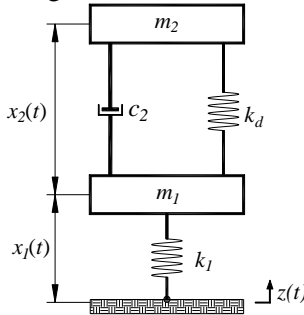
Hệ phương trình vi phân mô tả hệ được viết dưới dạng:

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + k_1 x_1 - k_d x_2 = -m_1 \ddot{z} \quad (2.1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_d x_2 = -m_2 (\ddot{x}_1 + \ddot{z}) \quad (2.2)$$

$$\text{Đặt: } \mu = \frac{m_2}{m_1}, \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_2}}, \xi = \frac{c_2}{2m_2\omega_d}, \beta = \frac{\omega_d}{\omega_1}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_1} \quad (2.3)$$

trong đó, μ là tỷ số khối lượng, ω_1 là tần số tự nhiên của kết cấu chính, ω_d , ξ lần lượt là tần số tự nhiên và hệ số cản của TMD, β là tỷ số tần số tự nhiên; λ là tỷ số của tần số kích động với tần số tự nhiên của kết cấu chính.



Hình 2.1 Mô hình kết cấu chính không cân với TMD chịu kích động nền
Khi đó, hệ phương trình (2.1)-(2.2) được viết dưới dạng:

$$\ddot{x}_1 - 2\mu\omega_d\xi\dot{x}_2 + \omega_1^2 x_1 - \mu\omega_d^2 x_2 = -\ddot{z} \quad (2.4)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\omega_d\xi\dot{x}_2 + \omega_d^2 x_2 = -\ddot{x}_1 - \ddot{z} \quad (2.5)$$

Đến đây, các tham số tối ưu của TMD như tỷ số tần số tự nhiên β và tỷ số cản ξ được xác định bằng phương pháp điểm cố định được đề xuất bởi Den Hartog vào năm 1956, dẫn đến:

$$\beta^* = \frac{\sqrt{2+\mu}}{\sqrt{2(1+\mu)}} \quad (2.6)$$

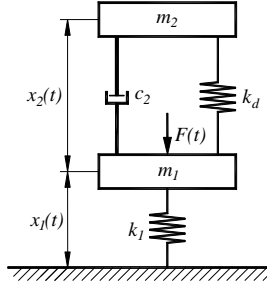
$$\xi^* = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (2.7)$$

2..1.2. Kết cấu chính chịu kích động ngoài

Tiếp theo ta xem xét hệ cơ học được mô tả trên Hình 2.2 bao gồm thiết bị giảm chấn khối lượng (TMD) gắn trên kết cấu chính chịu kích động ngoài điều hòa $F(t)$. Hệ phương trình vi phân mô tả hệ được viết dưới dạng:

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + k_1 x_1 - k_d x_2 = F(t) \quad (2.8)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_d x_2 = -m_2 \ddot{x}_1 \quad (2.9)$$



Hình 2.2 Mô hình kết cấu chính không cân với bộ giảm chấn khối lượng chịu kích động ngoài

Áp dụng phương pháp biên độ phức để giải hệ (2.25) và (2.26), sau đó áp dụng lý thuyết điểm cố định của Den Hartog tương tự như ở mục 2.1.1, ta thu được công thức xác định tỷ số tần số tự nhiên và hệ số cản tối ưu của TMD lắp trên kết cấu chính không cân chịu kích động ngoài là:

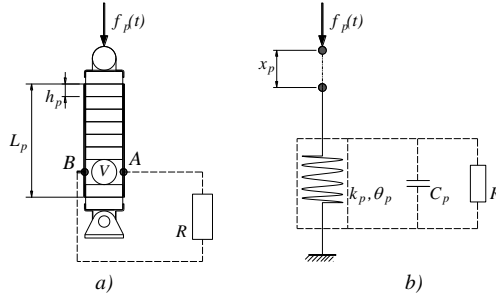
$$\beta_{DH} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2.10)$$

$$\xi_{DH} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (2.11)$$

2.2. Mô hình liên kết cơ điện của cụm áp điện kiểu xếp chồng với thiết bị giảm chấn khối lượng

2.2.1. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng

Kết cấu của một PSEH thông dụng được mô tả ở Hình 2.3a, trong đó phần tử áp điện có n lớp, mỗi lớp có chiều dày h_p , tổng chiều dài là $L_p = nh_p$. Một PSEH chịu tác dụng của lực dọc trục $f_p(t)$, theo hiệu ứng áp điện thuận sẽ tạo ra điện áp $V(t)$ trên điện trở ngoài R và điện tích $q(t)$. Trong việc mô hình hóa PSEH, phần tử áp điện xếp chồng có thể đơn giản hóa là một thanh đàn hồi chịu nén, ảnh hưởng của cản là nhỏ có thể bỏ qua, Hình 2.3b.



Hình 2.3 Mô hình hóa PSEH: a) sơ đồ cấu tạo, b) mô hình cơ điện

Hệ phương trình mô tả mối quan hệ giữa lực tác dụng và điện tích cũng như các thông số của cụm áp điện kiểu xếp chồng được viết dưới dạng:

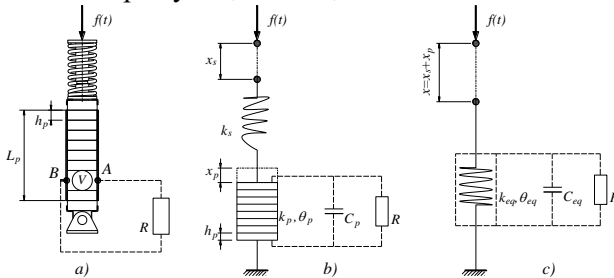
$$f_p(t) = k_p x_p(t) + \theta_p V(t) \quad (2.12)$$

$$q(t) = \theta_p x_p(t) - C_p V(t) \quad (2.13)$$

trong đó
$$k_p = \frac{c_{33} A}{n h_p}, \theta_p = \frac{e_{33} A}{h_p}, C_p = n \frac{\epsilon_{33} A}{t_p} \quad (2.14)$$

2.2.2. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp phần tử đàn hồi

Hình 2.4a mô tả kết cấu cơ khí của PSEH lắp nối tiếp với phần tử đàn hồi là lò xo, chịu tác dụng của lực dọc trục $f(t)$. Trong đó, PSEH có các thông số cơ bản như đã đề cập trong mục 2.2.1, lò xo tuyến tính có độ cứng k_s . Biến dạng của các phần tử áp điện và lò xo lần lượt là x_p và x_s . Mô hình cơ điện của tổ hợp PSEH-lò xo nối tiếp này được thể hiện trên Hình 2.4b.



Hình 2.4 Mô hình của PSEH lắp nối tiếp với lò xo

a) sơ đồ cấu tạo, b) mô hình cơ điện, c) mô hình tương đương.

Hệ phương trình mô tả của PSEH tương đương được viết dưới dạng:

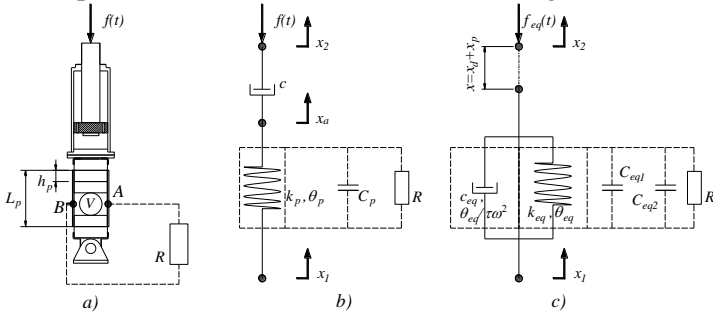
$$f = k_{eq} x + \theta_{eq} V \quad (2.15)$$

$$q = \theta_{eq} x - C_{eq} V \quad (2.16)$$

trong đó
$$k_{eq} = \frac{k_s k_p}{k_s + k_p}, \theta_{eq} = \frac{k_s}{k_s + k_p} \theta_p, C_{eq} = C_p + \frac{\theta_p^2}{k_s + k_p} \quad (2.17)$$

2.2.3. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp phần tử cản

Hình 2.5a mô tả kết cấu cơ khí của PSEH lắp nối tiếp với phần tử cản, chịu tác dụng của lực dọc trục $f(t)$. Trong đó, PSEH có các thông số cơ bản như đã đề cập trong mục 2.1, phần tử cản nhớt tuyến tính có hệ số cản c . Mô hình cơ điện của tổ hợp PSEH-cản nối tiếp này được thể hiện trên Hình 2.5b. Về mặt cơ học PSEH tương đương với một lò xo có độ cứng k_p , nên tổ hợp này tương đương với một phần tử Maxwell với một nút liên kết ở giữa.



