

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 XẾP CHỒNG GẮN TRONG HỆ CƠ HỌC
2 BẬC TỰ DO TUYẾN TÍNH**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ VÀ CƠ KỸ THUẬT

Hà Nội – Năm 2024

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 CHÒNG GẮN TRONG HỆ CƠ HỌC
2 BẬC TỰ DO TUYẾN TÍNH**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ VÀ CƠ KỸ THUẬT

Ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

**Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ**

Người hướng dẫn 1
(Ký, ghi rõ họ tên)

Người hướng dẫn 2
(Ký, ghi rõ họ tên)

GS.TSKH

Nguyễn Đông Anh

TS.

Nguyễn Ngọc Linh

Hà Nội – Năm 2024

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài nghiên cứu “Nghiên cứu bộ thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng gắn trong hệ cơ học 2 bậc tự do tuyến tính” là công trình nghiên cứu của tôi dựa trên những tài liệu, số liệu do chính tôi tự tìm hiểu và nghiên cứu. Chính vì vậy, các kết quả nghiên cứu đảm bảo trung thực và khách quan nhất. Đồng thời, kết quả này chưa từng xuất hiện trong bất cứ một nghiên cứu nào. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực, nếu sai tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm trước pháp luật.

Hà Nội, ngày 01 tháng 10 năm 2024

Tác giả luận án

Vũ Anh Tuấn

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, NCS xin gửi lời cảm ơn sâu sắc nhất đến GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh, người thầy đã tận tình hướng dẫn, dìu dắt, truyền cho NCS niềm đam mê khoa học để có thể hoàn thành được luận án này. Tiếp theo, NCS xin gửi lời cảm ơn chân thành tới TS.Nguyễn Ngọc Linh, một người thầy có ảnh hưởng lớn đến sự nghiệp khoa học của NCS từ thời còn là sinh viên, đã hướng dẫn và giúp đỡ NCS rất nhiều trong quá trình thực hiện luận án. NCS cũng xin gửi lời cảm ơn tới Viện Cơ học và Học viện Khoa học và Công nghệ đã đào tạo và giúp đỡ tạo điều kiện để NCS có thể tôi hoàn thành luận án này một cách tốt nhất. Và không thể thiếu là lời cảm ơn chân thành của NCS tới PGS.TS. Lưu Đức Thạch, người thầy đã định hướng và dẫn dắt NCS từ những ngày đầu đến với khoa học. Cuối cùng, NCS xin gửi lời cảm ơn đến gia đình, bạn bè và đồng nghiệp ở Bộ môn Máy xây dựng và Khoa Cơ khí thuộc Trường Đại học Xây dựng Hà Nội vì đã luôn ở bên ủng hộ và khích lệ tinh thần trong những lúc NCS gặp khó khăn trong công việc cũng như cuộc sống.

Tác giả luận án

Vũ Anh Tuấn

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	I
LỜI CẢM ƠN	II
MỤC LỤC	III
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	V
DANH MỤC BẢNG.....	VIII
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	IX
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN.....	6
1.1. Vật liệu áp điện và mô hình ứng dụng.....	6
1.1.1. Khái niệm	6
1.1.2. Một số mô hình thu thập năng lượng từ vật liệu áp điện	7
1.2. Ứng dụng thu thập năng lượng từ vật liệu áp điện	10
1.2.1. Thu thập năng lượng cho thiết bị điện tử cầm tay và cấy ghép	10
1.2.2. Các hệ thống và cảm biến không dây tự cấp nguồn	13
1.3. Ứng dụng thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng trong hệ cơ học 2 bậc tự do	15
1.4. Đặt vấn đề nghiên cứu của luận án	27
Kết luận chương 1	28
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN THIẾT BỊ GIẢM CHẤN KHỐI LƯỢNG KIỂU ÁP ĐIỆN XẾP CHỒNG	29
2.1. Thiết bị giảm chấn khối lượng.....	29
2.1.1. Kết cấu chính chịu kích động nền	29
2.1.2. Kết cấu chính chịu kích động ngoài.....	34
2.2. Mô hình liên kết cơ điện của cụm áp điện kiểu xếp chồng với thiết bị giảm chấn khối lượng.....	36
2.2.1. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng	36
2.2.2. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với phần tử đàn hồi	38
2.2.3. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với phần tử cản	40
2.3. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng với khung khuếch đại lực.....	43
Kết luận chương 2	46

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ TỐI ƯU TMD-PSEH DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỂM CỐ ĐỊNH MỞ RỘNG.....	47
3.1. TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động nền	47
3.1.1. Phân tích đáp ứng của hệ thống chịu kích động nền.....	47
3.1.2. Tối ưu các tham số của hệ thống chịu kích động nền dựa trên lý thuyết điểm cố định.....	51
3.1.3. Thiết kế tối ưu hệ thống TMD-PSEH chịu kích động nền	55
3.2. TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài	58
3.2.1. Phân tích đáp ứng của hệ thống chịu kích động ngoài.....	58
3.2.2. Tối ưu các tham số của hệ thống chịu kích động ngoài dựa trên lý thuyết điểm cố định.....	63
3.2.3. Thiết kế tối ưu hệ thống TMD-PSEH chịu kích động ngoài	70
3.3. TMD-PSEH với khung khuếch đại lực lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài	73
3.3.1. Phân tích đáp ứng của hệ thống	73
3.3.2. Xác định các tham số của hệ thống.....	75
Kết luận chương 3	76
CHƯƠNG 4. PHÂN TÍCH DÒNG NĂNG LƯỢNG TRONG TMD-PSEH VÀ KHẢO SÁT SỐ.....	78
4.1. Dòng năng lượng và hiệu suất trong TMD-PSEH	78
4.1.1. Dòng năng lượng chuyển đổi trong TMD-PSEH	78
4.1.2. Công suất và hiệu suất trong TMD-PSEH.....	81
4.2. Khảo sát số hệ TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động nền	85
4.3. Khảo sát số hệ TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài ...	87
4.4. Khảo sát số phân tích dòng năng lượng và hiệu suất.....	92
4.5. Khảo sát số cho hệ TMD-2sPSFAF lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài	96
Kết luận chương 4	98
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	100
DANH MỤC CÁC CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	102
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	103
PHỤ LỤC	115

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

PEH	Thiết bị thu thập năng lượng kiểu áp điện
PSEH	Thiết bị thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng
PCB	Dầm áp điện công xôn
TMD	Thiết bị giảm chấn khối lượng
DVA	Thiết bị giảm chấn động lực
PZT	Gốm áp điện
PZT-Stack	Cụm áp điện kiểu xếp chồng
FAF	Khung khuếch đại lực
PSFAF	Thiết bị thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng kết hợp với khung khuếch đại lực
m_1	Khối lượng kết cấu chính, (kg)
m_2	Khối lượng của TMD, (kg)
c_2	Hệ số cản của TMD, (Ns/m)
k_d	Độ cứng phần tử đàn hồi của TMD, (N/m)
k_1	Độ cứng phần tử đàn hồi của kết cấu chính, (N/m)
$F(t)$	Lực kích động ngoài điều hòa lên kết cấu chính, (N)
$z(t)$	Lực kích động nền điều hòa
z_0	Biên độ của lực kích động nền, (m)
F_0	Biên độ của lực kích động ngoài, (N)
Ω	Tần số của lực kích động, (rad/s)
μ	Tỷ số khối lượng
ω_1	Tần số tự nhiên của kết cấu chính, (rad/s)
ω_d	Tần số tự nhiên của TMD, (rad/s)
ξ	Hệ số cản của TMD
β	Tỷ số tần số tự nhiên của TMD và kết cấu chính
λ	Tỷ số của tần số kích động và tần số tự nhiên của kết cấu chính
x_1 và x_2	Dịch chuyển tương đối của khối lượng m_1 và m_2 , (m)

K_1 và K_2	Hệ số khuếch đại dao động của m_1 và m_2 .
β^* và ξ^*	Tỷ số tần số tự nhiên và hệ số cản tối ưu của TMD chịu kích động nền
β_{DH} và ξ_{DH}	Tỷ số tần số tự nhiên và hệ số cản tối ưu của TMD chịu kích động ngoài
$f_p(t)$	Lực dọc trực tác dụng lên PSEH, (N)
$V(t)$	Điện áp, (V)
$q(t)$	Điện tích, (Cb)
R	Điện trở, (Ω)
h_p	Chiều dày mỗi lớp của cụm áp điện kiểu xếp chồng, (m)
L_p	Tổng chiều dài của cụm áp điện kiểu xếp chồng, (m)
$S_3(t)$ và $T_3(t)$	Biến dạng dọc trục và ứng suất pháp, (N/m^2)
$E_3(t)$ và $D_3(t)$	Cường độ điện trường và độ dịch chuyển điện tích
c_{33} , e_{33} và ε_{33}	Độ cứng, hằng số áp điện, và độ từ thẩm của cụm áp điện kiểu xếp chồng
L_e	Khoảng cách tác dụng của điện trường, (m)
A	Diện tích mặt cắt ngang của phân tử áp điện, (m^2)
A_e	Diện tích bề mặt nằm trong điện trường, (m^2)
k_p, θ_p, C_p	Độ cứng, hệ số liên kết cơ điện hiệu dụng và điện dung của PSEH
k_s	Độ cứng của lò xo lắp nối tiếp với PSEH, (N/m)
k_p	Độ cứng của PSEH, (N/m)
f_p và f_s	lực dọc trong các phân tử áp điện và lò xo, (N)
x_p và x_s	Biến dạng của các phân tử áp điện và lò xo, (m)
φ_i	Góc kết cấu của khung khuếch đại lực đơn, (rad)
κ^2	Hệ số kết nối cơ điện
α	Tỉ số điện trở
v	Điện áp chuyển đổi, (V)
P_{av}	Công suất trung bình

β_{op} và $\xi_{2,op}$	Tỷ số tần số và hệ số cản tối ưu của TMD-PSEH
k_2	Độ cứng tương đương của tổ hợp PZTS và lò xo TMD, (N/m)
$\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \tilde{v}(t)$	Các nghiệm phức ở trạng thái ổn định của hệ thống
X_1, X_2, X_v	Các biên độ phức của các nghiệm $\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \tilde{v}(t)$
X_{st}	Độ võng tĩnh của kết cấu chính
$x_1(t), x_2(t), v(t)$	Đáp ứng chuyển vị và đáp ứng điện áp của hệ thống
a_1, a_2, V_0	Biên độ của $x_1(t), x_2(t), v(t)$
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_v$	Góc pha của $x_1(t), x_2(t), v(t)$
$P(\lambda_p, K_{1p})$ và $Q(\lambda_q, K_{1q})$,	Hai điểm cố định của đường cong biên độ-tần số $K_1(\lambda)$
I_R và P_R	Cường độ (A) và công suất dòng điện trên điện trở R (Ω)
α_{op} và R_{op}	Hệ số điện trở và điện trở tối ưu (Ω)
k_{dop} và c_{2op}	Độ cứng lò xo (N/m) và hệ số giảm chấn tối ưu (Ns/m) của TMD
y	Độ dịch chuyển tuyệt đối của khối lượng m_2 , (m)
Π_1, Π_2	Động năng của khối lượng m_1 và m_2
U_1, U_2	Thế năng của khối lượng m_1 và m_2
E_d, E_C	Năng lượng tiêu tán, năng lượng tĩnh điện
E_m, E_{out}	Năng lượng đầu vào, năng lượng đầu ra
P_m, P_{out}	Công suất đầu vào, công suất đầu ra
\bar{E}	Năng lượng trên mỗi chu kỳ
$T = 2\pi / \lambda$	Chu kỳ dao động
\bar{P}	Công suất trung bình
η	Hiệu suất của hệ thống PSEH
$k_{eq}, \theta_{eq}, C_{eq}$	Độ cứng (N/m), hệ số ghép điện cơ (N/V) và điện dung (F) của PESH tương đương
N	Số lượng PSFAF đơn

DANH MỤC BẢNG

- Bảng 4.1 *Các thông số tính toán của hệ kết cấu chính không cản lấp TMD-PSEH chịu kích động ngoài với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.05$*
- Bảng 4.2 Các thông số của cụm áp điện kiểu xếp chồng
- Bảng 4.3 Các thông số đầu vào của khung khuếch đại lực
- Bảng 4.4 Các tham số tính toán khác

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

- Hình 1.1 Hiệu ứng áp điện
- Hình 1.2 Các kiểu hiệu ứng áp điện phân cực theo trục 3
- Hình 1.3 Kết cấu bộ PEH kiểu dầm công xôn dán 1 lớp và 2 lớp áp điện
- Hình 1.4 Kết cấu PEH kiểu chũm chọe
- Hình 1.5 Kết cấu PEH kiểu xếp chồng
- Hình 1.6 Kết cấu cụm áp điện kiểu xếp chồng với khung khuếch đại lực
- Hình 1.7 Thu thập năng lượng cho thiết bị điện tử cầm tay và cấy ghép
- Hình 1.8 Thu thập năng lượng trong hệ thống và cảm biến không dây tự cấp nguồn
- Hình 1.9 Ứng dụng thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng
- Hình 1.10 Hai kiểu mô hình thu thập năng lượng áp điện của hệ cơ học 2 bậc tự do chịu kích động nền
- Hình 1.11 Cụm áp điện kiểu xếp chồng và kết cấu cơ khí gắn các cụm áp điện
- Hình 1.12 Hệ thống thí nghiệm thu thập năng lượng từ rung động nền đường
- Hình 1.13 Mô hình hệ thống thu thập năng lượng áp điện từ rung động nền đường
- Hình 1.14 Hai kiểu mô hình bộ giảm chấn khối lượng lắp trên kết cấu chính
- Hình 1.15 Mô hình nghiên cứu DVA-PEH gắn trên kết cấu chính có cản của Ali và Adhikari
- Hình 1.16 Mô hình nghiên cứu DVA-PEH gắn trên kết cấu chính không cản của Zuppa và cộng sự
- Hình 1.17 Mô hình nghiên cứu DVA-PEH gắn trên kết cấu chính có cản của Zhao và cộng sự
- Hình 1.18 Mô hình thu thập năng lượng áp điện trên hệ thống treo của Xiao và cộng sự
- Hình 1.19 Mô hình thu thập năng lượng trên hệ thống treo của ô tô với phần tử áp điện kiểu xếp chồng lắp song song với lò xo của

- Al-Yafeai và cộng sự
- Hình 1.20 Mô hình nghiên cứu TMD-PSEH gắn với dầm dao động của Ouled Chtiba và cộng sự
- Hình 1.21 Mô hình nghiên cứu TMD-PEH với PEH gắn nối tiếp với hệ lò xo và cản trong TMD của Pan và cộng sự
- Hình 1.22 Mô hình nghiên cứu TMD-PSEH không cản gắn với gắn với kết cấu chính có cản của Lai và cộng sự
- Hình 1.23 Mô hình thu thập năng lượng trên hệ thống treo của ô tô với phần tử áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với lò xo của Al-Yafeai và cộng sự
- Hình 1.24 Thu thập năng lượng áp điện cho hệ thống treo với khung khuếch đại lực của Hendrowati và cộng sự
- Hình 2.1 Mô hình kết cấu chính với bộ giảm chấn khối lượng chịu kích động nền
- Hình 2.2 Đồ thị hệ số khuếch đại của kết cấu chính theo sự biến thiên của tần số kích động
- Hình 2.3 Dạng biến thiên của hàm khuếch đại khi tỷ số tần số tự nhiên đã được chỉnh đến giá trị tối ưu
- Hình 2.4 Mô hình kết cấu chính với bộ giảm chấn khối lượng chịu kích động ngoài
- Hình 2.5 Mô hình hóa PSEH
- Hình 2.6 Mô hình của PSEH lắp nối tiếp với lò xo
- Hình 2.7 Mô hình của PSEH lắp nối tiếp với cản
- Hình 2.7 Mô hình của một cụm áp điện xếp chồng với khung khuếch đại lực
- Hình 2.8 Mô hình của PSEH với khung khuếch đại lực kép
- Hình 3.1 Mô hình hệ kết cấu chính không cản tích hợp TMD-PSEH chịu kích động nền
- Hình 3.2 Đồ thị hệ số cản theo biến α của hệ chịu kích động nền
- Hình 3.3 Mô hình hệ kết cấu chính không cản tích hợp TMD-PSEH chịu kích động ngoài
- Hình 3.4 Các điểm cố định của đường cong hệ số khuếch đại của hệ kết cấu chính không cản trở với TMD-PSEH chịu kích động ngoài

- Hình 3.5 Đồ thị hệ số cản theo biến α của hệ chịu kích động ngoài
- Hình 3.6 Mô hình kết cấu chính không cản với bộ thu thập năng lượng xếp chồng kết hợp khung khuếch đại lực kép
- Hình 4.1 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của kết cấu chính theo biến λ
- Hình 4.2 Đồ thị mô tả công suất đầu ra trung bình theo biến λ
- 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*
- 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*
- Hình 4.5 *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 α thay đổi*
- Hình 4.6 Đồ thị mô tả đáp ứng của chuyển vị và điện áp
- Hình 4.7 *Đồ thị mô tả biên độ điện áp và công suất trung bình trong một chu kỳ theo biến λ với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.05, \alpha = \alpha_{op}, X_{st}^2 = 1$ và ξ_2 thay đổi*
- 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*
- 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*
- Hình 4.10 Đồ thị K_1, v_0 theo biến λ với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.0242, \alpha = 1$ và k_d thay đổi
- 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

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Khủng hoảng năng lượng, sự ấm lên toàn cầu, và ô nhiễm môi trường đang ngày càng được quan tâm và thảo luận nhiều hơn trên toàn thế giới. Các nguồn năng lượng sạch và tái tạo có tính bền vững và thân thiện với môi trường như năng lượng mặt trời, gió, sóng, và năng lượng sinh học đóng vai trò như một nguồn năng lượng thay thế cho nguồn năng lượng hóa thạch truyền thống, đã và đang được nghiên cứu và thu thập rộng rãi ở khắp các quốc gia trên thế giới.

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: điện từ (*electromagnetic*), áp điện (*piezoelectric*), tĩnh điện (*electrostatic*), từ giảo (*magnetostriction*), điện ma sát (*triboelectric*). Điện từ, tĩnh điện, từ giảo và điện ma sát thường liên quan đến các chuyển động tương đối giữa hai vật thể, còn áp điện gắn với tương tác ứng suất-biến dạng. 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*).

Các công nghệ năng lượng tái tạo thường bao gồm hai quá trình riêng biệt: sản xuất năng lượng (sử dụng các nguồn năng lượng sẵn có từ mặt trời, gió, v.v.) và lưu trữ năng lượng (ví dụ như pin). Quá trình đầu tiên chuyển đổi dạng năng lượng ban đầu thành điện năng và quá trình thứ hai chuyển đổi điện năng thành năng lượng hóa học. Với vật liệu áp điện, năng lượng rung động cơ học có thể

được chuyển đổi trực tiếp thành năng lượng điện và lưu trữ trong pin. Nhờ kết cấu nhỏ gọn, thiết bị như vậy có nhiều khả năng ứng dụng trong các hệ thống công suất thấp tự cấp (low-power autonomous systems) và có thể được gọi là pin áp điện. Xuất phát từ tên tiếng Anh của thiết bị chuyển đổi năng lượng cơ sang điện (piezoelectric energy harvester), thì có thể gọi là thiết bị thu thập năng lượng kiểu áp điện, viết tắt là PEH.

Theo phương của biến dạng và điện trường của vật liệu áp điện, các bộ thu thập năng lượng áp điện được thiết kế theo hai dạng cơ bản là kiểu ngang d31 (dạng dầm) và kiểu dọc d33 (dạng xếp chồng).