Hình 2.5 Mô hình của PSEH lắp nối tiếp với cản
a) sơ đồ cấu tạo, b) mô hình cơ điện, c) mô hình tương đương.

Hệ phương trình mô tả của PSEH tương đương được viết dưới dạng:

$$f = k_{eq}(x_2 - x_1) + c_{eq}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \theta_{eq}V + \frac{\theta_{eq}}{\tau^2 \omega^2} \tau \dot{V} \quad (2.18)$$

$$q = \theta_{eq}(x_2 - x_1) + \frac{\theta_{eq}}{\tau^2 \omega^2} \tau(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - C_{eq1}V + C_{eq2} \tau \dot{V} \quad (2.19)$$

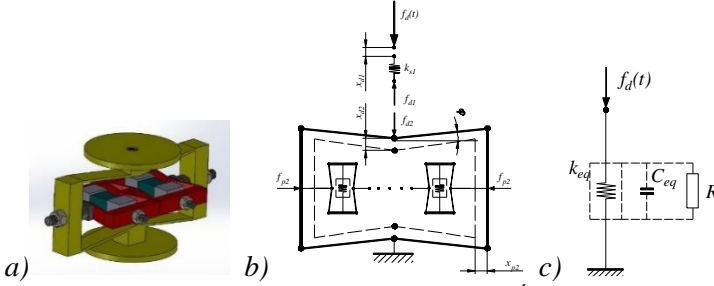
trong đó

$$\tau = \frac{c}{k_p}, k_{eq} = \frac{\tau^2 \omega^2}{1 + \tau^2 \omega^2} k_p, \theta_{eq} = \frac{\tau^2 \omega^2}{1 + \tau^2 \omega^2} \theta_p, \quad (2.20)$$

$$c_{eq} = \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} c, C_{eq1} = C_p + \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} \frac{\theta_p^2}{k_p}, C_{eq2} = \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} \frac{\theta_p^2}{k_p}$$

2.3. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng với khung khuếch đại lực

Khi tổ hợp nhiều cụm PSFAF đơn trong một khung khuếch đại lực chính ta sẽ thu thập được một bộ khung khuếch đại kép có chứa các cụm áp điện kiểu xếp chồng gọi tắt là 2sPSFAF (*Piezoelectric Stack Energy Harvester and Two-stage Force Amplification Frame*) như mô tả trong Bảng sáng chế [109] và Hình 2.6 của luận án này.



Hình 2.6 Mô hình của PSEH với khung khuếch đại lực kép

a) mô hình 3D, b) mô hình vật lý, c) mô hình vật lý tương đương.

Có thể thấy rằng 2sPSFAF có thể được mô hình hóa như một PSEH tương đương với hệ phương trình mô tả như sau:

$$f_{d,2} = k_{FAF}x_{d,2} + \theta_{FAF}V \quad (2.21)$$

$$q = \theta_{FAF}x_{d,2} - C_pV \quad (2.22)$$

$$\text{với } k_{FAF} = \frac{k_{p,i}}{N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi)}, \theta_{FAF} = \frac{\theta_{p,i}}{\cot(\varphi_i) \cot(\varphi)}, V = V_p \cot \varphi \quad (2.23)$$

Vì 2sPSFAF có thể được mô hình hóa như một PSEH tương đương nên liên kết nối tiếp của nó với lò xo có độ cứng k_d được mô tả bởi các phương trình:

$$f_d = k_{eq}x_d + \theta_{eq}V \quad (2.24)$$

$$q = \theta_{eq}x_d - C_{eq}V \quad (2.25)$$

$$\text{trong đó } k_{eq} = \frac{k_d k_{FAF}}{k_d + k_{FAF}}, \theta_{eq} = \frac{k_d}{k_d + k_{FAF}} \theta_{FAF}, C_{eq} = C_p + \frac{\theta_{FAF}^2}{k_d + k_{FAF}} \quad (2.26)$$

Kết luận chương 2

Trong chương 2, luận án đã trình bày:

- Lý thuyết điểm cố định của Den Hartog để làm cơ sở cho việc xác định các tham số tối ưu của TMD.
- Mô hình thiết bị giảm chấn khối lượng TMD lắp trên kết cấu chính không cản chịu kích động nền và kích động ngoài điều hòa. Xác định các tham số tối ưu của mô hình dựa trên lý thuyết điểm cố định của Den Hartog
- Mô hình nghiên cứu cụm áp điện kiểu xếp chồng trong hệ cơ học.
- Các phương án tích hợp cụm áp điện kiểu xếp chồng và khung khuếch đại lực kép với thiết bị giảm chấn khối lượng.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ TỐI ƯU TMD-PSEH DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỂM CỐ ĐỊNH MỞ RỘNG

3.1. TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động nền

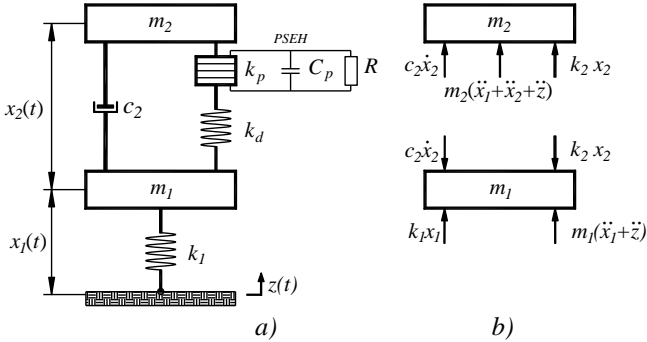
3.1.1. Phân tích đáp ứng của hệ thống chịu kích động nền

Hình 3.1 biểu diễn một hệ kết cấu chính không cân với TMD-PSEH chịu kích động nền $z(t)$. Áp dụng cơ sở lý thuyết ở mục 2.2.1, đối với trường hợp cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với lò xo thì hệ phương trình kết nối cơ điện được viết dưới dạng:

$$f_2 = k_2 x_2 + \theta V \quad (2.27)$$

$$q = \theta x - CV \quad (2.28)$$

trong đó: $k_2 = \frac{k_d k_p}{k_d + k_p}$, $\theta = \frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p$, $C = C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p}$ (2.29)



Hình 3.1 Mô hình kết cấu chính không cân với TMD-PSEH chịu kích động nền
a) mô hình vật lý, b) sơ đồ cân bằng lực.

Hệ phương trình vi phân mô tả cho hệ kết cấu chính không cân với TMD-PSEH chịu kích động nền như sau:

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + k_1 x_1 - k_2 x_2 - \theta V = -m_1 \ddot{z} \quad (2.30)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 + \theta V = -m_2 (\ddot{x}_1 + \ddot{z}) \quad (2.31)$$

$$C \dot{V} + \frac{V}{R} = \theta \dot{x}_2 \quad (2.32)$$

Để xác định các đáp ứng cơ-điện của hệ (2.30)-(2.32), ta đặt:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \mu = \frac{m_2}{m_1}, \xi_2 = \frac{c_2}{2m_2 \omega_2}, \beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_1}, \quad (2.33)$$

$$\kappa^2 = \frac{\theta^2}{k_2 C}, v = \frac{CV}{\theta}, \alpha = \frac{1}{\Omega RC}$$