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 ứng 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 và 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 với nội dung chính như sau:

Chương 1: Tổng quan nghiên cứu

Chương này trình bày tổng quan về vật liệu áp điện và ứng dụng thu thập năng lượng từ rung động sử dụng vật liệu áp điện, từ đó đưa ra hướng nghiên cứu của luận án

Chương 2: Cơ sở lý thuyết tính toán thiết bị giảm chấn khối lượng kiểu áp điện xếp chồng.

Chương này trình bày cơ sở lý thuyết về thiết bị giảm chấn khối lượng TMD lắp trên kết cấu chính không cản chịu kích động nền và kích động ngoài điều hòa dựa trên lý thuyết điểm cố định của Den Hartog. Tiếp theo là các phương án tích hợp cụm áp điện kiểu xếp chồng và khung khuếch đại lực với thiết bị giảm chấn khối lượng để làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình và tính toán xác định các tham số của TMD-PSEH và TMD-2sPSFAF ở chương 3.

Chương 3: Thiết kế tối ưu TMD-PSEH dựa trên lý thuyết điểm cố định mở rộng

Chương này 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 cản tích hợp TMD-PSEH chịu kích động nền và kích động ngoài và TMD-2sPSFAF chịu kích động ngoài, để từ đó đi xác định các tham số cơ-điện tối ưu của hệ thống nhằm đáp ứng 2 yêu cầu chính là triệt tiêu rung động của kết cấu chính và tăng công suất thu thập năng lượng điện.

Chương 4: Phân tích dòng năng lượng trong TMD-PSEH và khảo sát số

Chương này phân tích dòng năng lượng trong TMD-PSEH để từ đó xác định được công thức tính công suất và hiệu suất năng lượng điện thu thập được. Sau đó tiến hành khảo sát số để kiểm nghiệm những kết quả tính toán đã thu được trước đó bằng phần mềm Matlab.

5. Những đóng góp mới của Luận án

- Xây dựng mô hình vật lý và hệ phương trình mô tả cho TMD-PSEH và TMD-2sPSFAF lắp trên kết cấu chính không cản chịu kích động điều hòa, từ đó xác định được các đáp ứng cơ-điện của hệ thống.

- Xác định được bộ tham số cơ-điện tối ưu cho TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động nền và kích động ngoài, cũng như độ cứng lò xo của TMD và cụm áp điện kiểu xếp chồng trong tổ hợp TMD-2sPSFAF dựa trên lý thuyết điểm cố định.

- Nghiên cứu phân tích dòng công suất/năng lượng giúp thu được các biểu thức rõ ràng về công suất đầu vào, đầu ra tức thời và công suất trung bình cũng như hiệu suất thu thập năng lượng. Để từ đó tính toán giúp 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 cơ-điện tối ưu của TMD-PSEH.

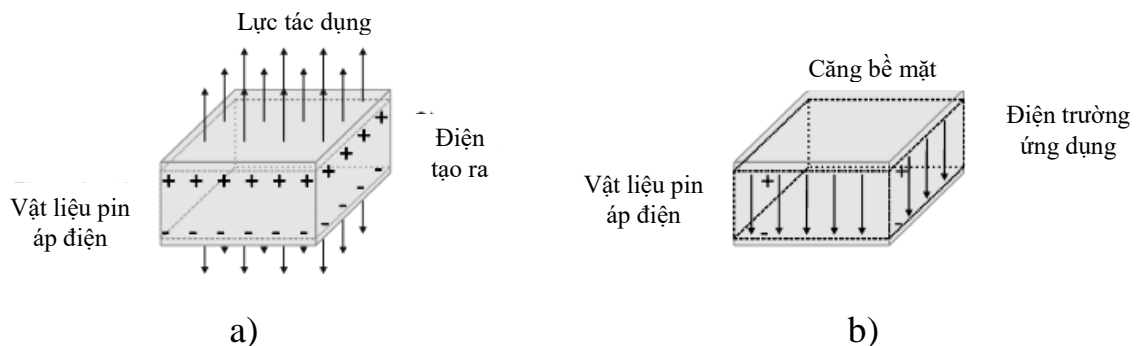
Chương 1. TỔNG QUAN

Trong chương này, Luận án thực hiện việc nghiên cứu tổng quan về vật liệu áp điện, các ứng dụng trong việc thu hồi năng lượng từ rung động nói chung và ứng dụng thu hồi năng lượng kiểu áp điện từ rung động trong hệ cơ học 2 bậc tự do tuyến tính nói riêng, điển hình trong đó là hướng ứng dụng chức năng kép dành cho thiết bị giảm chấn tích hợp thu hồi năng lượng kiểu áp điện.

1.1. Vật liệu áp điện và mô hình ứng dụng

1.1.1. Khái niệm

Vật liệu áp điện được coi là một loại vật liệu thông minh, về mặt vật lý là vật liệu điện môi hoạt động qua tương tác cơ-điện, đồng thời nó cũng được coi là vật liệu sắt điện đa tinh thể được phân cực. Tính chất cơ bản của vật liệu áp điện là hiệu ứng áp điện. Hiệu ứng áp điện có tính thuận nghịch, hiệu ứng thuận là sự xuất hiện điện tích khi vật liệu chịu lực, còn hiệu ứng nghịch là sự biến dạng của vật liệu khi đặt trong điện trường, Hình 1.1, [1].



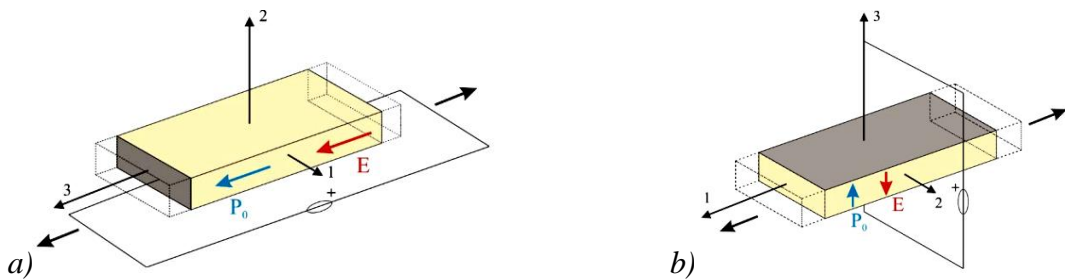
Hình 1.1 Hiệu ứng áp điện

a) hiệu ứng áp điện thuận ; b) hiệu ứng áp điện nghịch.

Trong cả hai trường hợp, độ biến dạng tỷ lệ với điện trường. Trong hiệu ứng áp điện nghịch, khi điện trường đổi chiều thì chiều biến dạng cũng đổi theo. Các thiết bị thu thập năng lượng từ rung động được thiết kế từ vật liệu áp điện có thể được gọi là thiết bị thu thập năng lượng kiểu áp điện, viết tắt PEH.

Theo phương của biến dạng và điện trường của vật liệu áp điện thì các thiết bị thu thập năng lượng kiểu áp điện (PEH) được thiết kế theo hai dạng cơ bản là kiểu dọc (“33 mode”), kiểu ngang (“31 mode”) như thể hiện ở Hình 1. 2, [2].

Vật liệu áp điện với hiệu ứng áp điện kiểu 33 tức là phương của biến dạng song song với trục phân cực 3 cùng hướng với điện trường được hình thành. Vật liệu áp điện với hiệu ứng kiểu 31 nghĩa là phương của biến dạng theo trục 1 vuông góc với điện trường được hình thành dọc theo trục phân cực 3. Các hệ số biến dạng áp điện d_{31} và d_{33} được sử dụng để đánh giá tính chất mạnh yếu của vật liệu áp điện. Thông thường, hệ số d_{33} lớn hơn d_{31} , đối với gốm áp điện PZT ($\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$) thì $d_{31} \approx 0,5d_{33}$. Hiệu ứng kiểu 33 rất phù hợp với các kết cấu chịu nén-kéo. Trong khi đó, kiểu 31 thích hợp với các kết cấu chịu uốn nhờ tận dụng được biến dạng lớn theo trục 1. Theo tổng kết trong [2], PEH với hiệu ứng áp điện kiểu 33 có thể tạo ra điện áp cao hơn, còn PEH kiểu 31 có thể tạo ra dòng điện cường độ lớn hơn. Cần chú ý là trong cả hai kiểu 31 và 33 thì các điện cực được đặt vuông góc với hướng phân cực.

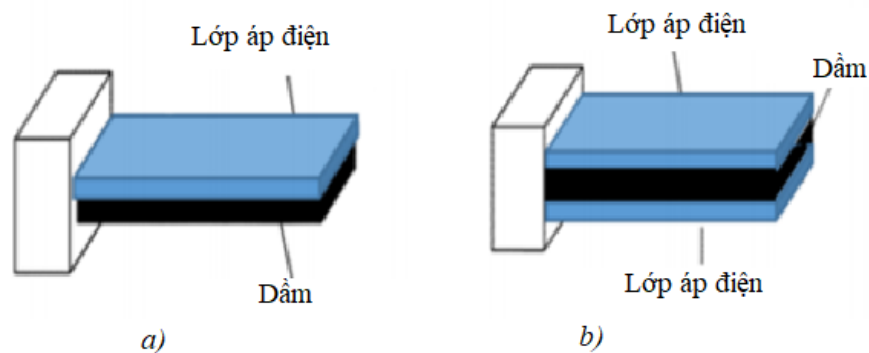


Hình 1.2 Các kiểu hiệu ứng áp điện phân cực theo trục 3

a) kiểu 33, b) kiểu 31.

1.1.2. Một số mô hình thu thập năng lượng từ vật liệu áp điện

Dựa trên các kiểu hiệu ứng áp điện 31 và 33, một số mô hình PEH được nghiên cứu phát triển là:

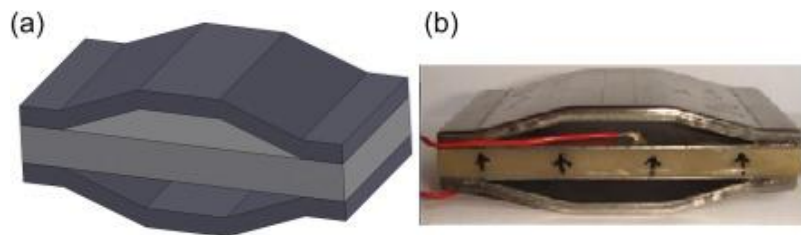


Hình 1.3 Kết cấu bộ PEH kiểu dầm công xôn dán 1 lớp và 2 lớp áp điện

a) dầm dán 1 lớp áp điện, b) dầm dán 2 lớp áp điện.

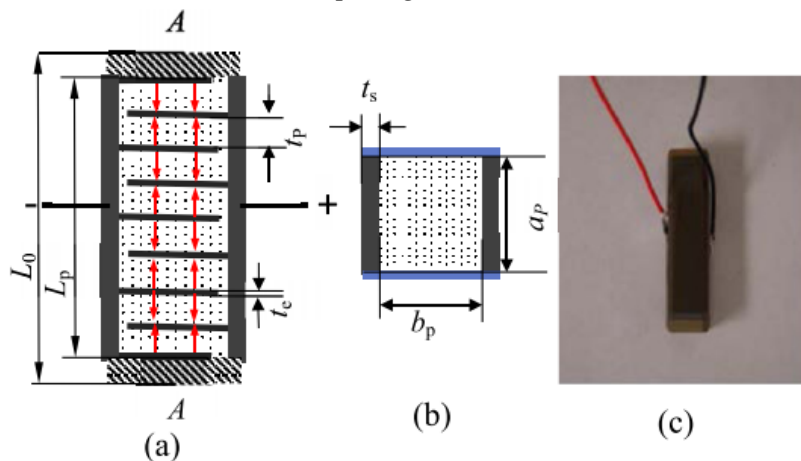
- **Mô hình chịu uốn** (*dầm công xôn - cantilever PEHs*): là kết cấu được sử dụng phổ biến nhất trong PEH nhờ có biến dạng lớn, sử dụng hiệu ứng áp điện kiểu 31, [2]. Dạng kết cấu kinh điển nhất là dầm công xôn chữ nhật, có mô men uốn phân bố tuyến tính theo chiều dài dầm, giá trị mô men lớn nhất tại đầu ngàm và bằng 0 tại đầu tự do. Vì vậy, vật liệu áp điện thường được gắn tại vị trí gần đầu ngàm, ít khi gắn tại đầu tự do thường không mang lại hiệu quả. PEH kiểu dầm công xôn thường được thiết kế làm việc trong vùng cộng hưởng để có ứng suất, biến dạng lớn, dẫn tới thu thập được điện năng cao. Trong mô hình dầm chịu uốn lại chia thành 2 loại là dầm dán 1 lớp áp điện và dầm dán 2 lớp áp điện như thể hiện trên Hình 1.3.

- **Mô hình chịu kéo-nén** (*stack, cymbal PEHs*): có hai dạng kết cấu chịu kéo-nén là dạng xếp chồng (*stack*) và dạng chũm chọe (*cymbal*), sử dụng hiệu ứng áp điện kiểu 33.



Hình 1.4 Kết cấu PEH kiểu chũm chọe

(a) hình ảnh mô phỏng, (b) hình ảnh thực tế.



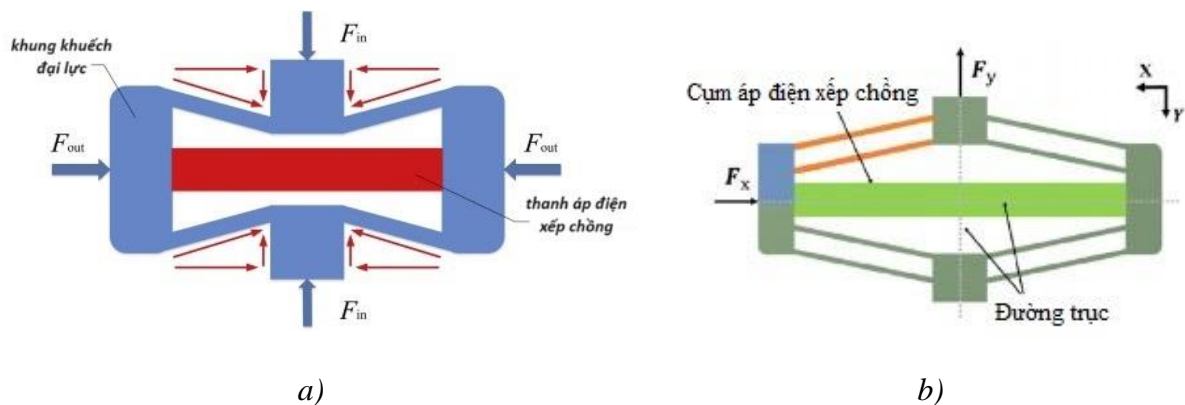
Hình 1.5 Kết cấu PEH kiểu xếp chồng

a) mặt cắt dọc, b) mặt cắt ngang, c) hình ảnh thực tế.

Đối với dạng chũm chọe, PEH bao gồm vỏ dạng tấm và đĩa áp điện Hình 1.4, vỏ chịu tác động kéo-nén của ngoại lực, chuyển đổi và khuếch đại thành lực

nén-kéo tác dụng lên đĩa áp điện, [3]. Tuy nhiên, do độ cứng của kết cấu chịu kéo-nén lớn nên yêu cầu lực tác dụng, thường là lực nén, cũng phải lớn. Vì vậy, PEH với kết cấu chịu kéo-nén thường được thiết kế làm việc ở vùng tần số thấp ngoài miền cộng hưởng.

Cấu tạo của dạng xếp chồng (*stack*) được mô tả như trên Hình 1.5. Công suất điện thu thập được của dạng xếp chồng có thể lớn hơn so với kết cấu dầm chịu uốn, [4]. Cụm áp điện kiểu xếp chồng (PZT-Stack) được cấu tạo bởi nhiều lớp gốm áp điện liên kết cơ học với nhau một cách liên tiếp và xen giữa là các điện cực. Với đặc điểm cấu tạo như vậy, PZT-Stack cho phép giảm khoảng cách giữa các điện cực và từ đó làm tăng hiệu quả thu thập năng lượng khi bị biến dạng cơ học so với một khối áp điện có cùng kích thước, [5]. Bên cạnh đó, PZT-Stack cho phép gia tăng sản lượng điện thu thập được cũng như khả năng chịu được tải trọng lớn nên ngày càng nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu.



Hình 1.6 Cấu trúc cụm áp điện kiểu xếp chồng với khung khuếch đại lực

a) khung khuếch đại lực kiểu lõm, [9]; b) khung khuếch đại lực kiểu lò.

Tuy nhiên, một trong những vấn đề chính khi sử dụng thanh áp điện kiểu xếp chồng độc lập cho các ứng dụng như vậy là chỉ một lượng nhỏ năng lượng sẽ được tạo ra dưới tải trực tiếp do độ cứng cao của chúng [6]-[8]. Để khắc phục vấn đề này, các kết cấu hình thoi lõm đã được đề xuất để khuếch đại lực tác dụng lên trục ngắn hơn [9]-[11], Hình 1.6a. Tuy nhiên, do mỗi liên kết trong các cơ cấu này phải chịu một lực nén lớn do góc nghiêng dương của nó nên loại cơ cấu như vậy có nguy cơ cao bị mất ổn định cục bộ [12]. Để giải quyết vấn đề phòng ngừa, các khung khuếch đại lực kiểu lò đã được đề xuất sao cho ứng suất tác dụng lên khung là lực kéo thay vì lực nén [12]-[15], Hình 1.6b. Bộ tích hợp

PZT-Stack với khung khuếch đại lực (FAF) có thể được coi là một mô-đun (bộ) gọi tắt là PSFAF.

1.2. Ứng dụng thu thập năng lượng từ vật liệu áp điện

Trong những năm gần đây, với sự tiến bộ nhanh chóng của khoa học kỹ thuật thì nhu cầu thu thập năng lượng ngày càng tăng cao để giúp nâng cao tuổi thọ của hệ thống và các thiết bị điện tử di động hoặc điện tử không dây. Các bộ thiết bị PEH được phát triển mạnh mẽ để thu thập năng lượng từ môi trường và hỗ trợ các cảm biến trong 1 cụm độc lập, hoặc hoạt động cùng với các thiết bị điện tử để kéo dài tuổi thọ của nó. Phần này trình bày một số các thí nghiệm và ứng dụng cho các thiết bị thu thập năng lượng áp điện, bao gồm các thiết bị thu thập năng lượng từ các hoạt động của con người dùng cho các thiết bị y tế cấy ghép hoặc đeo trên người, thu thập năng lượng rung từ ô tô và kết cấu cho các cảm biến không dây tự nuôi, và thiết bị theo dõi sức khỏe, [16].