Sử dụng các phép đặt trong (2.33) thì hệ (2.30)-(2.32) trở thành:

$$\ddot{x}_1 - 2\mu\omega_1\beta\xi_2\dot{x}_2 + \omega_1^2 x_1 - \mu\omega_2^2 x_2 - \mu\omega_2^2 \kappa^2 v = -\ddot{z} \quad (2.34)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\omega_1\beta\xi_2\dot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 + \omega_2^2 \kappa^2 v = -\ddot{x}_1 - \ddot{z} \quad (2.35)$$

$$\dot{v} + \alpha\Omega v = \dot{x}_2 \quad (2.36)$$

Áp dụng phương pháp biên độ phức để giải hệ phương trình ta thu được các hệ số khuếch đại biên độ dao động, biên độ điện áp và công suất trung bình không thứ nguyên của hệ được xác định như sau:

$$K_1 = \frac{a_1}{z_0} = \sqrt{\frac{p_0 + p_1 \xi_2 + p_2 \xi_2^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2}} \quad (2.37)$$

$$\frac{V_0}{z_0} = \frac{\lambda^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2} \quad (2.38)$$

$$P_{av} = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} \frac{V^2 / R}{\omega_1^3 m_1 z_0^2} dt = \frac{1}{2} \frac{\mu \alpha \beta^2 \kappa^2 \lambda^5}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2} \quad (2.39)$$

trong đó

$$\begin{aligned} p_0 &= \lambda^4 \left(\beta^2 (1 + \kappa^2) (1 + \mu) - \lambda^2 \right)^2 + \alpha^2 \lambda^4 \left(\beta^2 (1 + \mu) - \lambda^2 \right)^2 \\ p_1 &= 4\alpha\kappa\beta^3 \lambda^5 (1 + \mu)^2, p_2 = 4\beta^2 \lambda^6 (1 + \alpha^2) (1 + \mu)^2 \\ q_0 &= \alpha^2 \left(\lambda^2 (1 - \lambda^2) + \beta^2 (\lambda^2 (1 + \mu) - 1) \right)^2 \\ &\quad + \left(\lambda^2 (1 - \lambda^2) + \beta^2 (1 + \kappa^2) (\lambda^2 (1 + \mu) - 1) \right)^2 \\ q_1 &= 4\alpha\kappa\lambda\beta^3 (\lambda^2 (1 + \mu) - 1)^2, q_2 = 4\beta^2 \lambda^2 (1 + \alpha^2) (\lambda^2 (1 + \mu) - 1)^2 \end{aligned} \quad (2.40)$$

3.1.2. Tối ưu các tham số của hệ thống chịu kích động nền dựa trên lý thuyết điểm cố định

Hai yêu cầu cơ bản chính để hệ thống TMD-PSEH hoạt động hiệu quả về mặt kỹ thuật đó là triệt tiêu rung động của kết cấu chính và thu thập được càng nhiều năng lượng điện càng tốt.

a) Yêu cầu đầu tiên liên quan đến việc tối ưu hóa độ cứng và giảm chấn của TMD-PSEH, được biểu thị bằng tỷ số tần số β và hệ số giảm chấn ξ_2 . Với yêu cầu này, ta áp dụng phương pháp điểm cố định của Den Hartog để xác định được các tham số tối ưu β_{op} và ξ_{2op} như sau:

$$\begin{aligned} \beta_{op} &= \beta^* \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{1 + \alpha^2 + \kappa^2}} \\ \xi_{2op} &= \sqrt{\frac{\xi_{2(1)}^2 |_{\lambda=\lambda_p} + \xi_{2(2)}^2 |_{\lambda=\lambda_q}}{2}} = \xi_{2op}(\alpha, \mu, \kappa^2) \end{aligned} \quad (2.41)$$

b) Yêu cầu thứ hai là tối ưu hóa công suất điện đầu ra. Với yêu cầu này, ta xem xét phần điện của PSEH được biểu diễn bằng mạch song song điện trở-tụ điện, như trong biểu thức (2.36). Bỏ qua hiệu ứng ghép trên mạch, dưới sự kích

thích bởi nguồn dòng điện hình sin có độ lớn I_0 và tần số Ω thì công suất tiêu tán bởi tải điện trở được tính như sau:

$$P_R = \frac{I_0^2 R}{2(1 + R^2 \Omega^2 C^2)} \quad (2.42)$$

Giải điều kiện $\partial P_R / \partial R = 0$ sử dụng (2.42), ta thấy rằng mạch có công suất đầu ra cực đại ở tải điện trở tối ưu là $R = 1/(\Omega C)$. Khi đó ta có được hệ số điện trở tối ưu cho phần điện là:

$$\alpha_{op} = 1 \quad (2.43)$$

3.2. TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài

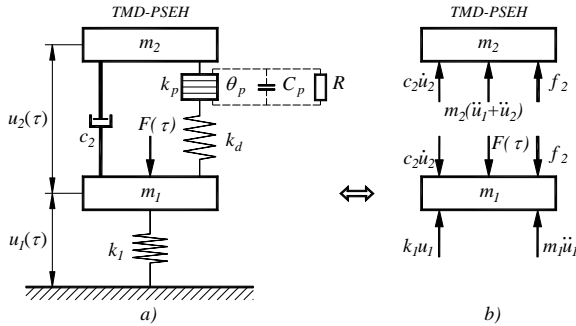
3.1.1. Phân tích đáp ứng của hệ thống chịu kích động ngoài

Hình 3.2 biểu diễn một hệ kết cấu chính không cản với TMD-PSEH chịu kích động ngoài $F(\tau)$. Kết nối điện cơ của tổ hợp nối tiếp PSEH và TMD có thể được suy ra từ mục 2.1.2 như sau:

$$f_2 = k_2 u_2 + \theta V \quad (2.44)$$

$$q = \theta u_2 - CV \quad (2.45)$$

trong đó:
$$k_2 = \frac{k_d k_p}{k_d + k_p}, \theta = \frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p, C = C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p} \quad (2.46)$$



Hình 3.2 Mô hình kết cấu chính không cản với TMD-PSEH chịu kích động ngoài
a) mô hình vật lý, b) sơ đồ cân bằng lực

Hệ phương trình vi phân mô tả cho hệ kết cấu chính không cản với TMD-PSEH chịu kích động ngoài như sau:

$$m_1 \ddot{u}_1 - c_2 \dot{u}_2 + k_1 u_1 - k_2 u_2 - \theta V = F_0 \cos \Omega \tau \quad (2.47)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 + \theta V = -m_2 \ddot{u}_1 \quad (2.48)$$

$$C \dot{V} + \frac{V}{R} - \theta \dot{u}_2 = 0 \quad (2.49)$$

trong đó các dấu chấm phía trên biểu thị đạo hàm theo thời gian τ .

$$\text{Đặt: } \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \mu = \frac{m_2}{m_1}, \xi_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2}, \beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_1}, \quad (2.50)$$

$$\kappa^2 = \frac{\theta^2}{k_2 C}, v = \frac{CV}{\theta}, \alpha = \frac{1}{\Omega RC}$$

và thực hiện các phép biến đổi:

$$t = \omega_1 \tau, u_1 = x_1, \dot{u}_1 = \omega_1 \dot{x}_1, \ddot{u}_1 = \omega_1^2 \ddot{x}_1, u_2 = x_2, \dot{u}_2 = \omega_1 \dot{x}_2, \ddot{u}_2 = \omega_1^2 \ddot{x}_2 \quad (2.51)$$

Khi đó hệ phương trình (2.47)-(2.49) có thể được chuyển đổi thành hệ phương trình không thứ nguyên như sau:

$$\ddot{x}_1 - 2\mu\beta\xi_2\dot{x}_2 + x_1 - \mu\beta^2 x_2 - \mu\beta^2 \kappa^2 v = X_{st} \cos \lambda t \quad (2.52)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2 x_2 + \beta^2 \kappa^2 v = -\ddot{x}_1 \quad (2.53)$$

$$\dot{v} + \lambda\alpha v = \dot{x}_2 \quad (2.54)$$

trong đó các chấm trên biểu thị đạo hàm theo thời gian không thứ nguyên t , X_{st} là độ võng tĩnh của kết cấu chính

$$X_{st} = F_0 / k_1 \quad (2.55)$$

Sử dụng phương pháp biên độ phức ta xác định được các hệ số khuếch đại cơ học và biên độ điện áp được như sau:

$$K_1 = \frac{a_1}{X_{st}} = \sqrt{\frac{p_0 + p_1\xi_2^2 + p_2\xi_2^2}{q_0 + q_1\xi_2^2 + q_2\xi_2^2}} \quad (2.56)$$

$$K_2 = \frac{a_2}{X_{st}} = \lambda^2 \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{q_0 + q_1\xi_2^2 + q_2\xi_2^2}} \quad (2.57)$$

$$V_0 = X_{st} v_0, v_0 = \frac{\lambda^2}{\sqrt{q_0 + q_1\xi_2^2 + q_2\xi_2^2}} \quad (2.58)$$

trong đó

$$p_0 = [\beta^2(1 + \kappa^2) - \lambda^2]^2 + \alpha^2(\beta^2 - \lambda^2)^2, p_1 = 4\alpha\kappa^2\lambda\beta^3, p_2 = 4\lambda^2\beta^2(1 + \alpha^2),$$

$$q_0 = \{(\lambda^2 - 1)[\beta^2(1 + \kappa^2) - \lambda^2] + \mu\lambda^2\beta^2(1 + \kappa^2)\}^2 +$$

$$+ \alpha^2[(\lambda^2 - 1)(\beta^2 - \lambda^2) + \mu\lambda^2\beta^2]^2, \quad (2.59)$$

$$q_1 = 4\alpha\kappa^2\lambda\beta^3[\lambda^2(1 + \mu) - 1]^2, q_2 = 4\lambda^2\beta^2(1 + \alpha^2)[\lambda^2(1 + \mu) - 1]^2$$