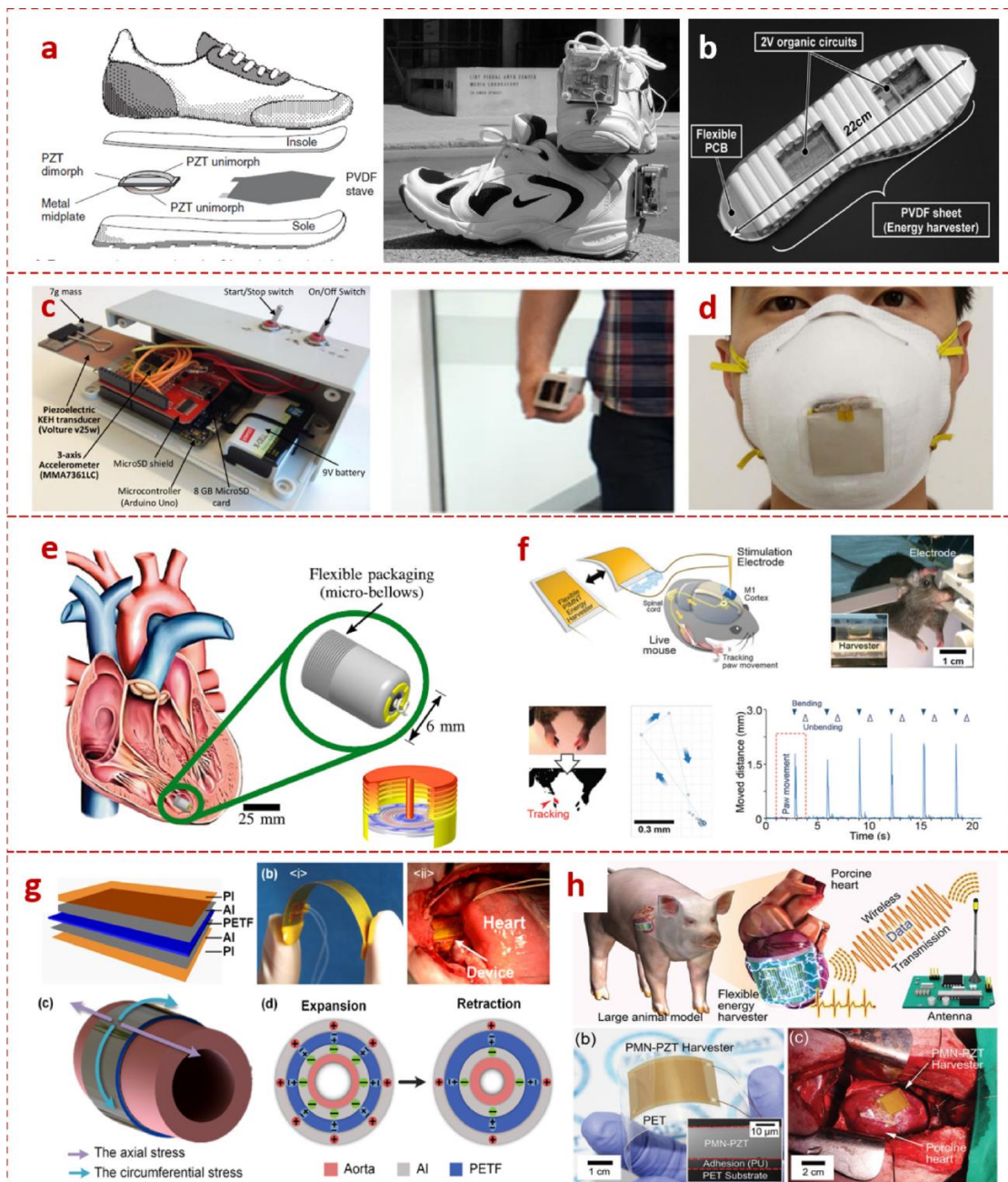
1.2.1. Thu thập năng lượng cho thiết bị điện tử cầm tay và cấy ghép

Với việc giảm công suất tiêu thụ năng lượng của các thiết bị điện tử cầm tay và thiết bị y sinh thì việc thu thập năng lượng để cung cấp cho các thiết bị này đã trở nên khả thi từ các hoạt động của con người như vung cánh tay, đi bộ, chạy, hít thở hoặc gõ bàn phím cũng như các chuyển động cơ sinh học cực kỳ nhỏ của các nhóm cơ và các cơ quan bên trong cơ thể (ví dụ như: tim, lưu lượng máu, chớp mắt hoặc căng cơ, co/giãn cơ hoành và phổi,...), [17], [18]. Một hệ thống thu thập năng lượng đeo trên người thường bao gồm một máy thu thập năng lượng để chuyển đổi chuyển động của con người thành năng lượng điện, một mạch biến đổi điện năng và một phần tử lưu trữ năng lượng điện (ví dụ: một tụ điện hoặc một pin sạc), [19]. Năng lượng thu thập được sử dụng để kéo dài tuổi thọ của pin, do đó cho phép các hệ thống điện tử hoặc cảm biến không dây tự nuôi được.

Khalifa và cộng sự đã đề xuất 1 hệ thống HARKE sử dụng PEH vừa đóng vai trò là máy phát điện vừa đóng vai trò làm cảm biến phát hiện hoạt động của con người, Hình 1.7c. Hệ thống theo dõi hoạt động của con người sử dụng thiết bị

thu thập năng lượng mà không cần sử dụng máy gia tốc kế, có thể tiết kiệm tới 79% năng lượng tiêu thụ tổng thể của hệ thống, [19].

Gonzalez và cộng sự đã nghiên cứu tổng quan về các nguồn năng lượng khác nhau từ các hoạt động của con người, chẳng hạn như thở, dòng chảy của máu, đi lại và cử động chân tay không liên tục, [20]. Niu và cộng sự nhận thấy rằng chuyển động của mắt cá chân, đầu gối, hông, khuỷu tay và vai có thể tạo ra công suất lần lượt lên tới 69.8, 49.5, 39.2, 2.1 và 2.2W, [21].



Hình 1.7 Thu thập năng lượng cho thiết bị điện tử cảm tay và cấy ghép.

Shenck và Paradiso ở phòng nghiên cứu truyền thông MIT đã tiên phong đề xuất một thiết bị thu thập năng lượng áp điện gắn trên giày với một mạch biến đổi năng lượng điện hoàn chỉnh đi kèm, [22], Hình 1.7a.

Ishida và cộng sự đã chế tạo một máy đếm bước chân ở đế giày ứng dụng việc thu thập năng lượng trong quá trình di chuyển của con người, [23]-[27], Hình 1.7b.

Sun và cộng sự đã đề nghiên cứu xuất một dây đeo PVDF siêu nhỏ để thu thập năng lượng từ quá trình hô hấp của con người, [28]-[30]. Xu và cộng sự đã thiết kế và chế tạo một PEH có thể đeo được bằng cách tích hợp màng mỏng PVDF trong khẩu trang N95 để thu thập năng lượng hô hấp của con người như thể hiện trong Hình 1.7d, [31]-[33].

Mặt khác, những thành tựu gần đây tập trung vào các thiết bị thu thập năng lượng mềm dẻo tự nuôi từ chuyển động cơ thể, sự co/giãn cơ, chuyển động của tim/phổi, [34], [35]... Các thiết bị này sử dụng các vật liệu áp điện hữu cơ hoặc vô cơ gắn trên các màng mỏng co giãn linh hoạt như polyethylene terephthalate (PET), polyimide (PI), and polydimethylsiloxane (PDMS), [36]-[48].

Platt và cộng sự đã nghiên cứu một mô cấy thay thế đầu gối tự cung cấp năng lượng bằng cách nhúng một cảm biến để cung cấp dữ liệu chẩn đoán trong cơ thể sống qua bộ truyền lực RF. Khi chịu lực tiêu chuẩn 900 N, thiết bị thu thập năng lượng có thể tạo ra nguồn điện thô có giá trị 4.8 mW một cách liên tục, đủ để cung cấp năng lượng cho một bộ vi xử lý và một nút cảm biến, [49], [50].

Deterre và cộng sự đã thiết kế, chế tạo và thử nghiệm của một thiết bị thu thập năng lượng áp điện hình xoắn ốc siêu nhỏ để thu thập năng lượng từ các biến đổi huyết áp thông thường trong môi trường tim. Thiết bị này có thể trở thành một nguồn năng lượng thu thập nhỏ, giúp kéo dài tuổi thọ cho các thiết bị y tế cấy ghép đang hoạt động như máy tạo nhịp tim không chì, Hình 1.7e, [51].

Hwang và cộng sự đã chứng minh phương pháp kích thích não sâu tự nuôi thông qua thiết bị thu thập năng lượng linh hoạt cho bộ phận thần kinh giả và giao diện não - máy tính, Hình 1.7f, [52].

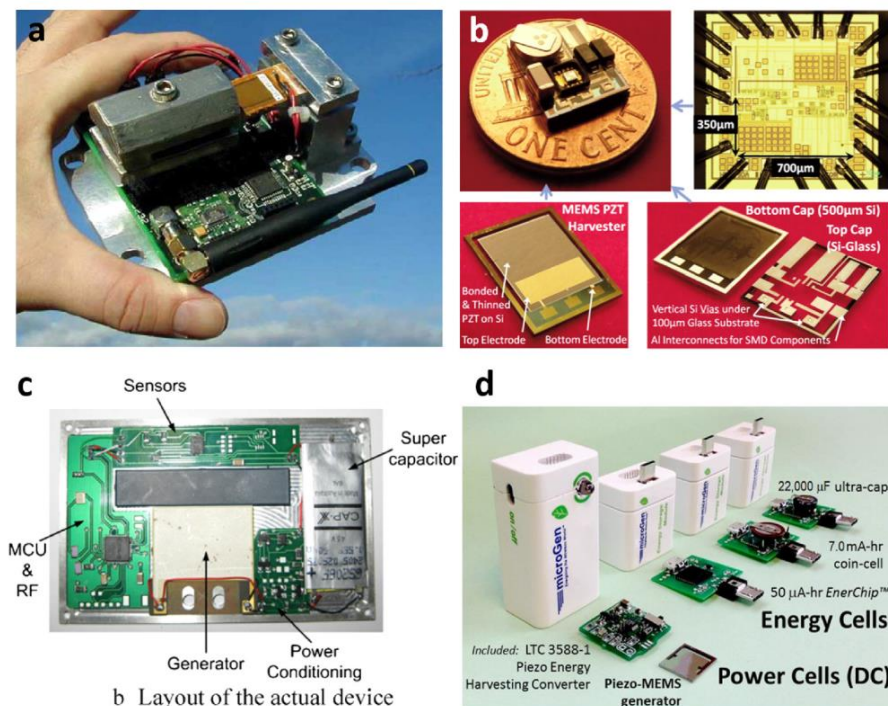
Dagdeviren và cộng sự đã giới thiệu một thiết bị thu thập năng lượng áp điện hình cầu có thể mang lại điện năng đáng kể từ các chuyển động co bóp tự nhiên

của tim, phổi và cơ hoành, năng lượng này có thể xấp xỉ hoặc vượt quá mức năng lượng cần sử dụng thực tế của các thiết bị cấy ghép, Hình 1.7g, [53].

Kim và Lee đã chứng minh khả năng truyền dữ liệu không dây tự cấp nguồn được kích hoạt bằng cách thu thập năng lượng cơ sinh học trong cơ thể sống với thiết bị thu thập năng lượng áp điện PMN-PZT hiệu suất cao trong một mô hình động vật lớn, Hình 1.7h. Hệ thống truyền dữ liệu không dây tự cấp nguồn thành công này cho thấy khả năng ứng dụng mạnh mẽ một cách trực tiếp vào các hệ thống y tế sử dụng thu thập năng lượng cơ sinh học, [54].

1.2.2. Các hệ thống và cảm biến không dây tự cấp nguồn

Với sự phát triển tương đối hoàn thiện của các thiết bị thu thập năng lượng và thiết bị điện tử biến đổi năng lượng và các cảm biến không dây tự cấp nguồn, mạng cảm biến độc lập và di động đã được nghiên cứu cho các ứng dụng giám sát thông minh. Bộ cảm biến có thể chứa pin hoặc không, vì tích hợp mô-đun thu thập năng lượng để cung cấp năng lượng một cách liên tục hoặc gián đoạn giúp kéo dài thời gian sử dụng pin, hoặc kết hợp chức năng cảm nhận và thu thập bằng cách sử dụng một đơn vị độc lập.



Hình 1.8 Thu thập năng lượng trong hệ thống và cảm biến không dây tự cấp nguồn.

Elvin và cộng sự đã nghiên cứu khả năng kết hợp các chức năng của cảm biến biến dạng và thu thập năng lượng bằng cách sử dụng một thiết bị PVDF áp điện. Năng lượng thu thập được cho phép truyền dữ liệu cảm biến không dây tới bộ thu thập từ xa, [55].

Roundy và cộng sự đã thiết kế một dầm công xôn áp điện cỡ nhỏ có tổng kích thước của tấm dán 2 mặt và khối lượng đầu dầm là xấp xỉ 1 cm^3 . Nó được chứng minh là tự cung cấp năng lượng cho một bộ thu thập phát vô tuyến tùy chỉnh với mức tiêu thụ năng lượng là 12 mW ở 1 chu kỳ làm việc 1.6%, [56].

Arms và cộng sự đã giới thiệu một cảm biến nhiệt độ và độ ẩm không dây tích hợp được cung cấp năng lượng bởi một bộ thu thập năng lượng áp điện từ các rung động môi trường xung quanh, Hình 1.8a, [57].

Aktakka và cộng sự đã nghiên cứu một thiết bị thu thập năng lượng MEMS tự cung cấp năng lượng với mạch quản lý năng lượng để sạc tự động cho một thiết bị lưu trữ. Kích thước của thiết bị là nhỏ hơn 0.3 cm^3 , Hình 1.8b, [58].

Zhu và cộng sự đã thiết kế một nút cảm biến thông minh tự cấp nguồn có kích thước bằng thẻ tín dụng bao gồm một dầm áp điện 2 lớp để thu thập năng lượng, một mạch chuyển đổi năng lượng, các cảm biến và một máy phát RF. Công suất được tạo ra là đủ để cho phép nhận biết và truyền tải tín hiệu, Hình 1.8c, [59]

MicroGen Systems, Inc., đã ra mắt sản phẩm thu thập năng lượng BOLT cho các ứng dụng cảm biến không dây trong lĩnh vực công nghiệp và xây dựng, Hình 1.8d. Các tế bào điện bao gồm thiết bị thu thập năng lượng áp điện MEMS AlN, thiết bị điện tử để chỉnh lưu, trở kháng kết hợp và điện áp điều chỉnh, và một tụ điện nhỏ để lưu trữ năng lượng.

Các thiết bị thu thập năng lượng tự cấp cũng thu hút sự chú ý cho các ứng dụng trong ngành công nghiệp ô tô. Bởi vì khi các bánh xe quay có thể cung cấp đáng kể nguồn năng lượng từ rung động, nó có thể là nguồn năng lượng tiềm năng cho lớp xe thông minh với các cảm biến giám sát. Do các điều kiện đường xá và tốc độ di chuyển khác nhau, tần số rung của bánh xe quay thường thay đổi trong dải tần số thấp (1–100 Hz). Những khó khăn chính của một máy thu thập năng lượng trên hoặc bên trong lớp xe là phải đáp ứng dải tần số băng thông rộng và gia tốc lớn. Để thu thập năng lượng rung động một cách hiệu quả ở các

tần số cộng hưởng khác nhau, một máy thu thập năng lượng áp điện băng rộng sử dụng cơ chế FUC ghép từ đã được đề xuất, [60]. Một MEMS dựa trên thiết bị thu thập năng lượng áp điện đã được phát triển để ứng dụng cho hệ thống giám sát áp suất lốp xe từ nguồn kích động sóc và ồn, [61]. Mô-đun đo gia tốc lên đến 2000g với tốc độ lấy mẫu là 2 kHz. Dữ liệu có thể được truyền bằng liên kết không dây 2.4 GHz hoặc lưu trữ trong một thẻ nhớ nhỏ dung lượng 8GB, [62].

Lee và Choi đã tiến hành nghiên cứu một hệ thống tự cấp để đo công suất trực tiếp từ lốp xe, cung cấp hệ thống cảm biến không dây được cài đặt bên trong lốp xe, [63].

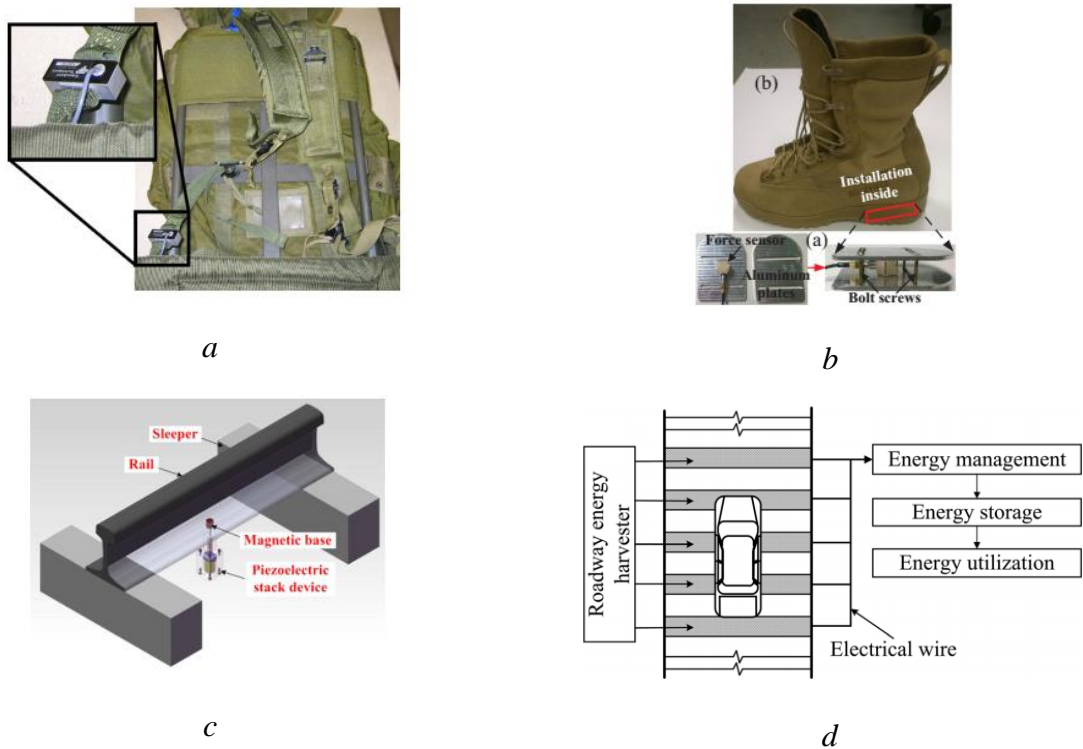
Zhang và cộng sự đã sử dụng cấu trúc ổn định kép áp điện để thu thập năng lượng do bánh xe quay với ưu điểm là nó có thể mở rộng băng thông tần số quay và đồng thời ổn định dao động quỹ đạo năng lượng cao. Sản lượng điện tối đa có thể đạt được là 0.24 mW với công suất trung bình là 61 μ W, [64], [65].

1.3. Ứng dụng thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng trong hệ cơ học 2 bậc tự do

Tại Việt Nam, việc nghiên cứu ứng dụng vật liệu áp điện đã được quan tâm bởi các nhà nghiên cứu trong khoảng hơn 10 năm trở lại đây. Năm 2010 và 2018, nhóm nghiên cứu của GS Trần Ích Thịnh và GS Trần Minh Tú đã lần lượt công bố một số kết quả trong việc phân tích tĩnh, động của tấm composite với các lớp áp điện, [66], [67]. Năm 2016, nhóm nghiên cứu ở Đại học Quốc Gia Hà Nội đã tiến hành nghiên cứu bài toán dao động và ổn định của tấm, vỏ FGM và lớp áp điện [68]. Năm 2020-2021, nhóm nghiên cứu của GS.TSKH Nguyễn Tiến Khiêm đã công bố những kết quả nghiên cứu về vấn đề sử dụng vật liệu áp điện cho kết cấu để chẩn đoán khuyết tật hư hỏng trong kết cấu [69], [70]. Năm 2023, NCS Nguyễn Văn Mạnh đã bảo vệ thành công Luận án Tiến sĩ dưới sự hướng dẫn của GS.TSKH Nguyễn Đông Anh và TS Nguyễn Ngọc Linh với hướng nghiên cứu về thu thập năng lượng áp điện từ rung động sử dụng dầm áp điện với mô hình cơ học một bậc tự do có phần tử đàn hồi phi tuyến [71].

Qua những nghiên cứu trên đây có thể thấy rằng ở trong nước có rất ít các nghiên cứu về hệ thống thu thập năng lượng từ rung động sử dụng vật liệu áp điện nói chung và cụm áp điện kiểu xếp chồng nói riêng. Ngược lại, ở nhiều

quốc gia khác trên thế giới, thiết bị thu thập năng lượng kiểu xếp chồng được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực thu thập năng lượng rung khác nhau như thu thập năng lượng từ chuyển động của con người, rung động do giao thông đường bộ và đường sắt, kim phun nhiên liệu, các thiết bị chuyển đổi siêu âm, thiết bị giảm dao động cho kết cấu và phương tiện giao thông...., Hình 1.9.



Hình 1.9 Ứng dụng thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng

a. ba lô đeo sau lưng, b. đế giày đi bộ, c. đường ray xe lửa, d. đường bộ giao thông.

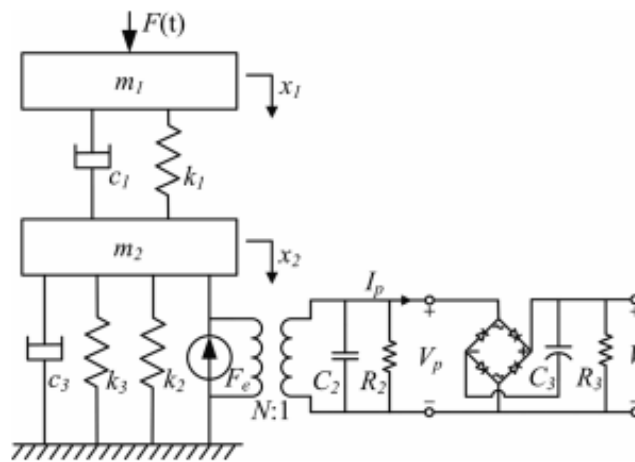
Trong khoảng thời gian từ năm 2010 trở về trước, các nhà nghiên cứu phần lớn đều sử dụng mô hình cơ học 1 bậc tự do để nghiên cứu các ứng dụng có gắn thiết bị thu thập năng lượng áp điện. Nhược điểm của mô hình cơ học 1 bậc tự do là chỉ hoạt động hiệu quả trong vùng cộng hưởng nên dẫn đến hiệu quả thu thập năng lượng không cao và chưa phản ánh sát với 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, [72].

Điển hình trong số đó có thể kể đến Tang và cộng sự đã xây dựng hai mô hình nghiên cứu thu thập năng lượng áp điện 2 bậc tự do như Hình 1.10. Ở mô

thu thập năng lượng này là gồm nhiều cụm áp điện kiểu xếp chồng được gắn trong một kết cấu cơ khí để kết nối với hệ cơ học, Hình 1.11 và Hình 1.12.



Hình 1.12 Hệ thống thí nghiệm thu thập năng lượng từ rung động nền đường

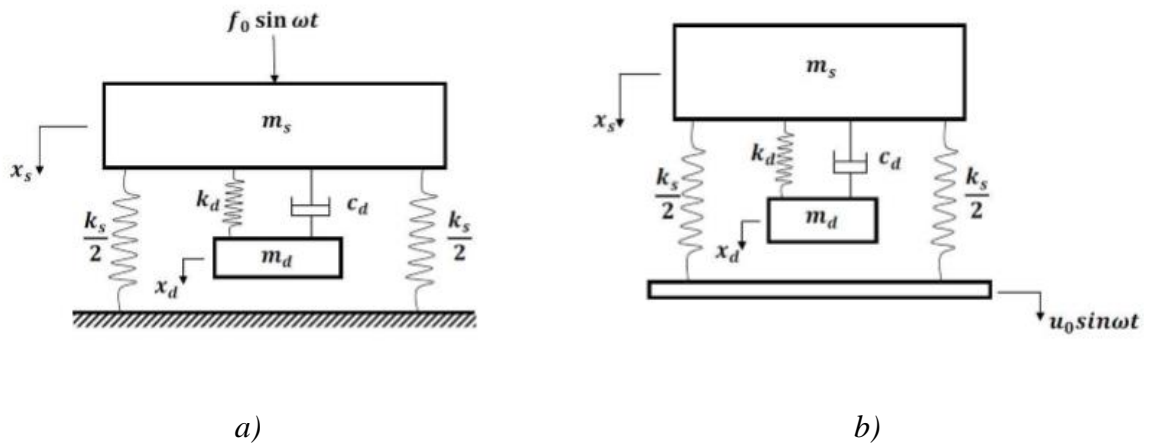


Hình 1.13 Mô hình hệ thống thu thập năng lượng áp điện từ rung động nền đường.

Phương pháp miền tần số đã được áp dụng để giải hệ phương trình vi phân nhằm xác định điện trở tối ưu và công suất điện lớn nhất được tạo ra bởi bộ thiết bị thu thập năng lượng kiểu xếp chồng. Các kết quả khảo sát lý thuyết đã được kiểm chứng bởi thực nghiệm đã chỉ ra rằng: (1) công suất điện đầu ra không chỉ phụ thuộc vào bản thân cụm thiết bị thu thập năng lượng mà còn phụ thuộc vào các tải điện trở bên ngoài. Có 1 tải điện trở tối ưu ứng với một công suất đầu ra lớn nhất. (2) giá trị của các tải điện trở tối ưu không bị ảnh hưởng bởi biên độ kích động, và tỉ lệ nghịch với tần số kích động. (3) công suất điện đầu ra tăng một cách đáng kể theo biên độ và tần số của lực kích động đầu vào, và công suất điện lớn nhất thì tỉ lệ thuận với tần số và bình phương biên độ của rung động bên ngoài.

Trong những năm trở lại đây, việc tích hợp giảm rung với thu thập năng lượng ngày càng trở nên hấp dẫn do nhu cầu ngày càng quan trọng trong các

ứng dụng khác nhau như bộ giảm rung cho các kết cấu [74]-[77] và hệ thống treo xe [78]-[81]. Một thiết bị như vậy được gọi là thiết bị có chức năng kép và phần lớn trong số đó sử dụng mô hình 2 bậc tự cho việc nghiên cứu xây dựng mô hình vật lý.



Hình 1.14 Hai kiểu mô hình bộ giảm chấn khối lượng lắp trên kết cấu chính không cân
 a) TMD lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài; b) TMD lắp trên kết cấu chính chịu kích động nền.

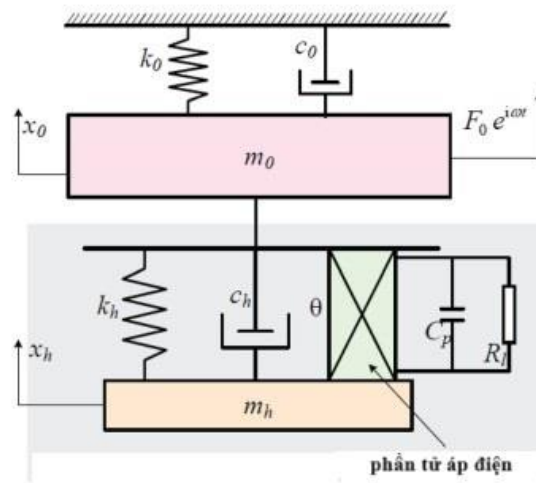
Đối với chức năng đầu tiên về giảm dao động cho kết cấu thì lựa chọn phù hợp sẽ là thiết bị giảm chấn khối lượng TMD, Hình 1.14. Thiết bị giảm chấn khối lượng TMD là một loại triệt tiêu rung động lắp ngoài, phù hợp với những kết cấu cứng và chuyển động tương đối giữa các phần trong kết cấu là nhỏ. TMD bản chất là một hệ tích hợp giữa khối lượng, lò xo với các bộ hấp thụ dao động lắp trong khác như bộ hấp thụ dao động đàn nót hoặc bộ hấp thụ dao động chất lỏng nót. Thiết bị TMD được ứng dụng cho nhiều lĩnh vực khác như công trình xây dựng, giao thông vận tải, máy móc thiết bị,... trong đó vật cần giảm dao động chuyển động như một vật rắn và được mô hình hóa như một kết cấu chính chịu kích động ngoài hoặc kích động nền, [82]-[84].

Đối với chức năng thứ hai là thu thập năng lượng áp điện từ rung động (PEH) thì thiết bị kiểu dầm áp điện và thiết bị kiểu xếp chồng là hai loại được sử dụng phổ biến nhất. Dầm áp điện làm việc theo chế độ 31 có thể gắn vào phần tử khối lượng của TMD để tận dụng quán tính của khối lượng này cho việc thu thập

năng lượng. Trong khi đó, bộ áp điện kiểu xếp chồng làm việc theo chế độ 33 có thể lắp song song hoặc nối tiếp với lò xo của TMD. Ví dụ, có thể tìm thấy một số đánh giá toàn diện về sự phát triển và ứng dụng PCB và PSEH trong các tài liệu [85]-[87]. Đáng chú ý, Caliò và cộng sự đã chứng minh rằng chế độ 33 phù hợp với ô tô và máy móc để tạo ra công suất đầu ra cao hơn, việc lắp nối tiếp sẽ ít ảnh hưởng đến hiệu quả triệt tiêu rung động của TMD so với việc lắp song song, [81]. Việc tích hợp TMD với PSEH tạo ra một thiết bị được gọi là bộ giảm chấn khối lượng kiểu áp điện xếp chồng (TMD-PSEH). Rõ ràng, bộ TMD-PSEH kiểu này thực hiện hai chức năng, một là chuyển các rung động từ kết cấu chính sang TMD, và hai là chuyển đổi năng lượng rung của TMD thành năng lượng điện thông qua PSEH.

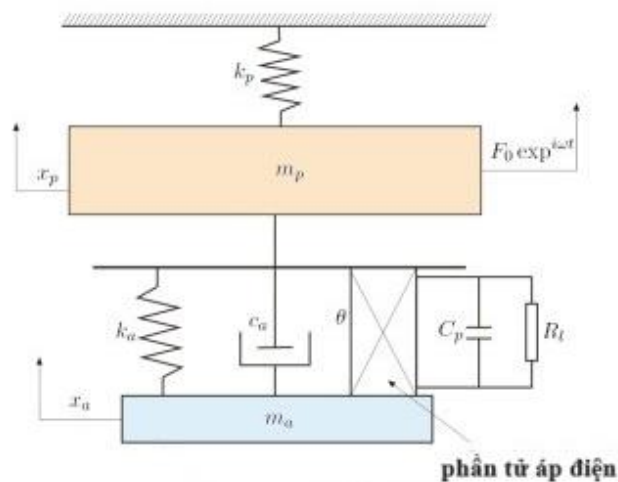
Do hiệu ứng ghép cơ điện vốn có nên việc tối ưu hóa TMD-PSEH cho cả thông số đặc tính cơ và điện là cần thiết. Tuy nhiên, không phải lúc nào cũng có thể xác định được các tham số tối ưu ở dạng biểu thức rõ ràng. Ngay cả trong trường hợp TMD, rất khó để tìm ra hệ số tỷ số tần số và giảm chấn tối ưu ngoại trừ trong một số trường hợp cụ thể, thường là khi kết cấu chính không cản. Do đặc tính không cản này, tồn tại hai điểm cố định không phụ thuộc vào hệ số cản trên đường cong biên độ-tần số của khối lượng kết cấu chính, điều này làm cơ sở cho lý thuyết điểm cố định. Lý thuyết này được đề xuất đầu tiên bởi Den Hartog [84] và sau đó được phát triển bởi Brock [89], Warburton [90], Asami và Nishihara [91], Wong và Cheung [92], Batou và Adhikari [93], là một trong rất ít các phương pháp có thể cho kết quả chính xác cho những trường hợp như vậy. Đối với các trường hợp kết cấu chính có cản cần sử dụng các phương pháp gần đúng để có được hệ số tỷ số tần số và giảm chấn tối ưu gần đúng. Một trong số đó có thể kể đến là kỹ thuật thay thế tương đương do N.D.Anh và cộng sự đề xuất [94]-[97] trong đó kết cấu chính có cản được thay thế bằng kết cấu không cản tương đương và TMD vẫn giữ nguyên. Đối với các hệ thống ghép cơ điện

như TMD-PSEH, việc xác định đồng thời các thông số cơ và điện tối ưu một cách rõ ràng gặp nhiều khó khăn hơn do sự tổ hợp giữa các biến cơ và điện.



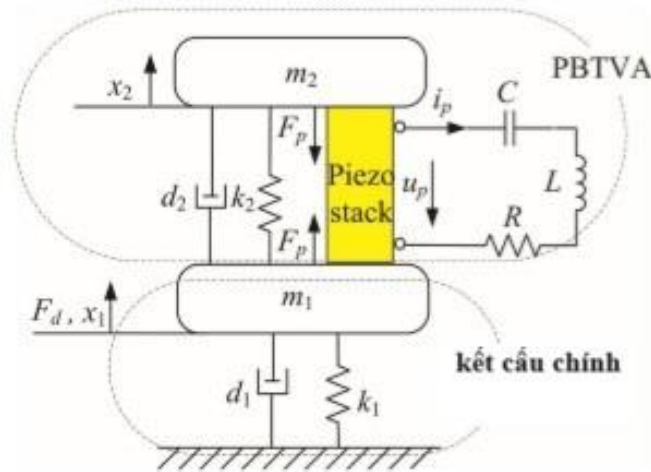
Hình 1.15 Mô hình DVA-PEH gắn trên kết cấu chính có cản của Ali và Adhikari

Như được trình bày trong công trình nghiên cứu của Ali và Adhikari [98] nghiên cứu một hệ kết cấu chính có cản tích hợp thiết bị giảm chấn động lực (DVA) với PEH ghép nối song song với lò xo của DVA dưới tác dụng của kích động ngoài điều hòa, Hình 1.15. Qua tham khảo không quan sát thấy điểm cố định độc lập với hệ số giảm chấn nên không thể xác định được thông số tối ưu trực tiếp từ lý thuyết điểm cố định của Den Hartog. Bên cạnh đó, nghiên cứu của họ chỉ ra rằng các thông số như vậy có thể áp dụng gần đúng cho các giá trị nhỏ của thông số điện.

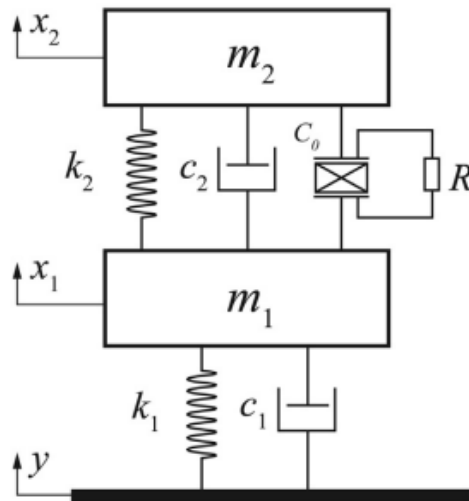


Hình 1.16 Mô hình DVA-PEH gắn trên kết cấu chính không cản của Zuppa và cộng sự

Nghiên cứu mô hình tương tự như [98] nhưng với kết cấu chính không cản, Zuppa và cộng sự [99] cố gắng giảm thiểu các đỉnh của biên độ kết cấu chính trong vùng lân cận cộng hưởng bằng cách sử dụng phân tích tiệm cận của hệ số giảm chấn như là một hàm của tỷ số khối lượng và điện trở. Họ kết luận rằng một phần tử áp điện với các thông số được chọn không chính xác có thể làm tăng đáng kể biên độ dao động, Hình 1.16.



Hình 1.17 Mô hình DVA-PEH gắn trên kết cấu chính có cản của Zhao và cộng sự.

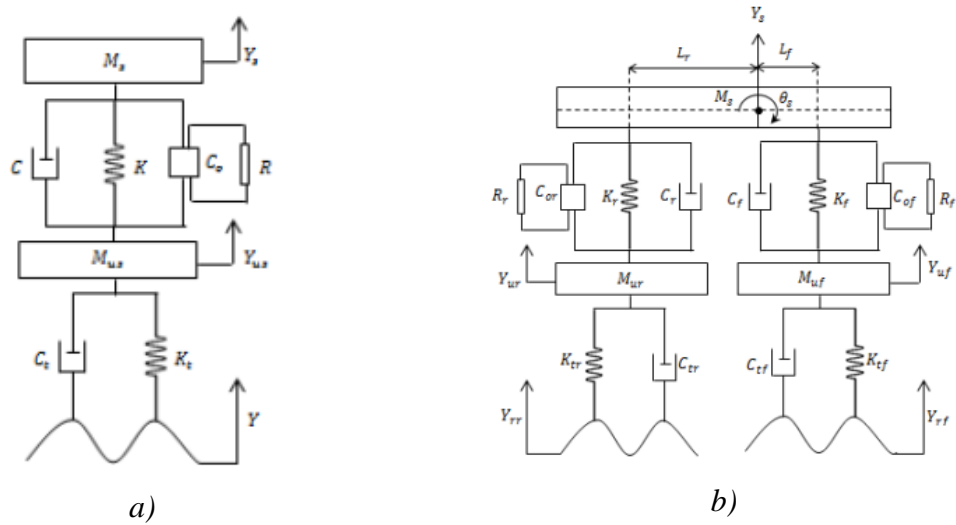


Hình 1.18 Mô hình thu thập năng lượng áp điện trên hệ thống treo của Xiao và cộng sự.

Tối ưu hóa \mathcal{H}_2 dựa trên việc giảm thiểu động năng của kết cấu chính đã được Zhao và cộng sự sử dụng [100] khi nghiên cứu TMD áp điện của sự kết hợp

song song được kết nối với mạch RLC. Trong trường hợp kích động bên ngoài với mật độ phổ đồng đều, các tham số tối ưu đã được xác định, Hình 1.17.

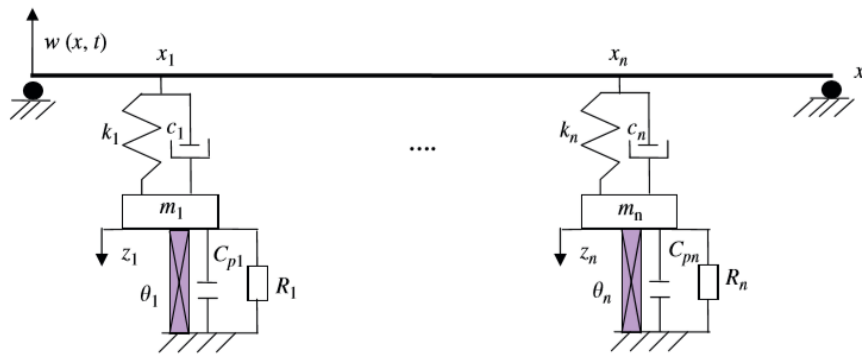
Trong [78], Xiao và cộng sự nghiên cứu về mặt giải tích và số học hệ thống treo xe 1/4 được chế tạo với PEH lắp song song, trong đó sử dụng hệ số giảm chấn của bộ giảm chấn có sẵn của xe và kích động được mô phỏng bằng gia tốc sóng hình sin, Hình 1.18.