3.2.2. Tối ưu các tham số của hệ thống chịu kích động ngoài dựa trên lý thuyết điểm cố định

Khi lắp TMD-PSEH vào kết cấu chính không cản, để hệ thống hoạt động hiệu quả cần đáp ứng hai yêu cầu cơ bản chính như sau:

$$\begin{aligned}
\ddot{x}_1 - 2\mu\beta\xi_2\dot{x}_2 + x_1 - \mu\beta^2x_2 - \mu\beta^2\kappa^2v &= X_{st} \cos \lambda t \\
\ddot{x}_2 + 2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2x_2 + \beta^2\kappa^2v &= -\dot{x}_1 \\
\dot{v} + \lambda\alpha v &= \dot{x}_2
\end{aligned} \tag{2.65}$$

Sử dụng phương pháp biên độ phức ta xác định được các hệ số khuếch đại cơ học K_1, K_2 và hệ số biên độ điện áp v_0 như sau:

$$K_1 = \frac{A_1}{X_{st}} = \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{E_1^2 + E_2^2}} \tag{2.66}$$

$$K_2 = \frac{A_2}{X_{st}} = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{E_1^2 + E_2^2}} \tag{2.67}$$

$$v_0 = \frac{A_3}{X_{st}} = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{E_1^2 + E_2^2}} \tag{2.68}$$

3.3.2. Xác định các tham số của hệ thống

Để nghiên cứu hệ kết cấu chính không cân với TMD-2sPSFAF khi $\kappa^2 \rightarrow 0$ thì các kết quả của TMD cơ học tối ưu thu được theo lý thuyết điểm cố định ở mục 2.1.2 được áp dụng cho β và ξ_2 của TMD-2sPSFAF là:

$$\beta = \beta_{DH} = \frac{1}{1 + \mu} \tag{2.69}$$

$$\xi_2 = \xi_{DH} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \tag{2.70}$$

Từ (2.69) ta có:

$$k_{eq} = \frac{\mu}{(1 + \mu)^2} k_1 \tag{2.71}$$

Thay (2.71) vào công thức đầu tiên của hệ, ta được:

$$k_d = \frac{\mu k_s k_{p,i}}{(1 + \mu)^2 k_{p,i} - \mu N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi) k_s} \tag{2.72}$$

Kết luận chương 3

Dựa trên cơ sở lý thuyết ở chương 2, luận án đã trình bày các vấn đề ở chương 3 như sau:

- Xây dựng mô hình vật lý và thiết lập các phương trình vi phân tương ứng cho hệ thống cơ điện gồm kết cấu chính không cân tích hợp TMD-PSEH chịu kích động nền và kích động ngoài.

- Dựa trên hai yêu cầu kỹ thuật chính là triệt tiêu rung động của kết cấu chính và tăng công suất thu thập năng lượng, các hệ số như tỷ số tần số β_{op} ,

giảm chân ξ_{2op} và tỷ số điện trở tối ưu α_{op} đã được xác định bằng phương pháp giải tích.

- Ở phần cuối, một mô hình thiết bị thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng gắn trong khung khuếch đại lực kép 2sPSFAF đã được xây dựng. Sau đó, hệ phương trình mô tả của hệ thống đã được thiết lập nhằm xác định các đáp ứng cơ điện bằng phương pháp biên độ phức.

CHƯƠNG 4. PHÂN TÍCH DÒNG NĂNG LƯỢNG TRONG TMD-PSEH VÀ KHẢO SÁT SỐ

4.1. Dòng năng lượng và hiệu suất trong TMD-PSEH

4.1.1. Dòng năng lượng chuyển đổi trong TMD-PSEH

Xét mô hình nghiên cứu Hình 3.2, tải điện trở tương đương được sử dụng để thể hiện toàn bộ mô-đun điện thu thập và đưa ra ước tính về năng lượng điện thu thập được.

Năng lượng trên mỗi chu kỳ được định nghĩa là tích phân của công suất trong một khoảng thời gian như sau:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{in} &= \bar{E}_d + \bar{E}_{out} \\ \Leftrightarrow \pi K_1 |-\sin \varphi_1| &= 2\pi\mu\lambda\beta\xi_2 K_2^2 + \pi\mu\beta^2\kappa^2\alpha v_0^2 \end{aligned} \quad (2.73)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \bar{E}_{in} &= X_{st} \int_0^{2\pi/\lambda} \cos \lambda t [-\lambda a_1 \sin(\lambda t + \varphi_1)] dt = \pi X_{st} a_1 |-\sin \varphi_1| = \pi |-\sin \varphi_1| K_1 X_{st}^2, \\ \bar{I}_1 &= \frac{[-\lambda a_1 \sin(\lambda t + \varphi_1)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \bar{I}_2 = \frac{\mu\lambda^2 [-a_1 \sin(\lambda t + \varphi_1) - a_2 \sin(\lambda t + \varphi_2)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \\ \bar{U}_1 &= \frac{[a_1 \cos(\lambda t + \varphi_1)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \bar{U}_2 = \frac{\mu\beta^2 [a_2 \cos(\lambda t + \varphi_2)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \\ \bar{E}_C &= \frac{\mu\beta^2\kappa^2 [V_0 \cos(\lambda t + \varphi_v)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \\ \bar{E}_d &= 2\mu\beta\xi_2 \int_0^{2\pi/\lambda} [-\lambda a_2 \sin(\lambda t + \varphi_2)]^2 dt = 2\pi\mu\lambda\beta\xi_2 a_2^2 = 2\pi\mu\lambda\beta\xi_2 K_2^2 X_{st}^2 \\ \bar{E}_{out} &= \mu\beta^2\kappa^2\lambda\alpha \int_0^{2\pi/\lambda} [V_0 \cos(\lambda t + \varphi_v)]^2 dt = \pi\mu\beta^2\kappa^2\alpha V_0^2 = \pi\mu\beta^2\kappa^2\alpha v_0^2 X_{st}^2 \end{aligned}$$

4.1.2. Công suất và hiệu suất trong TMD-PSEH

Công suất trung bình là lượng năng lượng trung bình thực hiện trong mỗi chu kỳ. Từ đó ta xác định được:

$$\bar{P}_{in} = \frac{\bar{E}_{in}}{2\pi/\lambda} = \frac{\lambda |\sin \varphi_1| X_{st}^2}{2} K_1 = \frac{\lambda |\sin \varphi_1| X_{st}^2}{2} \sqrt{\frac{p_0 + p_1 \xi_2 + p_2 \xi_2^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2}} \quad (2.74)$$

$$\bar{P}_d = \frac{\bar{E}_d}{2\pi/\lambda} = \lambda^2 \mu \beta \xi_2 X_{st}^2 K_2^2 = \lambda^4 \mu \beta X_{st}^2 \frac{(1 + \alpha^2) \xi_2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2} \quad (2.75)$$

$$\bar{P}_{out} = \frac{\bar{E}_{out}}{2\pi/\lambda} = \frac{\mu \beta^2 \kappa^2 \alpha \lambda X_{st}^2}{2} v_0^2 = \frac{\mu \alpha \beta^2 \kappa^2 \lambda^5 X_{st}^2}{2(q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2)} \quad (2.76)$$

Hiệu suất của chuyển đổi cơ-điện có thể được tính bằng tỷ số giữa công suất đầu ra và công suất đầu vào trung bình [101], [115], [116]. Từ đó ta tính được như sau:

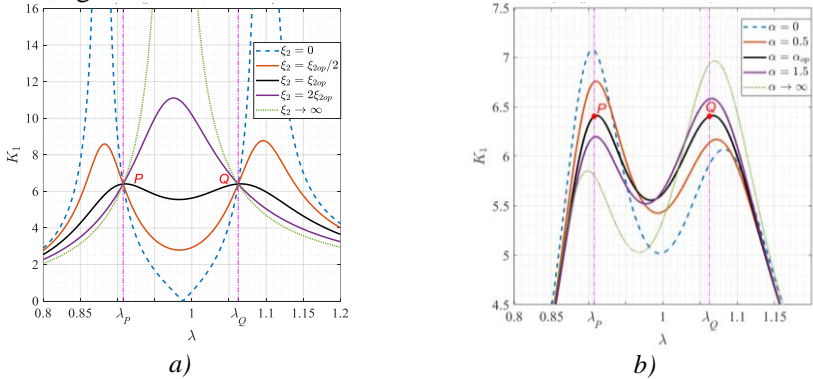
$$\eta = \frac{\mu \beta^2 \kappa^2 \alpha v_0^2}{|\sin \varphi_1| K_1} = \frac{\mu \alpha \beta^2 \kappa^2 \lambda^4}{|\sin \varphi_1| \sqrt{(p_0 + p_1 \xi_2 + p_2 \xi_2^2)(q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2)}} \quad (2.77)$$

4.2. Khảo sát số hệ TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động nền

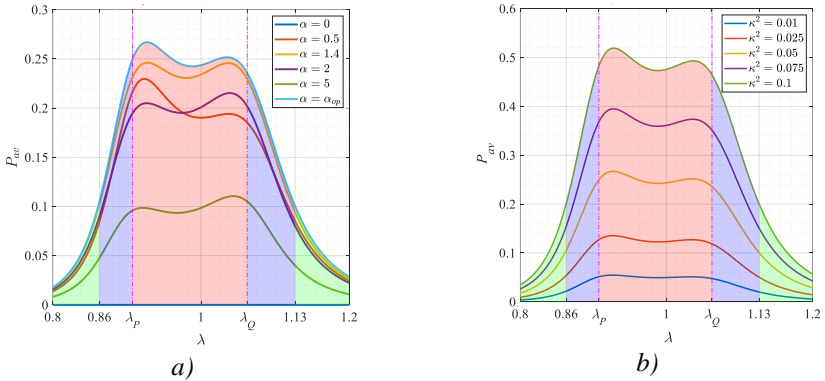
Mục này tiến hành khảo sát số đối với kết cấu chính không cân lắp TMD-PSEH chịu kích động nền với các tham số như sau:

$$\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.05, \alpha = \alpha_{op} = 1, \beta = \beta_{op}$$

Hình 4.1a mô tả các đường cong $K_1(\lambda)$ với năm giá trị của hệ số cản ξ_2 . Rõ ràng, đường cong với $\xi_2 = \xi_{2op}$ có các đỉnh thấp nhất so với các đường cong cả 4 giá trị còn lại. Hình 4.1b mô tả các đường cong $K_1(\lambda)$ với $\xi_2 = \xi_{2op}$ và năm giá trị của α . Trường hợp này tương ứng với việc điều chỉnh điện trở ngoài R khi sử dụng TMD-PSEH.



Hình 4.1 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của kết cấu chính theo λ
a) Khi ξ_2 thay đổi, b) Khi α thay đổi



Hình 4.2 Đồ thị mô tả công suất đầu ra trung bình theo biến λ
 a) Khi α thay đổi; b) Khi κ^2 thay đổi

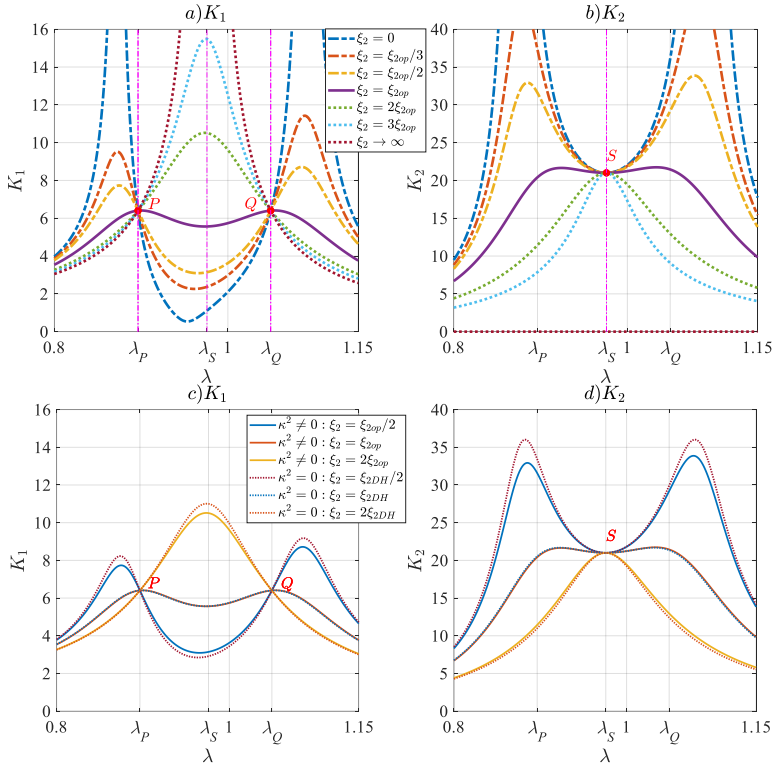
Hình 4.2a mô tả công suất đầu ra trung bình $P_{av}(\lambda)$ của TMD-PSEH với β_{op}, ξ_{2op} và các giá trị khác nhau của α . Rõ ràng, đường cong với $\alpha = 1$ là đường cong bao trùm và thể hiện lượng năng lượng thu thập được lớn nhất trong một khoảng thời gian. Hình 4.2b mô tả TMD-PSEH với $\beta_{op}, \xi_{2op}, \alpha_{op}$ với κ^2 biến thiên. Rõ ràng, giá trị của κ^2 càng cao thì giá trị của P_{av} càng lớn.

4.3. Khảo sát số hệ TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài

Mục này tiến hành khảo sát số về hệ thống TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính không cản chịu kích động ngoài. Các tham số ban đầu được lấy là $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.05$.

Hình 4.3a,b mô tả hệ số phóng đại K_1, K_2 cùng với trực tần số λ . Ta thấy rằng đường cong K_1 có hai điểm cố định $P(\lambda_p, K_{1p}), Q(\lambda_Q, K_{1Q})$ không phụ thuộc vào hệ số giảm chấn, trong khi đường cong K_2 cũng có một điểm cố định $S(\lambda_S, K_{2S})$. Các giá trị β_{op} và ξ_{2op} giữ cho hai đỉnh có độ lớn bằng nhau của đường cong K_1 luôn thấp hơn khi so sánh với các giá trị không tối ưu.

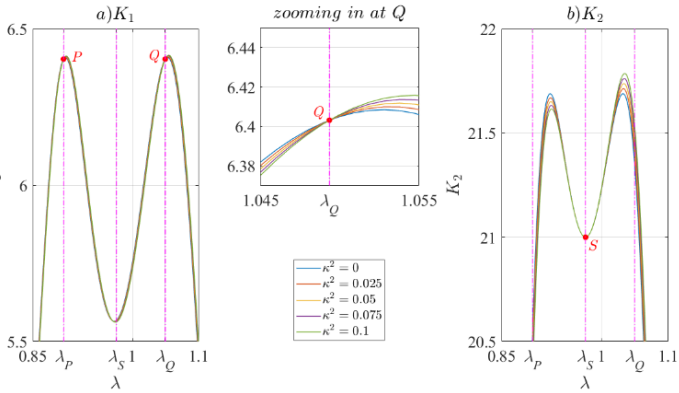
Ngoài ra, khi so sánh với kết cấu chính không cản trở tương tự lắp một TMD cơ học tối ưu (tức là khi $\kappa^2 = 0, \beta_{op} = \beta_{DH}, \xi_{2op} = \xi_{DH}$), như được minh họa trong Hình 4.3c và Hình 4.3d. Qua đồ thị ta thấy rằng các đường cong K_1 và K_2 của TMD-PSEH thì khác với các đường cong K_1 và K_2 của TMD cơ học khi các giá trị của β và ξ_2 là không tối ưu, nhưng gần như trùng khớp với nhau cho các giá trị tối ưu của β và ξ_2 .