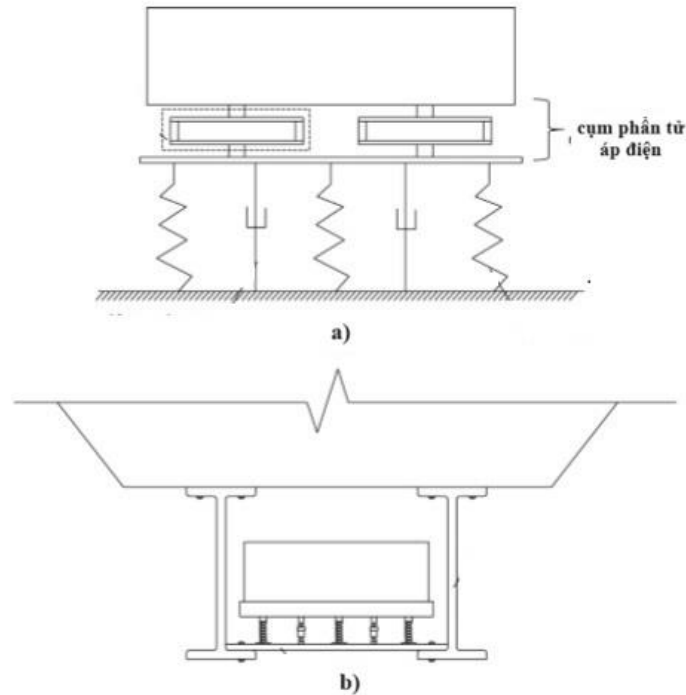
Hình 1.19 Mô hình thu thập năng lượng trên hệ thống treo của ô tô với phân tử áp điện kiểu xếp chồng lắp song song với lò xo

a) mô hình 2 bậc tự do; b) mô hình 4 bậc tự do.

Cũng dựa trên ý tưởng đó, Al-Yafeai và cộng sự đã trình bày mô hình nghiên cứu hệ thu thập năng lượng 2 bậc tự do và 4 bậc tự do ứng với mô hình 1/2 và 1/4 trên hệ thống treo của ô tô mà trong đó các phân tử áp điện được lắp song song với lò xo, Hình 1.19, [101].



Hình 1.20 Mô hình TMD-PSEH gắn với dầm dao động của Ouled Chtiba và cộng sự.



Hình 1.21 Mô hình TMD-PEH với PEH gắn nối tiếp với hệ lò xo và cản trong TMD của Pan và cộng sự

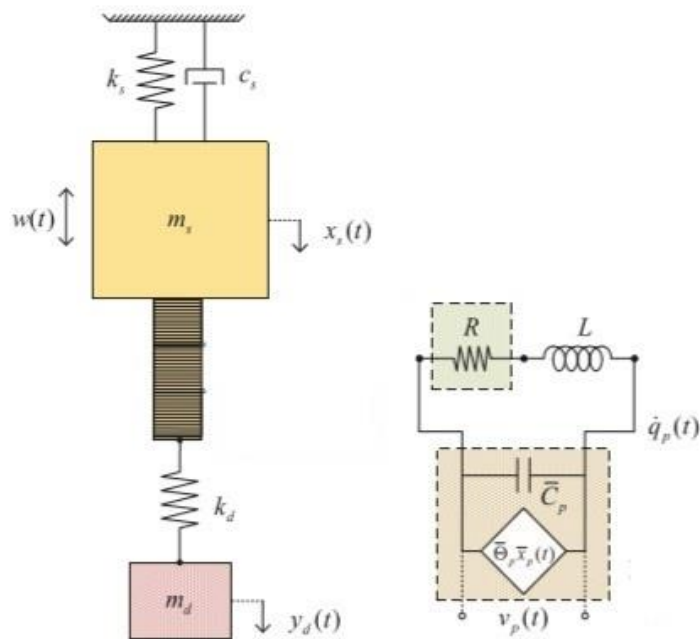
a) Mô hình PEH gắn nối tiếp với hệ lò xo và cản của TMD, b) Sơ đồ lắp đặt TMD-PEH với cầu thông qua dầm thép.

Ouled Chtiba và cộng sự đã xem xét việc gắn TMD-PSEH vào một dầm dao động trong đó PSEH được cố định trên mặt đất. Sử dụng phương pháp rời rạc hóa bằng tiêu chuẩn Galerkin, hệ phương trình mô tả cơ hệ được viết dưới dạng mô hình phân tử tập trung. Một tập hợp các thông số cơ và điện của TMD-PSEH được giải bằng số bằng cách tối thiểu hóa tổng năng lượng của dầm, bao gồm cả động năng và thế năng biến dạng, Hình 1.20, [102].

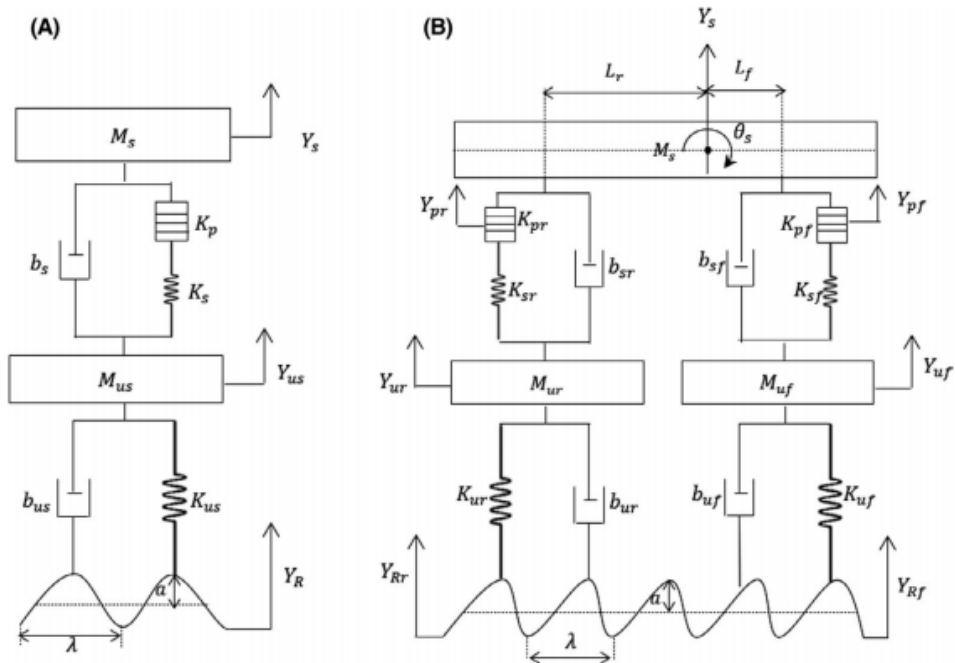
Có thể thấy rằng trong các nghiên cứu [78], [98]-[102] thì các tác giả đã sử dụng mô hình mà ở đó phân tử áp điện PEH được kết nối song song với lò xo của thiết bị giảm chấn.

Đối với sự kết nối nối tiếp giữa lò xo của TMD và PSEH, Pan và cộng sự đã thực hiện nghiên cứu một TMD-PEH trong đó PEH được mô hình hóa bằng khối lò xo kết nối với khối lượng của TMD ở một đầu và với lò xo của TMD ở đầu kia. TMD-PEH được tách khỏi kết cấu chính, thay vào đó bằng kích động

nền và các thông số cơ học tối ưu được xác định bằng cách sử dụng thông số thay thế tương đương từ các kết quả tối ưu của Den Hartog, Hình 1.21, [103].



Hình 1.22 Mô hình TMD-PSEH không cân gắn với gắn với kết cấu chính có cân của Lai và cộng sự.

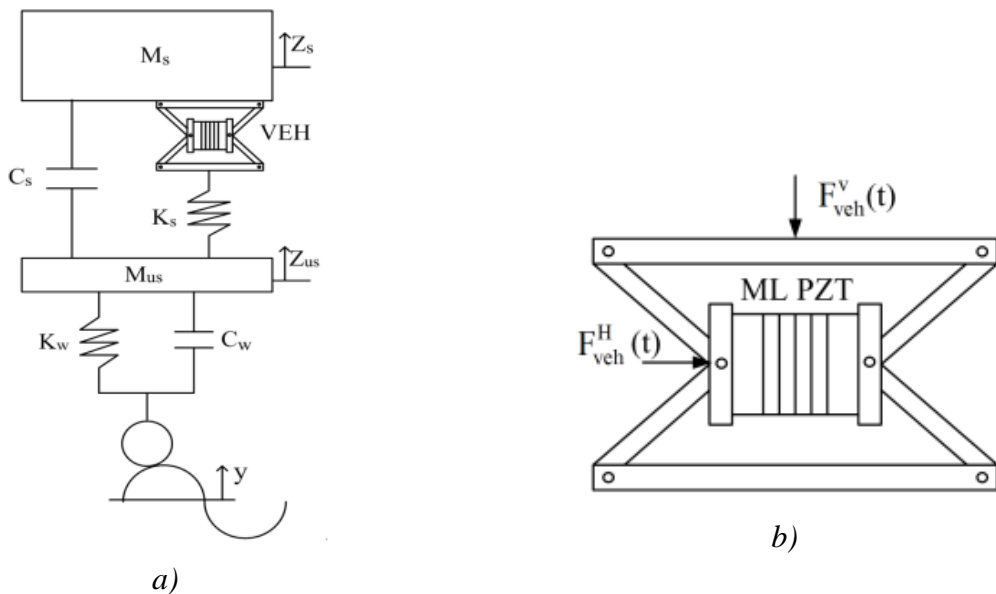


Hình 1.23 Mô hình thu thập năng lượng trên hệ thống treo của ô tô với phân tử áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với lò xo của Al-Yafeai và cộng sự

A) mô hình 2 bậc tự do; B) mô hình 4 bậc tự do.

Trong [75], Lai và cộng sự đã nghiên cứu một TMD-PSEH không cản gắn với kết cấu chính có cản. PSEH được gắn nối tiếp với lò xo của TMD và là một khối áp điện kiểu xếp chồng nhiều cột có thể được đặc trưng bởi một khối áp điện kiểu xếp chồng tương đương. Quy trình thiết kế tối ưu cho PSEH được thực hiện bằng cách sử dụng bộ giải số tối ưu số có sẵn, Hình 1.22.

Al-Yafeai và cộng sự đã trình bày mô hình nghiên cứu hệ thu thập năng lượng 2 bậc tự do và 4 bậc tự do ứng với mô hình $\frac{1}{2}$ và $\frac{1}{4}$ trên hệ thống treo của ô tô với phần tử áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với lò xo chịu kích động nền ngẫu nhiên, Hình 1.23. Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp miền tần số và miền thời gian, sau đó mô phỏng kiểm chứng trên phần mềm Matlab/Simulink để đánh giá và so sánh công suất năng lượng thu thập được từ hai mô hình đã xây dựng, [104].



Hình 1.24 Thu thập năng lượng áp điện cho hệ thống treo với khung khuếch đại lực của Hendrowati và cộng sự, [105]

a) mô hình hệ thống treo 2 bậc tự do lắp thiết bị thu thập năng lượng, b) kết cấu thiết bị thu thập năng lượng kiểu cụm áp điện nhiều lớp

Trong [105], Hendrowati và cộng sự đã thực hiện một nghiên cứu số với mô hình xe ô tô $\frac{1}{4}$ mà trong đó hệ thống treo bao gồm một bộ thu thập năng lượng có và không có khung khuếch đại lực cho PSEH. Trong mô hình này, lò xo của TMD/DVA, PSEH và khung khuếch đại lực có thể được coi là các phần tử đàn

hồi được lắp nối tiếp, Hình 1.24. Các nghiên cứu tập trung vào thiết bị thu thập năng lượng ứng dụng cho ô tô có thể được tóm tắt trong bài đánh giá [81].

Việc thu thập năng lượng điện mong muốn từ sự giảm rung của hệ thống giảm chấn-lò xo-khối lượng được phân tích một cách có hệ thống bởi Stephen [106], bắt nguồn từ mối quan hệ giữa năng lượng đầu vào và đầu ra. Liang và Liao đã thiết lập dòng năng lượng trong các hệ thống PEH dựa trên sự tương tự cơ-điện trong đó việc biểu diễn các hệ thống cơ như các mạch điện, [107]. Một đánh giá ngắn về vấn đề này có thể được tìm thấy trong công trình của Yang và cộng sự [108].

1.4. Đặt vấn đề nghiên cứu của luận án

Qua các phân tích trên đây có thể thấy rằng không có điểm cố định nào độc lập với hệ số giảm chấn của TMD-PSEH được đưa ra trong các nghiên cứu dành cho TMD/DVA [78], [81], [99]-[105]. Đồng thời, các tham số tối ưu của TMD-PSEH cũng không được xác định tường minh bằng phương pháp giải tích. Bên cạnh đó, việc phân tích dòng năng lượng/công suất của các hệ thống thu thập năng lượng áp điện như TMD-PSEH vẫn là một vấn đề còn bỏ ngỏ.

Bên cạnh đó thì các nghiên cứu kể trên chủ yếu tập trung vào các hệ thống thu thập năng lượng đơn chức năng. Để biết thêm thông tin về một số mô hình Piezo-TMD khác nói riêng và TMD chức năng kép nói chung được tóm tắt và phân loại một cách có hệ thống trong một bài đánh giá tổng hợp của Cai và Zhu [109], hoặc bởi công trình của Giaralis [110]. Họ chỉ ra rằng nhiệm vụ chính của PEH, cũng như các ứng dụng của nó đối với Piezo-TMD, là cung cấp nguồn điện cho các cảm biến không dây công suất thấp (từ hàng chục đến hàng trăm miliwatt), mặt khác, đây là một giải pháp phù hợp đối với các trường hợp cần cân nhắc đến giới hạn về không gian hoặc trọng lượng khi so sánh với bộ chuyển đổi điện từ [111].

Như vậy có thể thấy rằng, như đã nhận xét trong [78], “*việc áp dụng vật liệu áp điện trong TMD/DVA vẫn đang được phát triển*”.

Vì vậy, luận án này tập trung vào việc nghiên cứu xác định các tham số tối ưu và chuyển đổi dòng năng lượng của một bộ thiết bị chức năng kép TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động điều hòa dựa trên phương pháp điểm cố định của Den Hartog.

Kết luận chương 1

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.

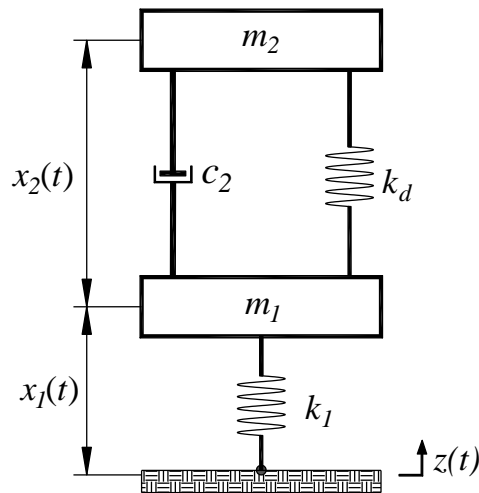
Chương 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN THIẾT BỊ GIẢM CHẤN KHỐI LƯỢNG KIỂU ÁP ĐIỆN XẾP CHỒNG

Trong chương này, Luận án trình bày cơ sở lý thuyết về lý thuyết điểm cố định của Den Hartog để xác định các tham số tối ưu cho thiết bị giảm chấn khối lượng TMD lắp trên kết cấu chính không cản chịu kích động nền và kích động ngoài điều hòa. Tiếp theo là các phương án tích hợp cụm áp điện kiểu xếp chồng với thiết bị giảm chấn khối lượng để làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình và tính toán xác định các tham số của TMD-PSEH.

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 $z(t)$. Trong đó m_1 là khối lượng kết cấu chính, m_2 là khối lượng của TMD, c_2 và k_d lần lượt là hệ số cản và độ cứng phân tử đàn hồi của TMD, k_1 là độ cứng phân tử đàn hồi của kết cấu chính, x_1 và x_2 lần lượt là dịch chuyển tương đối của m_1 và m_2 .



Hình 2.1 Mô hình kết cấu chính không cản với TMD chịu kích động nền

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

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

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

trong đó $z(t)$ được mô tả dưới dạng:

$$z(t) = z_0 \cos \Omega t, \ddot{z}(t) = -z_0 \Omega^2 \cos \Omega t \quad (2.3)$$

với z_0 và Ω là biên độ và tần số của kích động.

$$\text{Đặt: } \mu = \frac{m_2}{m_1}, \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_2}}, \xi = \frac{c_2}{2m_2\omega_d}, \beta = \frac{\omega_d}{\omega_1}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_1} \quad (2.4)$$

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 giữa TMD và kết cấu chính; λ là tỷ số của tần số kích động với tần số tự nhiên của kết cấu chính.

Khi đó, hệ phương trình (2.1)-(2.2) được viết dưới dạng:

$$\ddot{x}_1 - 2\mu\omega_d\xi\dot{x}_2 + \omega_1^2x_1 - \mu\omega_d^2x_2 = -\ddot{z} \quad (2.5)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\omega_d\xi\dot{x}_2 + \omega_d^2x_2 = -\ddot{x}_1 - \ddot{z} \quad (2.6)$$

Áp dụng phương pháp biên độ phức để giải hệ (2.5) và (2.6), [120], [121].

Xét kích động nền (2.3) biểu diễn dưới dạng phức:

$$z = z_0 e^{i\Omega t} \quad (2.7)$$

Theo đó, nghiệm bình ổn của hệ (2.5)-(2.6) có thể được viết dưới dạng:

$$x_1(t) = X_1 e^{i\Omega t}, x_2(t) = X_2 e^{i\Omega t} \quad (2.8)$$

trong đó X_1, X_2 là các biên độ phức.

Thay (2.7), (2.8) vào (2.5)-(2.6) rồi giải hệ phương trình ta thu được hệ số các hệ số khuếch đại giữa biên độ đáp ứng và biên độ kích động lần lượt là:

$$H = \lambda^2 \sqrt{\frac{(\beta^2(1+\mu) - \lambda^2)^2 + 4\beta^2\lambda^2(1+\mu)^2\xi^2}{((1-\lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\beta^2\lambda^2)^2 + 4\beta^2\lambda^2(\lambda^2(1+\mu) - 1)^2\xi^2}} \quad (2.9)$$

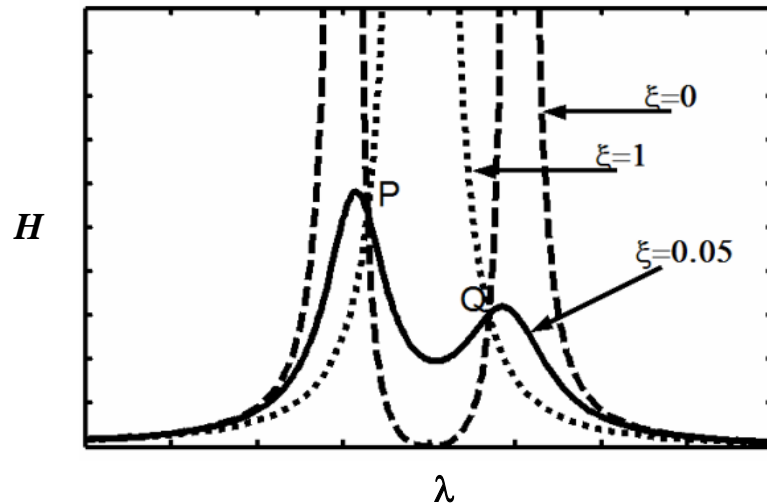
$$G = \frac{\lambda^2}{\sqrt{((1-\lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\beta^2\lambda^2)^2 + 4\beta^2\lambda^2(\lambda^2(1+\mu) - 1)^2\xi^2}} \quad (2.10)$$

Từ (2.9) ta có thể thấy rằng hàm khuếch đại H của kết cấu chính có dạng:

$$H = \sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2 \xi^2}{H_3^2 + H_4^2 \xi^2}} \quad (2.11)$$

Đến đây, để xác định các tham số tối ưu của TMD như tỷ số tần số tự nhiên β và tỷ số cản ξ ta sử dụng phương pháp điểm cố định được đề xuất bởi Den Hartog vào năm 1956, [82], [84].