Hình 4.3 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của hệ theo biến λ với $\mu = 0.05, \alpha = \alpha_{op}$ và ξ_2 thay đổi

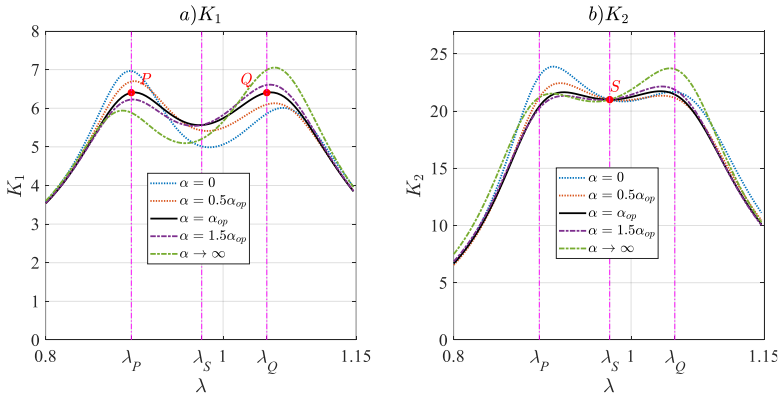
a) $K_1(\kappa^2 = 0.05)$, b) $K_2(\kappa^2 = 0.05)$, c) $K_1(\kappa^2 = 0)$, d) $K_2(\kappa^2 = 0)$

Hình 4.4 và Hình 4.5 mô tả ảnh hưởng của các thông số κ^2 và α lên K_1 và K_2 khi tần số biến thiên. Trong Hình 4.4, các giá trị của μ, α không thay đổi, nhưng các giá trị của β_{op} và ξ_{2op} được coi là thay đổi theo κ^2 . Nói cách khác, vật liệu áp điện khác nhau có dẫn đến đến tỷ số tần số và hệ số giảm chấn tối ưu khác nhau. Mặc dù sự biến thiên của κ^2 ít ảnh hưởng đến cả biên độ K_1 và K_2 do giá trị nhỏ của nó, nhưng điều đáng chú ý là K_1 có hai điểm cố định độc lập với κ^2 và K_2 cũng có một điểm cố định như vậy, các điểm đó lần lượt là $P(\lambda_p, K_{1p}), Q(\lambda_Q, K_{1Q})$ và $S(\lambda_S, K_{2S})$.



Hình 4.4 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của hệ theo biến λ với $\mu=0.05, \alpha=\alpha_{op}$ và κ^2 thay đổi

a) K_1 , b) K_2



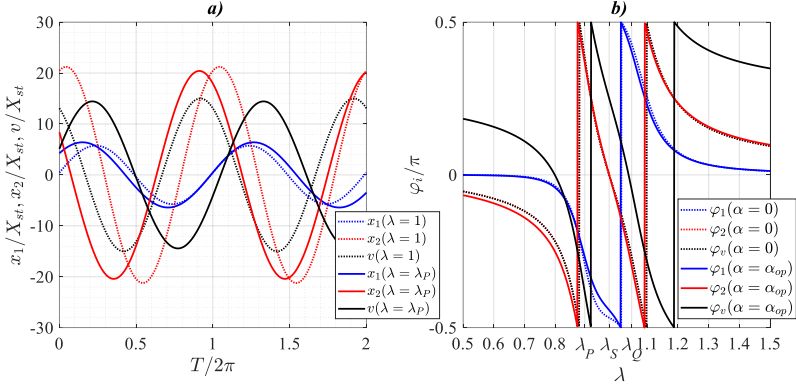
Hình 4.5 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của hệ theo biến λ với $\mu=0.05, \kappa^2=0.05$ và α thay đổi

a) K_1 , b) K_2

Trong Hình 4.5, các giá trị của μ, κ^2 không thay đổi, các giá trị của β_{op} và ξ_{2op} thay đổi theo α . Dễ thấy rằng, bất kỳ sự thay đổi nào về giá trị của α sai lệch so với α_{op} đều dẫn đến một trong hai đỉnh cao hơn đỉnh kia.

Hình 4.6a mô tả sự biến thiên theo thời gian của các đáp ứng chuyển vị và điện áp trong khoảng tỷ số tần số $\lambda=[1, \lambda_p]$. Các phản hồi có dạng hình sin với khoảng thời gian là $2\pi/\lambda$. Hình 4.6b cho thấy góc pha giữa x_1, x_2, v và kích động ở các tỷ số tần số khác nhau đối với hai giá trị tới hạn của $\alpha=[0, \alpha_{op}]$. Qua

đồ thị có thể thấy rằng, luôn có độ lệch pha lớn giữa x_1 và x_2 , dẫn đến sự tiêu tán năng lượng lớn do lực quán tính của TMD-PSEH gây ra.



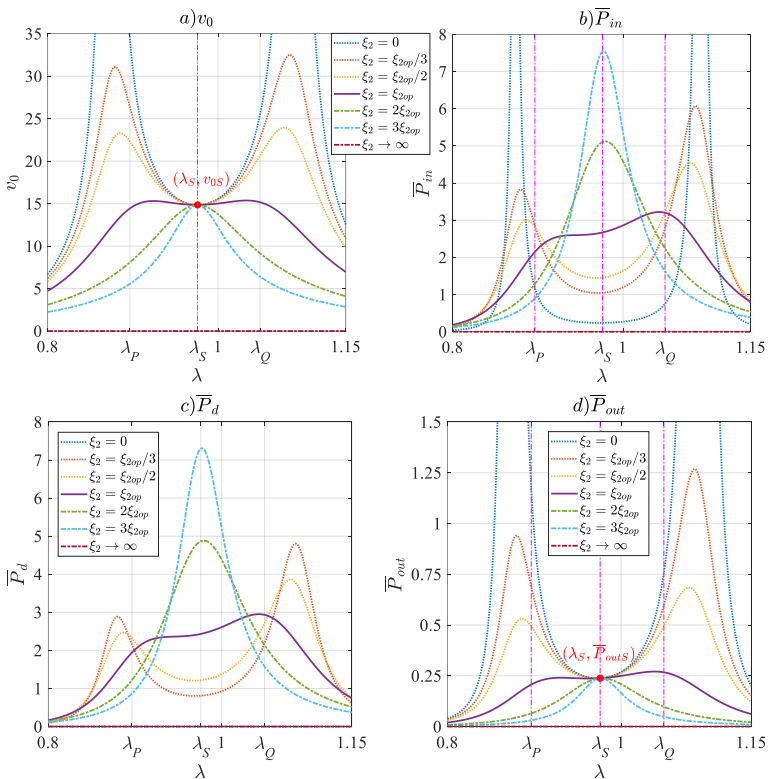
Hình 4.6 Đồ thị mô tả đáp ứng của chuyển vị và điện áp
a) chuyển vị và điện áp theo biến thời gian, b) biểu đồ pha theo tần số thay đổi

4.4. Khảo sát số phân tích dòng năng lượng và hiệu suất

Hình 4.7 mô tả biên độ điện áp không thứ nguyên v_0 và công suất trung bình $\bar{P}_{in}, \bar{P}_d, \bar{P}_{out}$ với sự biến thiên tần số. Rõ ràng rằng v_0 và \bar{P}_{out} có một điểm cố định không phụ thuộc vào hệ số cản ở $\lambda = \lambda_S$, trong khi \bar{P}_{in} và \bar{P}_d không có điểm cố định như vậy. Giống như đường cong K_2 , cả hai đường cong v_0, \bar{P}_{out} liên quan đến $\xi_2 = \xi_{2op}$ đều có hai đỉnh với chiều cao khá bằng nhau xuất hiện ở vùng lân cận của λ_p, λ_Q . Trong khi đó, các đường cong \bar{P}_{in} và \bar{P}_d cũng có hai đỉnh xuất hiện xung quanh λ_p, λ_Q . Cần lưu ý rằng tại các giá trị tới hạn của ξ_2 thì $v_0 \rightarrow \infty, \bar{P}_{in} \rightarrow \infty, \bar{P}_d = 0, \bar{P}_{out} \rightarrow \infty$ khi $\xi_2 \rightarrow 0$ và $v_0 = \bar{P}_d = \bar{P}_{out}$ khi $\xi_2 \rightarrow \infty$ vì hai khối lượng rung động “lồng vào nhau”. Do đó, điều này một lần nữa cho thấy không thể tăng công suất thu thập điện bằng cách giảm mức độ giảm chấn xuống quá nhỏ vì nó mâu thuẫn với yêu cầu ưu tiên là giảm rung cho kết cấu chính.