Mục đích của phương pháp này là hạ thấp nhất có thể đỉnh của hàm khuếch đại H trong toàn bộ miền biến thiên của tần số kích động. Khi cố định các tham số ngoại trừ tham số ξ , đồ thị H theo biến thiên của λ với một số giá trị của ξ có dạng như trên Hình 2.2.



Hình 2.2 Đồ thị hệ số khuếch đại của kết cấu chính theo sự biến thiên của tần số kích động

Trên Hình 2.2 ta thấy, với 2 trường hợp tới hạn $\xi = 0$ (không cản) và $\xi = 1$ (cản tới hạn) đều dẫn tới đỉnh của đồ thị tiến ra vô cùng. Điều đó cho thấy giữa 2 giá trị này tồn tại một giá trị tối ưu nào đó của tỷ số cản ξ . Ngoài ra, tính chất không cản của hệ chính dẫn tới sự tồn tại của 2 điểm cố định P, Q không phụ thuộc vào tỷ số cản ξ của TMD.

Bước đầu tiên của phương pháp điểm cố định là tìm 2 điểm cố định P, Q. Giả sử 2 điểm P, Q có hoành độ là λ_1 và λ_2 . Để H không phụ thuộc vào ξ thì:

$$\left. \frac{\partial H}{\partial \xi} \right|_{\lambda=\lambda_1} = \left. \frac{\partial H}{\partial \xi} \right|_{\lambda=\lambda_2} = 0 \quad (2.12)$$

Từ biểu thức của H trong (2.11), rút ra các phương trình:

$$\left| \frac{H_1}{H_3} \right|_{\lambda=\lambda_1} = \left| \frac{H_2}{H_4} \right|_{\lambda=\lambda_1} \quad (2.13)$$

$$\left| \frac{H_1}{H_3} \right|_{\lambda=\lambda_2} = \left| \frac{H_2}{H_4} \right|_{\lambda=\lambda_2} \quad (2.14)$$

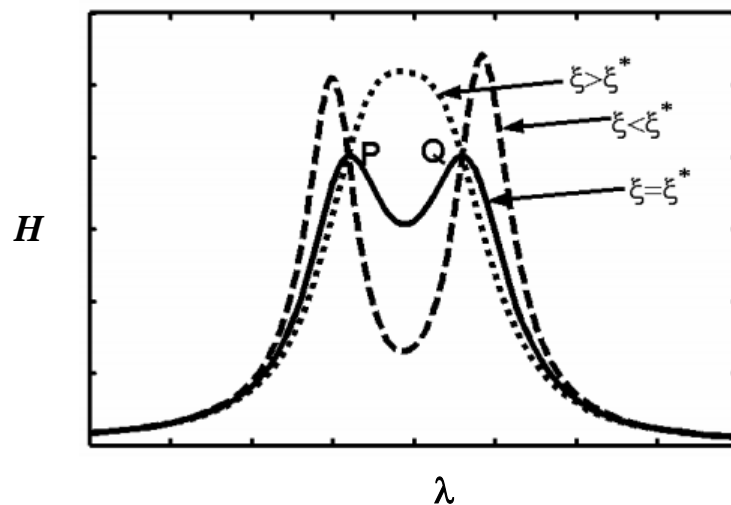
Và ta cũng thu được giá trị của H tại 2 điểm này là:

$$H|_P = \left| \frac{H_2}{H_4} \right|_{\lambda=\lambda_1} ; H|_Q = \left| \frac{H_2}{H_4} \right|_{\lambda=\lambda_2} \quad (2.15)$$

Sau đó, Den Hartog lý luận rằng muốn đồ thị H không thay đổi lớn trong khoảng giữa 2 đỉnh thì trước hết cần phải cho 2 điểm P và Q có độ cao bằng nhau, dẫn đến thêm một phương trình:

$$H|_P = H|_Q \Rightarrow \left| \frac{H_2}{H_4} \right|_{\lambda=\lambda_1} = \left| \frac{H_2}{H_4} \right|_{\lambda=\lambda_2} \quad (2.16)$$

Như vậy đến đây ta có 3 phương trình (2.13), (2.14) và (2.16) cho 3 ẩn λ_1 , λ_2 và β . Chú ý rằng tính chất không cản của hệ chính làm cho các hàm H_i ($i = 1, \dots, 4$) không phụ thuộc vào ξ . Do đó hệ (2.13), (2.14) và (2.16) là hệ 3 phương trình đồng với 3 ẩn λ_1 , λ_2 và β . Hệ này có lời giải không phụ thuộc ξ . Kết quả cho nghiệm tối ưu của β là β^* .



Hình 2.3 Dạng biến thiên của hàm khuếch đại khi tỷ số tần số tự nhiên đã được chỉnh đến giá trị tối ưu

Bước thứ hai của phương pháp điểm cố định là tìm thêm một phương trình nữa cho ẩn ξ . Sau khi đã có 2 điểm cố định P, Q cao bằng nhau, nếu vẽ đồ thị H theo tỷ số tần số với các giá trị ξ khác nhau, ta lại có dạng trên Hình 2.3.

Khi ξ nhỏ thì có 2 đỉnh của đồ thị cao hơn P và Q. Khi ξ tăng dần thì 2 đỉnh đó thấp dần xuống. Đến một giá trị ξ^* thì 2 đỉnh này đã thấp khá gần P, Q. Nếu lại tăng tiếp nữa thì 2 đỉnh tiến tới chập làm một và đỉnh duy nhất này lại cao lên. Như vậy tồn tại một giá trị ξ^* mà ta cần tìm sao cho P và Q gần với các đỉnh của đồ thị nhất. Trước hết ta tìm giá trị ξ_l sao cho P là một đỉnh của đồ thị. Khi P là đỉnh của đồ thị thì đạo hàm của H theo λ tại đó (tại $\lambda = \lambda_l$) bằng 0. Xuất phát từ biểu thức (2.11) của hàm khuếch đại H ta có:

$$H^2(H_3^2 + \xi^2 H_4^2) = (H_1^2 + \xi^2 H_2^2) \quad (2.17)$$

Lấy đạo hàm 2 vế (2.17) theo λ tại $\lambda = \lambda_l$ và chú ý tới điều kiện $\partial H / \partial \lambda = 0$ tại λ_l thì ta thu được:

$$H^2 = \frac{H_1 \frac{\partial H_1}{\partial \lambda} + \xi^2 H_2 \frac{\partial H_2}{\partial \lambda}}{H_3 \frac{\partial H_3}{\partial \lambda} + \xi^2 H_4 \frac{\partial H_4}{\partial \lambda}} \quad (2.18)$$

Dẫn tới:

$$\xi^2 = - \frac{H_1 \frac{\partial H_1}{\partial \lambda} - H^2 H_3 \frac{\partial H_3}{\partial \lambda}}{H_2 \frac{\partial H_2}{\partial \lambda} - H^2 H_4 \frac{\partial H_4}{\partial \lambda}} \quad (2.19)$$

Thay các giá trị β^* và λ_l vào (2.19) ta có thể tính được ξ_l để P là một đỉnh của đồ thị như sau:

$$\xi_l^2 = - \frac{H_1 \frac{\partial H_1}{\partial \lambda} - H^2 H_3 \frac{\partial H_3}{\partial \lambda}}{H_2 \frac{\partial H_2}{\partial \lambda} - H^2 H_4 \frac{\partial H_4}{\partial \lambda}} \Bigg|_{\beta=\beta^* \& \lambda=\lambda_l} \quad (2.20)$$

Với cách làm tương tự ta tính được giá trị ζ_2 để Q là một đỉnh của đồ thị là:

$$\zeta_2^2 = - \frac{H_1 \frac{\partial H_1}{\partial \lambda} - H^2 H_3 \frac{\partial H_3}{\partial \lambda}}{H_2 \frac{\partial H_2}{\partial \lambda} - H^2 H_4 \frac{\partial H_4}{\partial \lambda}} \Bigg|_{\beta=\beta^* \& \lambda=\lambda_2} \quad (2.21)$$

Do ζ_1 và ζ_2 khác nhau nên P và Q không thể đồng thời cùng là đỉnh. Giá trị tối ưu ζ^* sẽ tương ứng với trường hợp P và Q gần các đỉnh nhất như đã thấy trên Hình 2.3. Giá trị này sẽ được lấy là giá trị trung bình bình phương của ζ_1 và ζ_2 [Brock 1946]:

$$\zeta^* = \sqrt{\frac{\zeta_1^2 + \zeta_2^2}{2}} \quad (2.22)$$

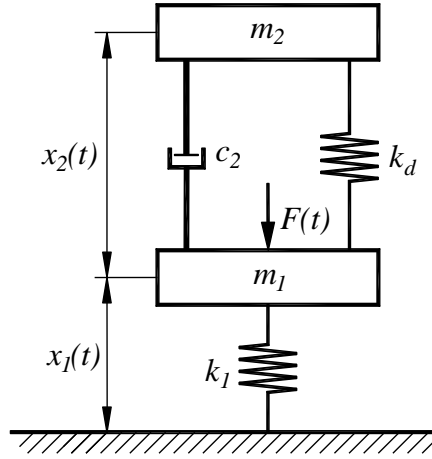
Tóm lại phương pháp điểm cố định được thực hiện bằng việc giải 6 phương trình (2.13), (2.14) và (2.16), (2.20), (2.21), (2.22) trong đó 3 phương trình đầu được giải độc lập không phụ thuộc vào căn của TMD. Từ đó ta thu được công thức xác định tỷ số tần số tự nhiên và hệ số cản tối ưu của TMD lắp trên kết cấu chính không cản chịu kích động nền là:

$$\beta^* = \frac{\sqrt{2+\mu}}{\sqrt{2(1+\mu)}} \quad (2.23)$$

$$\zeta^* = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (2.24)$$

2.1.2. Kết cấu chính chịu kích động ngoài

Tiếp theo ta xem xét hệ cơ học được mô tả trên Hình 2.4 bao gồm thiết bị giảm chấn khối lượng (TMD) gắn trên kết cấu chính chịu kích động ngoài điều hòa $F(t)$. Trong đó m_1 là khối lượng kết cấu chính, m_2 là khối lượng của TMD, c_2 và k_d lần lượt là hệ số cản và độ cứng phần tử đàn hồi của TMD, k_1 là độ cứng phần tử đàn hồi của kết cấu chính, x_1 và x_2 lần lượt là dịch chuyển tương đối của khối lượng m_1 và m_2 .



Hình 2.4 Mô hình kết cấu chính không cân với bộ giảm chấn khối lượng chịu kích động ngoài
 Hệ phương trình vi phân mô tả hệ được viết dưới dạng:

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + k_1 x_1 - k_d x_2 = F(t) \quad (2.25)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_d x_2 = -m_2 \ddot{x}_1 \quad (2.26)$$

trong đó $F(t)$ được mô tả dưới dạng:

$$F(t) = F_0 \cos \Omega t \quad (2.27)$$

với F_0 và Ω là biên độ và tần số của lực kích động.

$$\text{Đặt} \quad \mu = \frac{m_2}{m_1}, \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_2}}, \xi = \frac{c_2}{2m_2\omega_d}, \beta = \frac{\omega_d}{\omega_1} \quad (2.28)$$

ở đây μ là tỷ lệ khối lượng, ω_1 and ω_d lần lượt là tần số tự nhiên của kết cấu chính và TMD, ξ là hệ số giảm chấn của TMD, β là tỷ số tần số tự nhiên của TMD và kết cấu chính.

Khi đó, hệ phương trình (2.25)-(2.26) được viết dưới dạng:

$$\ddot{x}_1 - 2\mu\omega_d\xi\dot{x}_2 + \omega_1^2 x_1 - \mu\omega_d^2 x_2 = \frac{F(t)}{m_1} \quad (2.29)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\omega_d\xi\dot{x}_2 + \omega_d^2 x_2 = -\ddot{x}_1 \quad (2.30)$$

Xét kích động nền (2.27) biểu diễn dưới dạng phức:

$$F(t) = F_0 e^{i\Omega t} \quad (2.31)$$

Theo đó, nghiệm bình ổn của hệ (2.29)-(2.30) có thể được viết dưới dạng:

$$x_1(t) = X_1 e^{i\Omega t}, x_2(t) = X_2 e^{i\Omega t} \quad (2.32)$$

trong đó X_1, X_2 là các biên độ phức.

Thay (2.31), (2.32) vào (2.29)-(2.30) rồi giải hệ phương trình ta thu được các hệ số khuếch đại dao động của kết cấu chính K_1 và TMD K_2 lần lượt là:

$$K_1 = \frac{|X_1|}{F_0/k_1} = \lambda^2 \sqrt{\frac{(\beta^2(1+\mu) - \lambda^2)^2 + 4\beta^2\lambda^2(1+\mu)^2\xi^2}{((1-\lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\beta^2\lambda^2)^2 + 4\beta^2\lambda^2(\lambda^2(1+\mu) - 1)^2\xi^2}} \quad (2.33)$$

$$K_2 = \frac{|X_2|}{F_0/k_1} = \frac{\lambda^2}{\sqrt{((1-\lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\beta^2\lambda^2)^2 + 4\beta^2\lambda^2(\lambda^2(1+\mu) - 1)^2\xi^2}} \quad (2.34)$$

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 cản chịu kích động ngoài là:

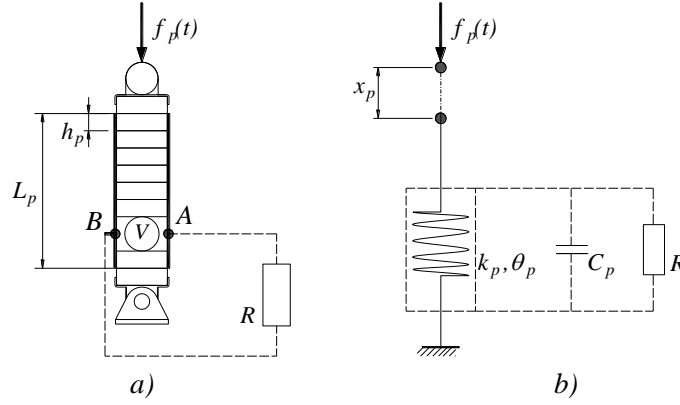
$$\beta_{DH} = \frac{1}{1+\mu} \quad (2.35)$$

$$\xi_{DH} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (2.36)$$

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

Để thực hiện các nghiên cứu lý thuyết và thiết kế các thiết bị thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng cho các ứng dụng trong thực tế, các nhà nghiên cứu đã sử dụng 2 kiểu mô hình phổ biến của PZT-Stack. Kiểu thứ nhất đó là sử dụng mô hình phần tử hữu hạn (FEMs). Các mô hình kiểu này thường sử dụng các gói phần mềm thương mại như ANSYS để thực hiện nghiên cứu. Chúng có thể thiết lập một mô hình 3 chiều thực tế để thực hiện quá trình mô phỏng số. Kiểu thứ hai là các mô hình giải tích như: mô hình đơn giản hóa với yêu cầu tần số làm việc phải cách xa tần số cộng hưởng; mô hình 1 bậc tự do; mô hình mạch tương đương; mô hình bảo toàn năng lượng; mô hình trở kháng cơ điện; mô hình tham số phân tán đơn giản; mô hình ma trận chuyển đổi đơn giản; mô hình lý thuyết đàn hồi áp điện tuyến tính, [112].



Hình 2.5 Mô hình hóa PSEH: a) sơ đồ cấu tạo, b) mô hình cơ điện

Kết cấu của một PSEH thông dụng được mô tả ở Hình 2.5a, 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 2.5b. Quan hệ giữa $f_p(t)$ và $V(t)$ thể hiện liên kết cơ điện, có thể biểu diễn thông qua quan hệ ứng suất – nạp điện như sau, [115].

$$T_3(t) = c_{33}S_3(t) - e_{33}E_3(t) \quad (2.37)$$

$$D_3(t) = e_{33}S_3(t) + \varepsilon_{33}E_3(t) \quad (2.38)$$

trong đó $S_3(t)$ và $T_3(t)$ là biến dạng dọc trục và ứng suất pháp, $E_3(t)$ và $D_3(t)$ là cường độ điện trường và độ dịch chuyển điện tích, c_{33} là độ cứng, e_{33} là hằng số áp điện, và ε_{33} là độ từ thẩm. Quan hệ giữa các đại lượng này với $f_p(t), V(t), L_p$, khoảng cách tác dụng của điện trường L_e , diện tích mặt cắt ngang của phần tử áp điện A và diện tích bề mặt nằm trong điện trường A_e được mô tả bởi các phương trình như sau

$$T_3(t) = \frac{f_p(t)}{A}, S_3(t) = \frac{x_p(t)}{L_p}, E_3(t) = -\frac{V(t)}{L_e}, D_3(t) = \frac{q(t)}{A_e} \quad (2.39)$$

Thay (2.39) vào (2.37) và (2.38) ta được

$$f_p(t) = \frac{c_{33}A}{L_p} x_p(t) + \frac{e_{33}A}{L_e} V(t) \quad (2.40)$$

$$q(t) = \frac{e_{33}A_e}{L_p} x_p(t) - \frac{\varepsilon_{33}A_e}{L_e} V(t) \quad (2.41)$$

Đối với PSEH có n lớp được nối song song về điện, ta có $L_p = nh_p, L_e = h_p, A_e = nA$. Theo đó, các phương trình chủ đạo (2.40) và (2.41) được viết lại là

$$f_p(t) = k_p x_p(t) + \theta_p V(t) \quad (2.42)$$

$$q(t) = \theta_p x_p(t) - C_p V(t) \quad (2.43)$$

trong đó

$$k_p = \frac{c_{33}A}{nh_p}, \theta_p = \frac{e_{33}A}{h_p}, C_p = n \frac{\varepsilon_{33}A}{h_p} \quad (2.44)$$

Về mặt vật lí, k_p, θ_p, C_p tương ứng với độ cứng, hệ số liên kết cơ điện hiệu dụng và điện dung của PSEH. Nói một cách khác, PSEH tương đương với một lò xo về mặt cơ học, tương đương với một tụ điện về mặt điện.

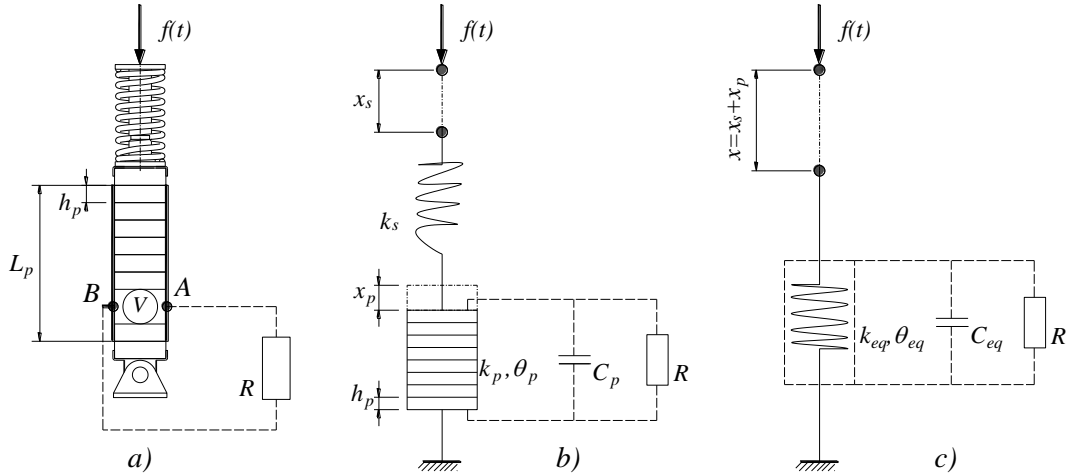
2.2.2. Mô hình cụm áp điện kiểu xếp chồng lắp nối tiếp với phần tử đàn hồi

Hình 2.6a 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 2.6b.

Về mặt cơ học PSEH tương đương với một lò xo có độ cứng k_p , nên tổ hợp này tương đương với hai lò xo mắc nối tiếp. Do đó, lực dọc trong hai phần tử này bằng nhau và bằng lực tác dụng $f(t)$:

$$f(t) = f_p = f_s \quad (2.45)$$

trong đó f_p và f_s lần lượt là lực dọc trong các phần tử áp điện và lò xo.



Hình 2.6 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.

Tương tự, biến dạng tổng thể bằng tổng biến dạng của chúng:

$$x = x_s + x_p \quad (2.46)$$

Từ (2.42), (2.45) và (2.46) ta có:

$$x_p = \frac{f}{k_p} - \frac{\theta_p}{k_p} V \quad (2.47)$$

Lực dọc trong lò xo là:

$$f_s = k_s (x - x_p) \quad (2.48)$$

Thay (2.47) vào (2.48) rút ra được:

$$x_p = x - \frac{f}{k_s} \quad (2.49)$$

Cân bằng (2.49) và (2.47) thu được:

$$f = \frac{k_s k_p}{k_s + k_p} x + \frac{k_s}{k_s + k_p} \theta_p V \quad (2.50)$$

Tiếp theo, thay (2.47) và (2.50) vào (2.43) ta được:

$$q = \frac{k_s}{k_s + k_p} \theta_p x - \left(C_p + \frac{\theta_p^2}{k_s + k_p} \right) V \quad (2.51)$$

Các phương trình (2.50) và (2.51) có thể được viết lại là:

$$f = k_{eq}x + \theta_{eq}V \quad (2.52)$$

$$q = \theta_{eq}x - C_{eq}V \quad (2.53)$$

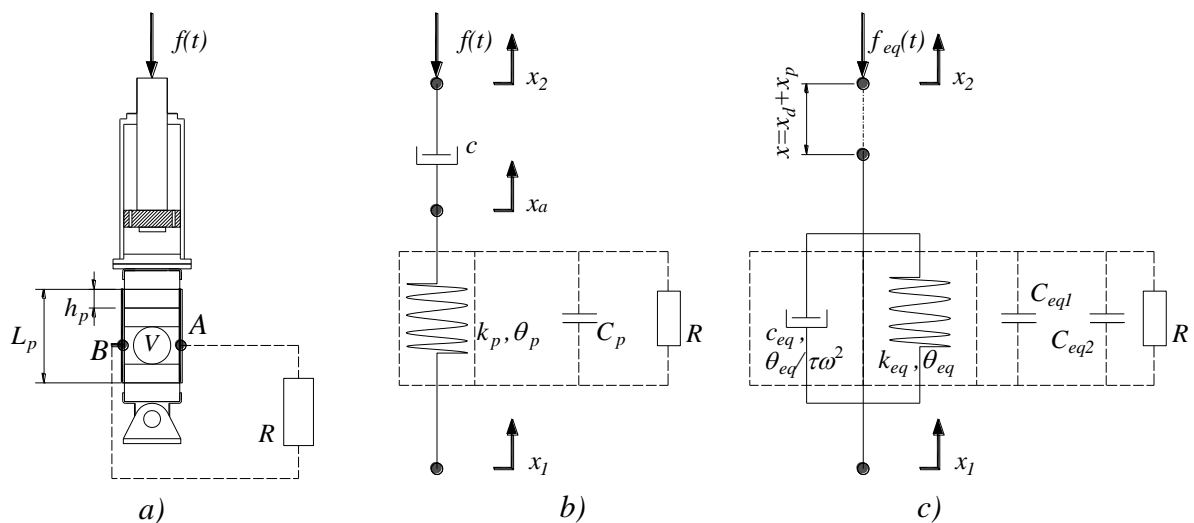
trong đó

$$k_{eq} = \frac{k_s k_p}{k_s + k_p}, \theta_{eq} = \frac{k_s}{k_s + k_p} \theta_p, C_{eq} = C_p + \frac{\theta_p^2}{k_s + k_p} \quad (2.54)$$

So sánh (2.52), (2.53) với (2.42), (2.43) cho thấy chúng có dạng tương tự. Nghĩa là tổ hợp PSEH-lò xo nối tiếp có thể được thay thế bằng một PSEH tương đương, có độ cứng, hệ số liên kết cơ điện hiệu dụng và điện dung tương đương là k_{eq}, θ_{eq} và C_{eq} . Các phương trình (2.52), (2.53) là các phương trình mô tả của PSEH tương đương, biểu diễn theo tọa độ của biến dạng tổng thể x .

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

Hình 2.7a 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 2.7b. 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 2.7 Mô hình của PSEH lắp nối tiếp với cản

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

Gọi x_1, x_2 và x_a là chuyển vị tuyệt đối tại hai đầu nút của phần tử Maxwell và chuyển vị tuyệt đối của nút liên kết, biến dạng của các phần tử áp điện và cản lần lượt là $x_a - x_1$ và $x_2 - x_a$. Lực dọc trong phần tử áp điện f_p bằng lực dọc trong phần tử cản f_d và bằng lực tác dụng $f(t)$:

$$f = f_p = f_d \quad (2.55)$$

trong đó

$$\begin{aligned} f_p &= k_p (x_a - x_1) + \theta_p V \\ f_d &= c (\dot{x}_2 - \dot{x}_a) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Từ (2.55), (2.56) rút ra:

$$f = c (\dot{x}_2 - \dot{x}_a) = k_p (x_a - x_1) + \theta_p V \quad (2.57)$$

Để chuyển đổi mô hình Maxwell về mô hình tương đương không có nút liên kết ở giữa, xét trường hợp lực tác dụng có dạng:

$$f = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.58)$$

trong đó F_0 và ω là biên độ và tần số của lực tác dụng.

Theo đó, ta có các quan hệ sau:

$$\dot{x}_1 = i\omega x_1, \dot{x}_2 = i\omega x_2, \dot{x}_a = i\omega x_a, \dot{V} = i\omega V \quad (2.59)$$

Từ (2.57) và (2.59) ta có:

$$x_a = \frac{ic\omega x_2 + k_p x_1 - \theta_p V}{k_p + ic\omega} \quad (2.60)$$

Thay (2.60) vào (2.57) và sử dụng các quan hệ (2.59), ta được:

$$f = \frac{(c\omega)^2}{k_p^2 + (c\omega)^2} k_p (x_2 - x_1) + \frac{k_p^2}{k_p^2 + (c\omega)^2} c (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \frac{(c\omega)^2}{k_p^2 + (c\omega)^2} \theta_p V + \frac{k_p^2}{k_p^2 + (c\omega)^2} \frac{c\theta_p}{k_p} \dot{V} \quad (2.61)$$

Quan hệ giữa điện tích với dịch chuyển và điện áp của PSEH theo phương trình (2.43) có thể biểu diễn dưới dạng:

$$q = \theta_p (x_a - x_1) - C_p V \quad (2.62)$$

Tiếp theo, thay (2.60) và (2.61) vào (2.62) thu được:

$$q = \frac{(c\omega)^2}{k_p^2 + (c\omega)^2} \theta_p (x_2 - x_1) + \frac{ck_p}{k_p^2 + (c\omega)^2} \theta_p (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \left(\frac{k_p \theta_p^2}{k_p^2 + (c\omega)^2} + C_p \right) V + \frac{c\theta_p^2}{k_p^2 + (c\omega)^2} \dot{V} \quad (2.63)$$

Các phương trình (2.61) và (2.63) có thể viết lại dưới dạng:

$$f = k_{eq} (x_2 - x_1) + c_{eq} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \theta_{eq} V + \frac{\theta_{eq}}{\tau^2 \omega^2} \tau \dot{V} \quad (2.64)$$

$$q = \theta_{eq} (x_2 - x_1) + \frac{\theta_{eq}}{\tau^2 \omega^2} \tau (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - C_{eq1} V + C_{eq2} \tau \dot{V} \quad (2.65)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{c}{k_p}, k_{eq} = \frac{\tau^2 \omega^2}{1 + \tau^2 \omega^2} k_p, \theta_{eq} = \frac{\tau^2 \omega^2}{1 + \tau^2 \omega^2} \theta_p, \\ c_{eq} &= \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} c, C_{eq1} = C_p + \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} \frac{\theta_p^2}{k_p}, C_{eq2} = \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} \frac{\theta_p^2}{k_p} \end{aligned} \quad (2.66)$$

Từ (2.66) rút ra:

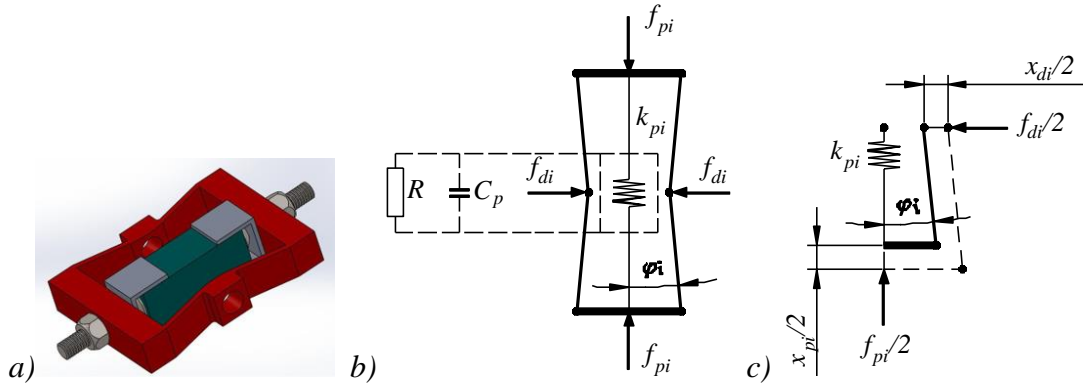
$$\frac{k_{eq}}{k_p} = \frac{\theta_{eq}}{\theta_p} = \tau^2 \omega^2 \frac{c_{eq}}{c}, C_{eq2} = C_{eq1} - C_p \quad (2.67)$$

Như ta thấy trong các công thức (2.64)-(2.67) và Hình 2.7c, tổ hợp PSEH-cản nối tiếp có thể được thay thế bằng một mô hình tương đương, trong đó về mặt cơ gồm hai phần tử lò xo và cản lắp song song có độ cứng và hệ số cản tương đương là k_{eq} và c_{eq} , về mặt điện gồm hai tụ điện lắp song song, một tụ nạp có điện tích tương ứng $C_{eq1}V$ và một tụ xả có điện tích tương ứng $(C_{eq1} - C_p)\tau\dot{V}$. Các hệ số θ_{eq} và $\frac{\theta_{eq}}{\tau\omega^2}$ là các hệ số liên kết cơ điện hiệu dụng tương ứng với các phần tử lò xo và cản tương đương.

Thực chất, tỉ số τ của hệ số cản đối với độ cứng chính là hệ số thời gian nghỉ Maxwell (Maxwell relaxation time), tổ hợp lò xo k_{eq} và cản c_{eq} lắp song song còn được gọi là mô hình Kelvin-Voigt. Nói một cách khác, tổ hợp PSEH-cản nối tiếp dựa trên mô hình cơ-điện Maxwell được thay thế bằng mô hình cơ-điện Kelvin-Voigt tương đương.

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

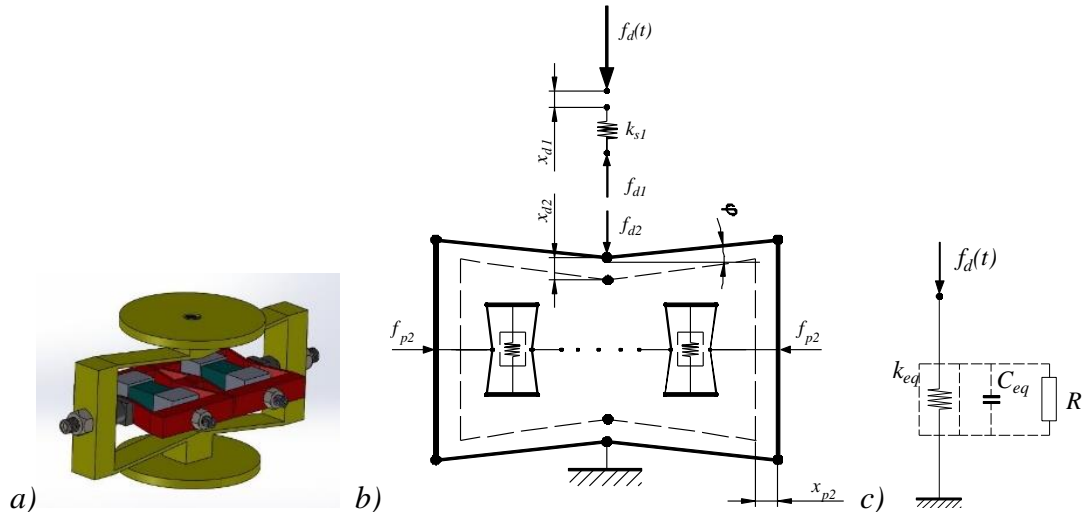
Như được mô tả trong Hình 2.8 là một khung khuếch đại lực đơn FAF (*Force Amplification Frame*) có chứa cụm áp điện kiểu xếp chồng gọi tắt là PSFAF (*Piezoelectric Stack and Force Amplification Frame*).



Hình 2.8 Mô hình của một cụm áp điện xếp chồng với khung khuếch đại lực

a) cấu hình 3D, b) mô hình vật lý, c) mô hình góc $1/4$.

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 2.9 của luận án này. Để thiết lập mô hình PSFAF kép này, ta có thể rút ra từ mô hình PSFAF đơn đã được nghiên cứu trong [116], [118].



Hình 2.9 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.

Giả sử rằng mỗi liên kết của FAF là một phần tử đàn hồi, đã loại bỏ các liên kết khối lượng và bản lề ở cả hai đầu (không có mômen phản lực) trong khi các bộ phận khác có thể được coi là một vật thể cứng. Do đó, các biến dạng xảy ra trong các liên kết rất nhỏ nên chúng chỉ có tính chất dọc trục.

Mối quan hệ lực-điện áp của khối áp điện kiểu xếp chồng được thể hiện bởi hệ phương trình sau [116], [118], [119]:

$$f_{p,i} = k_{p,i}x_{p,i} + \theta_{p,i}V_{p,i} \quad (2.68)$$

$$q_i = \theta_{p,i}x_{p,i} - C_{p,i}V_{p,i} \quad (2.69)$$

trong đó $\theta_{p,i}$ là hệ số ghép điện cơ, q_i là điện tích được tạo ra, $C_{p,i}$ là điện dung và $V_{p,i}$ là điện áp của PSEH gây ra bởi lực dọc trục $f_{p,i}$ tác dụng lên cụm áp điện kiểu xếp chồng. Như đã được chứng minh trong [116], [118] đối với PSFAF đơn, mối quan hệ giữa lực đầu vào $f_{d,i}$ và chuyển vị $x_{d,i}$, cũng như lực đầu ra $f_{p,i}$ và chuyển vị $x_{p,i}$, có thể được mô tả bằng phương trình:

$$\frac{x_{d,i}}{x_{p,i}} = \frac{f_{p,i}}{f_{d,i}} = \cot \varphi_i \quad (2.70)$$

trong đó φ_i là góc kết cấu của FAF đơn.

Thay (2.70) vào (2.68) và (2.69), ta được:

$$f_{d,i} = \frac{k_{p,i}}{\cot^2 \varphi_i} x_{d,i} + \frac{\theta_{p,i}}{\cot \varphi_i} V_{p,i} \quad (2.71)$$

$$q_i = \frac{\theta_{p,i}}{\cot \varphi_i} x_{d,i} - C_{p,i} V_{p,i} \quad (2.72)$$

Tiếp theo, chúng ta xem xét một cụm 2sPSFAF với một khung khuếch đại chính FAF có chứa N phần tử PSFAF đơn được lắp nối tiếp về mặt cơ học và song song về điện, Hình 2.9b. Rõ ràng là:

- Tương tự như với (2.70), quan hệ giữa lực đầu vào $f_{d,2}$ và chuyển vị $x_{d,2}$, cũng như lực đầu ra $f_{p,2}$ của một FAF đơn với góc nghiêng φ với chuyển vị $x_{p,2}$, có thể được mô tả bởi:

$$\frac{x_{d,2}}{x_{p,2}} = \frac{f_{p,2}}{f_{d,2}} = \cot \varphi \quad (2.73)$$

- Mối quan hệ giữa lực đầu ra $f_{p,2}$ và chuyển vị $x_{p,2}$ của FAF đơn, với lực đầu vào và chuyển vị của tổ hợp N phần tử PSFAF đơn với góc kết cấu φ_i lắp nối tiếp, lần lượt là:

$$f_{p,2} = f_{d,i}, x_{p,2} = Nx_{d,i} \quad (2.74)$$

- Các đại lượng điện biểu thị mạch song song của N tụ điện, chẳng hạn như tổng lượng điện tích q , tổng điện dung C_p và tổng điện áp V_p , lần lượt là:

$$q = Nq_i, C_p = NC_{p,i}, V_p = V_{p,i} \quad (2.75)$$

Thay (2.73) vào (2.71) và (2.72) kết hợp với (2.74), (2.75), ta được:

$$f_{d,2} = \frac{k_{p,i}}{N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi)} x_{d,2} + \frac{\theta_{p,i}}{\cot \varphi_i} V_p \quad (2.76)$$

$$q = \frac{\theta_{p,i}}{\cot(\varphi_i) \cot(\varphi)} x_{d,2} - C_p V_p \quad (2.77)$$

Biến đổi (2.76) và (2.77) ta có:

$$f_{d,2} = k_{FAF} x_{d,2} + \theta_{FAF} V \quad (2.78)$$

$$q = \theta_{FAF} x_{d,2} - C_p V \quad (2.79)$$

với

$$k_{FAF} = \frac{k_{p,i}}{N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi)}, \theta_{FAF} = \frac{\theta_{p,i}}{\cot(\varphi_i) \cot(\varphi)}, V = V_p \cot \varphi \quad (2.80)$$

Do đó, từ các mô hình hóa PSFAF đơn và 2sPSFAF ở trên, có thể rút ra các nhận xét sau:

- PSFAF đơn bao gồm một FAF và cụm áp điện kiểu xếp chồng sẽ tương đương với một PSEH như được mô tả bởi các phương trình (2.71), (2.72) đã được chứng minh trong [116], [118].

- 2sPSFAF được đề xuất, bao gồm một FAF chính có chứa các PSFAF đơn được lắp nối tiếp về mặt cơ học và song song về điện, cũng tương đương với PSEH như được mô tả bởi các phương trình (2.78)-(2.79).