Hình 4.8a mô tả công suất trung bình $\bar{P}_{in}, \bar{P}_d, \bar{P}_{out}$ trên mỗi chu kỳ với tần số biến thiên khi α thay đổi (các giá trị của μ, κ^2 , cũng như β_{op} và ξ_{2op} liên quan đến $\alpha_{op} = 1$, là cố định). Tất cả các đường cong công suất trung bình đều có hai đỉnh, trong khi đỉnh bên phải của \bar{P}_{in}, \bar{P}_d gần λ_Q thì luôn cao hơn đỉnh bên trái gần λ_p .

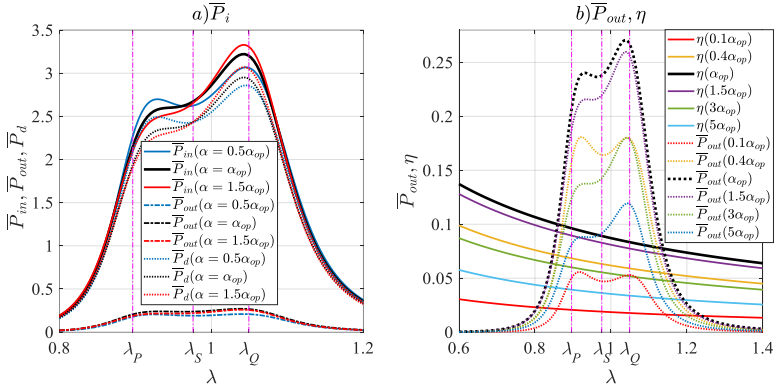
Hình 4.8b minh họa mối liên hệ giữa công suất đầu ra trung bình \bar{P}_{out} và hiệu suất η với các giá trị khác nhau của α trong miền tần số. Các đỉnh bên trái và bên phải của \bar{P}_{out} là bằng nhau khi $\alpha = 0.4\alpha_{op}$. Ta có thể thấy rằng các giá trị nhỏ của α làm giảm công suất \bar{P}_{out} rất nhanh so với các giá trị lớn. Giá trị của α càng gần α_{op} thì năng lượng điện thu thập được càng cao. Rõ ràng, $\bar{P}_{out}(\alpha = \alpha_{op})$ là đường cong có đỉnh cao nhất và bao trùm các đường cong với các giá trị còn lại của α .



Hình 4.7 Đồ thị mô tả biên độ điện áp và công suất trung bình trong một chu kỳ theo biến λ

với $\mu = 0.05, k^2 = 0.05, \alpha = \alpha_{op}, X_{st}^2 = 1$ và ξ_2 thay đổi

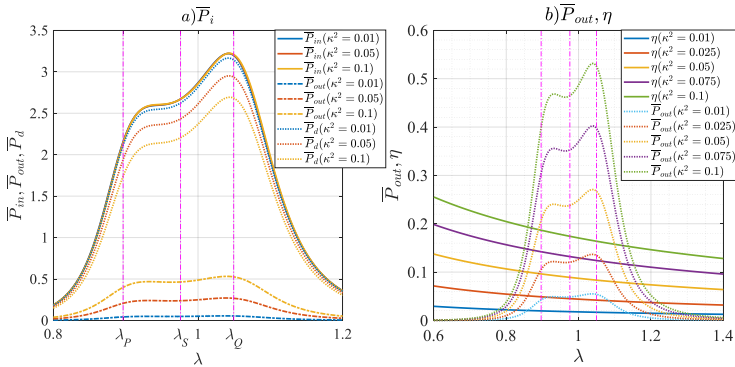
a) v_0 , b) \bar{P}_{in} , c) \bar{P}_d , d) \bar{P}_{out}



Hình 4.8 Đồ thị mô tả công suất trung bình và hiệu suất theo biến λ với $\kappa^2 = 0.05$, $\mu = 0.05$, $X_{st}^2 = 1$ và α thay đổi

a) $\bar{P}_{in}, \bar{P}_d, \bar{P}_{out}$, b) \bar{P}_{out}, η

Bên cạnh đó thì ắt kỳ sự thay đổi nào về giá trị của α sai lệch với α_{op} đều dẫn đến sự giảm của hiệu suất η . Tuy nhiên, hiệu suất khá thấp, thậm chí ở vùng cộng hưởng giá trị cực đại cũng chỉ khoảng 10%. Ngoài ra, hiệu suất η là hàm số giảm với tần số biến thiên. Như chúng ta có thể thấy trong Hình 4.8a, phần lớn năng lượng dao động được truyền sang năng lượng tiêu tán để giảm dao động, phần còn lại được chuyển thành năng lượng điện, chiếm một phần nhỏ. Nói cách khác, năng lượng tiêu tán gần bằng năng lượng đầu vào khi tần số tăng lên, dẫn đến hiệu suất giảm.



Hình 4.9 Đồ thị mô tả công suất trung bình và hiệu suất theo biến λ với $\mu = 0.05$, $\alpha = \alpha_{op}$, $X_{st}^2 = 1$ và κ^2 thay đổi

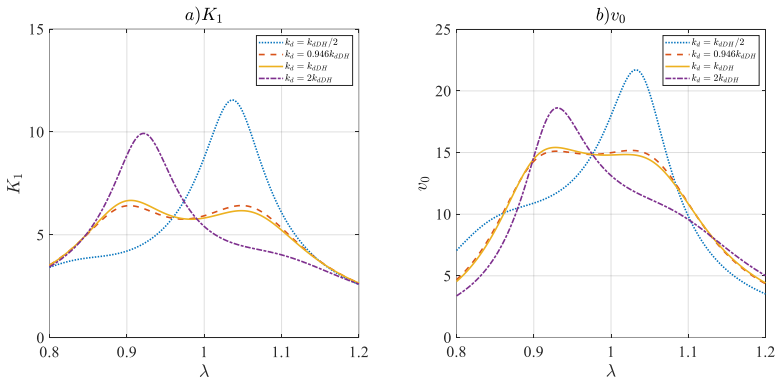
a) $\bar{P}_{in}, \bar{P}_d, \bar{P}_{out}$, b) \bar{P}_{out}, η

Ảnh hưởng của hệ số ghép điện cơ κ^2 lên $\bar{P}_{in}, \bar{P}_d, \bar{P}_{out}$ và η được minh họa trong Hình 4.9. Ta có thể thấy trong Hình 4.9a rằng ảnh hưởng của κ^2 lên \bar{P}_{in} có thể không đáng kể nhưng là đáng kể đối với \bar{P}_d, \bar{P}_{out} . Khi κ^2 càng lớn, đường cong \bar{P}_d càng xa đường cong \bar{P}_{out} và ngược lại. Nói chung, như được hiển thị trong Hình 4.9b, giá trị của κ^2 càng lớn thì đỉnh càng cao và phạm vi bao phủ của đường cong \bar{P}_{out} sẽ càng rộng. \bar{P}_{out} thì gần như tỷ lệ tuyến tính với κ^2 và độ biến thiên của η đối với κ^2 là tương tự. Về mặt vật lý, rõ ràng là khớp nối cơ điện càng tốt thì khả năng chuyển đổi năng lượng điện càng cao.

4.5. Khảo sát số hệ TMD-2sPSFAF lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài

Trong phần này, luận án thực hiện khảo sát số cho hệ kết cấu chính không cản lắp TMD-2sPSFAF chịu kích động ngoài.

Hình 4.10a và Hình 4.10b lần lượt mô tả các đường cong của hệ số khuếch đại K_1 và hệ số biên độ điện áp v_0 trong miền tần số λ khi k_d thay đổi.

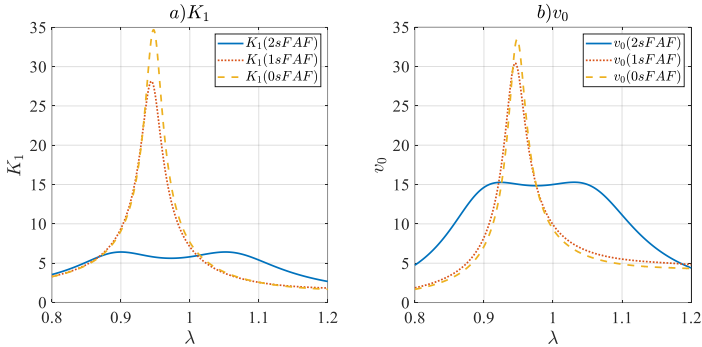


Hình 4.10 Đồ thị K_1, v_0 theo λ với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.0242, \alpha = 1$ và k_d thay đổi

a) K_1 , b) v_0

Trong Hình 4.10a ta thấy rằng đường cong luôn có hai đỉnh, tuy nhiên, nó không được tối ưu hóa do độ cao của hai đỉnh đó không bằng nhau trong trường hợp $k_d = k_{ADH} / 2$, $k_d = k_{ADH}$, và $k_d = 2k_{ADH}$. Trong khi đó, chúng ta có thể tối ưu K_1 để cho 2 đỉnh bằng nhau bằng cách thay đổi giá trị của $k_d = 0.946k_{ADH}$.

Trong Hình 4.10b thì với giá trị $k_d = 0.946k_{ADH}$, đường cong v_0 gần như được tối ưu hóa. Hơn nữa, ta thấy rằng đường cong v_0 có một điểm cố định độc lập với độ cứng của lò xo k_d của TMD. Do đó, ta có thể thấy sự kết hợp tốt giữa miền cơ và miền điện với giá trị của $k_d = 0.946k_{ADH}$.



Hình 4.11 Đồ thị K_1, v_0 theo biến λ với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.0242, \alpha = 1$ và $k_d = 0.946k_{dDH}$ trong những trường hợp khác nhau

a) K_1 , b) v_0

Đồ thị Hình 4.11a cho thấy rõ ràng sự khác biệt về độ cứng tương đương của lò xo TMD trong ba trường hợp, cụ thể là $k_{eq-PSEH} = 4.292 > k_{eq-1sFAF} = 4.025 > k_{eq-2sPSFAF} = 2.622$. Do đó, việc lắp đặt FAF sẽ làm giảm độ cứng của lò xo TMD, cải thiện khả năng giảm rung của hệ thống. TMD-2sPSFAF mang lại kết quả tốt nhất về độ cứng của lò xo.

Hình 4.11b cho thấy trong số ba trường hợp thì biên độ điện áp của TMD-2sPSFAF là nhỏ nhất. Tuy nhiên, tham số khuếch đại cơ học K_1 hay nói cách khác là việc giảm rung cho kết cấu chính sẽ được ưu tiên trong bài toán thiết kế TMD, dẫn đến trường hợp sử dụng TMD-2sPSFAF trở thành lựa chọn tốt nhất trong trường hợp này.

Kết luận chương 4

Trong chương 4, luận án đã tiến hành phân tích dòng năng lượng và khảo sát số để đánh giá những kết quả phân tích lý thuyết đã thực hiện ở chương 3. Khảo sát số đã chỉ ra rằng:

- Hệ thống tích hợp kết cấu chính không cản với TMD-PSEH chứng minh sự phù hợp rất tốt giữa lý thuyết và tính toán. Hai đỉnh của đường cong $K_1(\lambda)$ rất gần P và Q và có tọa độ gần như bằng nhau, mang lại lượng điện năng thu thập được \bar{P}_{out} lớn nhất trong một chu kỳ và hiệu suất η đạt giá trị cao nhất với các tham số tối ưu thu được.

- Hệ thống tích hợp của kết cấu chính không cản với TMD-PSEH và với TMD đều mang lại khả năng triệt tiêu rung động tốt cho kết cấu chính, miễn là các hệ số tỷ số tần số tự nhiên và hệ số giảm chấn tối ưu đều bắt nguồn từ lý thuyết điểm cố định.

- Bên cạnh đó, hệ thống cơ điện của TMD-2sPSFAF cho thấy đường cong biên độ điện áp có một điểm cố định không bị ảnh hưởng bởi độ cứng của lò xo TMD. Ngoài ra, độ cứng hiệu dụng của lò xo TMD cần được xác định để đảm bảo rằng các đỉnh của đường cong biên độ điện áp và đường cong hệ số khuếch đại cơ học có cùng độ cao.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

KẾT LUẬN

Luận án này thực hiện việc nghiên cứu thiết bị giảm chấn khối lượng tích hợp bộ thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng lắp trên kết cấu chính không cản chịu kích động điều hòa và đã đạt được những kết quả chính sau đây:

- Đầu tiên, dựa trên hai yêu cầu kỹ thuật chính là triệt tiêu rung động của kết cấu chính và tăng công suất thu thập năng lượng điện, cùng với lý thuyết điểm cố định của Den Hartog đã giúp xác định các hệ số tối ưu của TMD-PSEH như tỷ số tần số β_{op} , hệ số giảm chấn ξ_{2op} và tỷ số điện trở α_{op} .

- Tiếp theo, nghiên cứu về chuyển đổi năng lượng cơ-cơ và cơ-điện được thực hiện thông qua phân tích dòng công suất/năng lượng đã cho thấy trong một chu kỳ dao động, một phần khả năng triệt tiêu rung động xuất phát từ khả năng tiêu tán năng lượng của bộ giảm chấn TMD, phần còn lại đến từ khả năng tiêu tán năng lượng của PSEH và chuyển đổi thành điện năng nhờ điện trở R .

- Thêm vào đó, một mô hình thiết bị thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng gắn trong khung khuếch đại lực kép 2sPSFAF tích hợp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài cũng đã được nghiên cứu. Hệ thống cơ điện của TMD-2sPSFAF cho thấy khả năng giảm rung động tốt cho kết cấu chính nhưng cũng dẫn đến điện áp thu thập bị giảm đi đáng kể.

- Và cuối cùng có thể thấy rằng, lý thuyết điểm cố định có tiềm năng lớn để áp dụng nghiên cứu cho các hệ thống TMD thu thập năng lượng từ rung động.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Dựa trên các kết quả nghiên cứu có được của Luận án này có thể dẫn tới hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai như sau:

- Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với phần tử cản, hoặc lắp nối tiếp với cả phần tử cản và phần tử đàn hồi, hoặc nằm giữa 2 phần tử đàn hồi, hoặc nằm giữa phần tử cản và phần tử đàn hồi;

- Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với lò xo của kết cấu chính, hoặc lắp nối tiếp với cả 2 lò xo của kết cấu chính và TMD;

- Mô hình TMD với kết cấu chính có cản;

- Mô hình TMD dạng nối nền, TMD ba thành phần và TMD con lắc thuận;

- Mô hình TMD với phần tử đàn hồi hoặc cản phi tuyến;

- Mô hình TMD lắp trên kết cấu chính với phần tử đàn hồi phi tuyến.

DANH MỤC CÁC CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Vũ Anh Tuấn**, Tống Đức Năng, Nguyễn Ngọc Linh, Vũ Đức Lập. *Nghiên cứu thiết bị giảm chấn khối lượng tích hợp bộ thu thập năng lượng kiểu xếp chồng*. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số đặc biệt 11/2022. Trang 316.
2. N.N.Linh, **V.A.Tuan**, N.V.Man, N.D.Anh. *Response analysis of undamped primary system subjected to base excitation with a dynamic vibration absorber intergrated with a piezoelectric stack energy harvester*. Vietnam Journal of Mechanics. Vol 44, No. 4 (2022), pp. 490-499.
3. **Vu Anh Tuan**, N.N.Linh, Nguyen Van Manh, Pham Manh Thang, N.D.Anh. *Investigation of a tuned mass damper with piezoelectric stack energy harvester attached to an undamped primary structure under harmonic base excitation*. Lecture Notes in Civil Engineering, 460 (2024), pp 283–293.
4. N.D.Anh, **Vu Anh Tuan**, Pham Manh Thang, N.N.Linh. *Extension of the fixed point theory to tuned mass dampers with piezoelectric stack energy harvester*. Journal of Sound and Vibration 581 (2024), 118411.
5. NN Linh, ND Anh, LD Viet, NA Ngoc, **VA Tuan**, TD Nang, NV Manh, Sáng chế: *Thiết bị tắt chấn động lực tích hợp bộ thu thập năng lượng dao động kiểu áp điện*, Cục sở hữu trí tuệ - Bộ Khoa học và Công nghệ, Bằng độc quyền sáng chế số 39054, 26/7/2022.
6. Anh Ngoc Nguyen, Duc Nang Tong, **Anh Tuan Vu**, Dong Anh Nguyen, Duc Viet La, Tuan Anh Tran and Ngoc Linh Nguyen. *A design of tuned mass damper with piezoelectric stack energy harvester and two-stage force amplification frame*, Vietnam Journal of Mechanics, 2024. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/21026>.