Vì 2sPSFAF có thể được mô hình hóa như một PSEH tương đương có các phương trình cho bởi (2.78)-(2.79), nên liên kết nối tiếp của nó với lò xo có độ cứng k_d được mô tả bởi các phương trình sau [116], [118].

$$f_d = k_{eq}x_d + \theta_{eq}V \quad (2.81)$$

$$q = \theta_{eq}x_d - C_{eq}V \quad (2.82)$$

Trong đó

$$k_{eq} = \frac{k_d k_{FAF}}{k_d + k_{FAF}}, \theta_{eq} = \frac{k_d}{k_d + k_{FAF}} \theta_{FAF}, C_{eq} = C_p + \frac{\theta_{FAF}^2}{k_d + k_{FAF}} \quad (2.83)$$

Thay (2.80) vào (2.83), thu được

$$k_{eq} = \frac{k_d k_{p,i}}{k_d N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi) + k_{p,i}}, \theta_{eq} = \frac{k_d N \cot(\varphi_i)}{k_d N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi) + k_{p,i}} \theta_{p,i}, \quad (2.84)$$

$$C_{eq} = N C_{p,i} + \frac{N \cot(\varphi_i)}{k_d N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi) + k_{p,i}} \theta_{p,i}^2$$

Qua đây ta có thể thấy rằng tổ hợp mắc nối tiếp giữa một lò xo với 2sPSFAF có thể được mô hình hóa như một PSEH tương đương có các phương trình mô tả như (2.81)-(2.82) được biểu thị dưới dạng biến dạng tổng x_d và lực tác dụng f_d .

Kết luận chương 2

Trong chương 2, luận án đã trình bày các vấn đề sau:

- 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 cần 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 để làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình và tính toán xác định các tham số của TMD-PSEH và TMD-2sPSFAF ở chương 3.

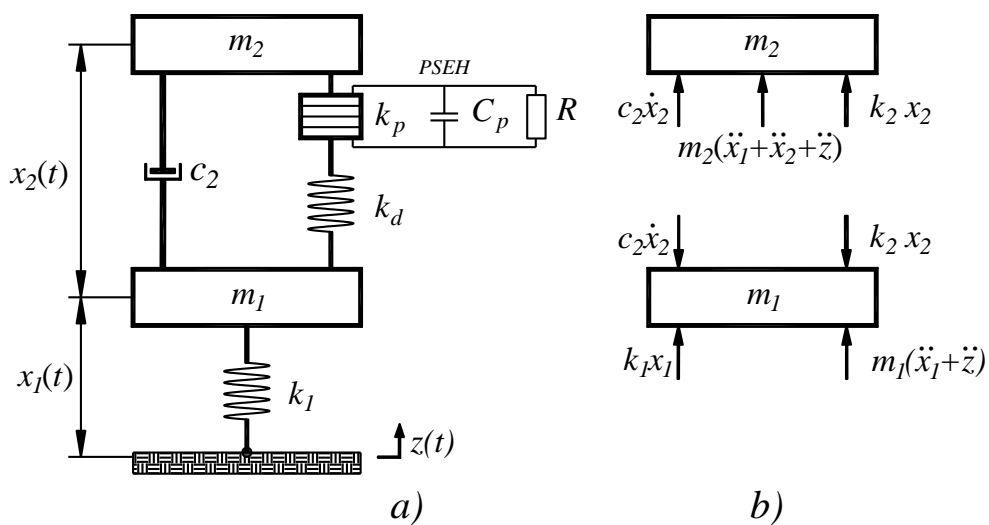
Chương 3. THIẾT KẾ TỐI ƯU TMD-PSEH DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỂM CỐ ĐỊNH MỞ RỘNG

Trong chương này, Luận án trình bày mô hình vật lý và thiết lập các phương trình vi phân tương ứng cho hệ thống cơ điện gồm kết cấu chính không cản tích hợp TMD-PSEH chịu kích động nền và kích động ngoài cũng như TMD-PSEH với khung khuếch đại lực chịu kích động ngoài. Tiếp theo, các đáp ứng của hệ cơ điện được xác định bằng phương pháp biên độ phức. Cuối cùng, các tham số tối ưu của TMD-PSEH được xác định bởi 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 cản với TMD-PSEH chịu kích động nền, trong đó m_1 và k_1 là khối lượng và độ cứng lò xo của kết cấu chính, m_2 và k_d là khối lượng và độ cứng lò xo của TMD, c_2 là hệ số cản của TMD, x_1 là chuyển vị tuyệt đối của khối lượng m_1 và x_2 là dịch chuyển tương đối giữa m_1 và m_2 . Về mặt vật lý thì PSEH được mô hình hóa cơ học như một lò xo có độ cứng k_p lắp nối tiếp với lò xo k_d của TMD và về mặt điện thì được xem như một tụ điện có điện dung C_p , hệ số ghép cơ điện θ_p và điện trở tải R.



Hình 3.1 Mô hình hệ kết cấu chính không cản tích hợp TMD-PSEH chịu kích động nền

a) mô hình vật lý, b) sơ đồ cân bằng lực.

Kích động nền điều hòa $z(t)$ được mô tả dưới dạng:

$$z(t) = z_0 \cos \Omega t, \ddot{z}(t) = -z_0 \Omega^2 \cos \Omega t \quad (3.1)$$

trong đó z_0 và Ω lần lượt là biên độ và tần số của kích động

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:

$$f_2 = k_2 x_2 + \theta V \quad (3.2)$$

$$q = \theta x_2 - CV \quad (3.3)$$

trong đó:
$$k_2 = \frac{k_d k_p}{k_d + k_p}, \theta = \frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p, C = C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p} \quad (3.4)$$

Về mặt vật lý, x_2, V là sự biến dạng của khối áp điện và điện áp trên điện trở ngoài R dưới tác dụng của lực f_2 , tạo ra điện tích q , k_p, θ_p, C_p là độ cứng, hệ số ghép cơ điện và điện dung của cụm áp điện xếp chồng, k_2, θ, C lần lượt là độ cứng, hệ số ghép cơ điện và điện dung tương đương của PSEH.

Hệ phương trình vi phân mô tả cho hệ kết cấu chính không cản với TMD-PSEH chịu kích động nền có thể được rút ra từ việc áp dụng định luật Newton cho dịch chuyển của m_1 và m_2 (xem Hình 3.1b), và định luật Kirchhoff cho mạch song song RC bằng cách lấy đạo hàm của phương trình (3.4), như sau:

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + k_1 x_1 - k_2 x_2 - \theta V = -m_1 \ddot{z} \quad (3.5)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 + \theta V = -m_2 (\ddot{x}_1 + \ddot{z}) \quad (3.6)$$

$$C \dot{V} + \frac{V}{R} = \theta \dot{x}_2 \quad (3.7)$$

Để xác định các đáp ứng cơ-điện của hệ (3.5)-(3.7), ta đặt:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \mu = \frac{m_2}{m_1}, \xi_2 = \frac{c_2}{2m_2 \omega_2}, \beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_1}, \quad (3.8)$$

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

Về mặt vật lí, κ^2 là hệ số kết nối cơ điện, α là tỉ số điện trở và v là điện áp chuyển đổi, các ký hiệu khác giữ nguyên như đã giới thiệu trước đó trong mục 2.1. Sử dụng các phép đặt trong (3.8) thì hệ (3.5)-(3.7) trở thành:

$$\ddot{x}_1 - 2\mu\omega_1\beta\xi_2\dot{x}_2 + \omega_1^2 x_1 - \mu\omega_2^2 x_2 - \mu\omega_2^2 \kappa^2 v = -\ddot{z} \quad (3.9)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\omega_1\beta\xi_2\dot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 + \omega_2^2 \kappa^2 v = -\ddot{x}_1 - \ddot{z} \quad (3.10)$$

$$\dot{v} + \alpha\Omega v = \dot{x}_2 \quad (3.11)$$

Nghiệm bình ổn của hệ (3.9)-(3.11) có thể được viết dưới dạng:

$$\tilde{x}_1(t) = X_1 e^{i\Omega t}, \tilde{x}_2(t) = X_2 e^{i\Omega t}, \tilde{v}(t) = X_v e^{i\Omega t} \quad (3.12)$$

ở đây X_1, X_2, X_v là các biên độ phức.

Thay (3.12) vào (3.9)-(3.11) ta được:

$$(\omega_1^2 - \Omega^2)X_1 - (i2\mu\omega_2\xi_2\Omega + \mu\omega_2^2)X_2 - \mu\omega_2^2 \kappa^2 X_v = \Omega^2 z_0 \quad (3.13)$$

$$-\Omega^2 X_1 + (i2\xi_2\omega_2\Omega + \omega_2^2 - \Omega^2)X_2 + \omega_2^2 \kappa^2 X_v = \Omega^2 z_0 \quad (3.14)$$

$$-iX_2 + (i + \alpha)X_v = 0 \quad (3.15)$$

Chia cả 2 vế của (3.13)-(3.15) cho ω_1 thu được:

$$(1 - \lambda^2)X_1 - (i2\mu\xi_2\lambda\beta + \mu\beta^2)X_2 - \mu\beta^2 \kappa^2 X_v = \lambda^2 z_0 \quad (3.16)$$

$$-\lambda^2 X_1 + (i2\xi_2\lambda\beta + \beta^2 - \lambda^2)X_2 + \beta^2 \kappa^2 X_v = \lambda^2 z_0 \quad (3.17)$$

$$-iX_2 + (i + \alpha)X_v = 0 \quad (3.18)$$

Giải hệ phương trình (3.16)-(3.18) ta được:

$$\frac{X_1}{z_0} = \frac{B_1 + B_2 i}{E_1 + E_2 i}, \quad \frac{X_2}{z_0} = \frac{C_1 + C_2 i}{E_1 + E_2 i}, \quad \frac{X_v}{z_0} = \frac{D_1 + D_2 i}{E_1 + E_2 i} \quad (3.19)$$

trong đó

$$\begin{aligned} B_1 &= \alpha\lambda^4 + \beta\lambda(1 + \mu)(2\lambda^2\xi_2 - \alpha\beta\lambda), B_2 = \lambda^4 - \beta\lambda(1 + \mu)(\beta\lambda(1 + \kappa^2) + 2\alpha\lambda^2\xi_2) \\ C_1 &= \alpha\lambda^2, C_2 = \lambda^2, D_1 = 0, D_2 = \lambda^2, \\ E_1 &= \alpha\lambda^2(1 - \lambda^2) + \beta(1 - \lambda^2(1 + \mu))(2\lambda\xi_2 - \alpha\beta), \\ E_2 &= \lambda^2(1 - \lambda^2) - \beta^2(1 + \kappa^2) + \beta\lambda(1 + \mu)(\beta\lambda(1 + \kappa^2) + 2\alpha\lambda^2\xi_2) - 2\alpha\beta\lambda\xi_2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Khi đó, các đáp ứng ở trạng thái bình ổn $x_1(t), x_2(t)$, và $v(t)$ của hệ phương trình (3.9) -(3.11) là:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_1 \cos(\Omega t + \varphi_1) \\ x_2(t) &= a_2 \cos(\Omega t + \varphi_2) \\ v(t) &= V_0 \cos(\Omega t + \varphi_v) \end{aligned} \quad (3.21)$$

trong đó

$$a_1 = |X_1| = z_0 \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}; \quad \varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_2 E_1 - B_1 E_2}{B_1 E_1 + B_2 E_2} \right) \quad (3.22)$$

$$a_2 = |X_2| = z_0 \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}; \quad \varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{C_2 E_1 - C_1 E_2}{C_1 E_1 + C_2 E_2} \right) \quad (3.23)$$

$$V_0 = |X_v| = z_0 \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}; \quad \varphi_v = \tan^{-1} \left(\frac{D_2 E_1 - D_1 E_2}{D_1 E_1 + D_2 E_2} \right) \quad (3.24)$$

Theo đó, 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:

$$K_1 = \frac{a_1}{z_0} = \sqrt{\frac{p_0 + p_1 \xi_2 + p_2 \xi_2^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2}} \quad (3.25)$$

$$\frac{V_0}{z_0} = \frac{\lambda^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2} \quad (3.26)$$

$$P_{av} = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} \frac{V^2 / R}{\omega_1^3 m_1 z_0^2} dt = \frac{1}{2} \frac{\mu \alpha \beta^2 \kappa^2 \lambda^5}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2} \quad (3.27)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} p_0 &= \lambda^4 \left(\beta^2 (1 + \kappa^2) (1 + \mu) - \lambda^2 \right)^2 + \alpha^2 \lambda^4 \left(\beta^2 (1 + \mu) - \lambda^2 \right)^2 \\ p_1 &= 4\alpha\kappa\beta^3 \lambda^5 (1 + \mu)^2, \quad p_2 = 4\beta^2 \lambda^6 (1 + \alpha^2) (1 + \mu)^2 \\ q_0 &= \alpha^2 \left(\lambda^2 (1 - \lambda^2) + \beta^2 (\lambda^2 (1 + \mu) - 1) \right)^2 \\ &\quad + \left(\lambda^2 (1 - \lambda^2) + \beta^2 (1 + \kappa^2) (\lambda^2 (1 + \mu) - 1) \right)^2 \\ q_1 &= 4\alpha\kappa\lambda\beta^3 (\lambda^2 (1 + \mu) - 1)^2, \quad q_2 = 4\beta^2 \lambda^2 (1 + \alpha^2) (\lambda^2 (1 + \mu) - 1)^2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Công thức (3.25) cho thấy rằng K_1 phụ thuộc vào 6 tham số bao gồm 3 tham số cơ μ, β, ξ_2 , một tham số điện α , một tham số ghép cơ điện κ^2 và một tham số của lực kích động λ hay còn được gọi là nhiễu đầu vào. Khi khớp nối cơ điện κ^2 biến mất, ứng với $\kappa^2 = 0$ thì phương trình (3.25) rút gọn về công thức của hệ TMD cơ học thông thường như ở đã biết ở mục 2.1, mà ở đó hệ số khuếch đại K_1 chỉ phụ thuộc vào μ, β, ξ_2 .

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

Nói chung, hai yêu cầu cơ bản chính để hệ thống TMD-PSEH hoạt động hiệu quả về mặt kỹ thuật đó là: thứ nhất, có lẽ cũng là ưu tiên hàng đầu, là triệt tiêu rung động của kết cấu chính, thứ hai là thu thập được càng nhiều năng lượng điện càng tốt. Từ đó thì chiến lược tối ưu hóa có thể được rút ra như sau:

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 . Việc này sẽ được thực hiện đầu tiên.

b) Yêu cầu thứ hai là tối ưu hóa công suất điện đầu ra, việc này sẽ được thực hiện sau.

Xét đường cong biên độ-tần số $K_1(\lambda)$ cho bởi công thức (3.25). Từ đặc tính không cản của kết cấu chính, có thể tồn tại các điểm cố định có tọa độ độc lập với hệ số giảm chấn ξ_2 của TMD-PSEH. Do đó, việc tìm kiếm các điểm cố định nếu có sẽ được thực hiện trước tiên. Dựa trên phương pháp của Den Hartog trong lý thuyết điểm cố định [84], thì giá trị của K_1 không đổi đối với các giá trị tùy ý của ξ_2 tại các điểm cố định. Để đơn giản, ta lấy $\xi_2 = 0$ và $\xi_2 \rightarrow \infty$, sau đó thay chúng vào (3.25) sẽ được:

$$K_1(\xi_2 = 0) = \sqrt{p_0 / q_0} = K_1(\xi_2 \rightarrow \infty) = \sqrt{p_2 / q_2} \quad (3.29)$$

Biến đổi (3.29) dẫn đến phương trình trùng phương theo biến λ :

$$2\mu(1+\mu)(1+\alpha^2)\lambda^4 + (2\mu(1+\alpha^2) - \mu^2(1+\alpha^2 + 4\beta^2(1+\mu^2(\kappa^2 + \alpha^2)))) + \\ + 2\mu\beta^2(1+\alpha^2 + \kappa^2)(1+\mu^2)\lambda^2 + 2\beta^2\mu(1+\mu)(1+\alpha^2 + \kappa^2) = 0 \quad (3.30)$$

Giải phương trình (3.30) thu được 2 nghiệm dương của λ . Hơn nữa, sử dụng các giá trị cụ thể khác của ξ_2 , ví dụ như $\xi_2 = 1$, cũng dẫn đến kết quả tương tự. Điều đó có nghĩa là tồn tại hai điểm cố định của $K_1(\lambda)$ mà hoành độ của chúng là nghiệm của (3.30). Ký hiệu $P(\lambda_p, K_{1P})$ và $Q(\lambda_Q, K_{1Q})$ là hai điểm cố định này và tọa độ của chúng. Như được thấy từ (3.30) thì λ_p, λ_Q là các hàm của $\beta, \mu, \kappa^2, \alpha$, và có thể được biểu diễn dưới dạng (biểu diễn nghiệm chi tiết được thể hiện ở phần phụ lục dưới dạng ký hiệu trong Matlab):

$$\lambda_p = \lambda_p(\beta, \mu, \kappa^2, \alpha), \lambda_Q = \lambda_Q(\beta, \mu, \kappa^2, \alpha) \quad (3.31)$$

Thay λ_p, λ_Q trong (3.31) vào $K_1(\xi_2 \rightarrow \infty)$ trong (3.29) thu được:

$$K_{1P} = K_{1P}(\beta, \mu, \kappa^2, \alpha), K_{1Q} = K_{1Q}(\beta, \mu, \kappa^2, \alpha) \quad (3.32)$$

Theo gợi ý của Den Hartog [84], tỷ số tối ưu β được xác định từ điều kiện:

$$K_{1P} = K_{1Q} \quad (3.33)$$

Thay (3.32) vào (3.33) ta xác định được biểu thức của β :

$$K_{1P}^2 - K_{1Q}^2 = 0 \leftrightarrow (c_0 + c_2\beta^2)\sqrt{d_0 + d_2\beta^2} = 0 \quad (3.34)$$

trong đó c_0, c_2, d_0, d_2 là biểu thức của μ, κ^2, α .

Nghiệm thực dương duy nhất của (3.34) xuất phát từ phương trình $c_0 + c_2\beta^2 = 0$. Do đó, tỷ số tần số tối ưu là:

$$\beta_{op} = \sqrt{-\frac{c_0}{c_2}} = \sqrt{\frac{(2+\mu)(1+\alpha^2)}{2(1+\mu)^2(1+\alpha^2 + \kappa^2)}} = \frac{\sqrt{2+\mu}}{\sqrt{2}(1+\mu)} \sqrt{\frac{1+\alpha^2}{1+\alpha^2 + \kappa^2}} \quad (3.35)$$

Thay (3.35) vào (3.31), ta thu được:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{2+\mu - \sqrt{\mu(2+\mu)}}{2(1+\mu)}}, \lambda_Q = \sqrt{\frac{2+\mu + \sqrt{\mu(2+\mu)}}{2(1+\mu)}} \quad (3.36)$$

Kết hợp (3.32) và (3.36) ta thu được các giá trị của K_{1P}, K_{1Q} như sau:

$$K_{1P} = K_{1Q} = \sqrt{(2 + \mu) / \mu} \quad (3.37)$$

Do đó, TMD-PSEH cũng có hai điểm cố định giống như TMD thông thường. Đặc biệt hơn, hoành độ và tọa độ của P và Q lần lượt cho bởi (3.36), (3.37) trùng khớp hoàn toàn với tọa độ của hai điểm cố định của TMD cơ học như trong [90], [92]. Ngoài ra, từ (3.35) cho thấy rằng:

$$\beta_{op} = \beta^* \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{1 + \alpha^2 + \kappa^2}} \leq \beta^* = \frac{\sqrt{2 + \mu}}{\sqrt{2(1 + \mu)}} \quad (3.38)$$

Trong đó β^* là tỷ số tần số tối ưu của TMD cơ học được xác định từ lý thuyết điểm cố định của Den Hartog.

Tiếp theo, để tìm ra hệ số giảm chấn tối ưu, xuất phát từ yêu cầu P và Q nằm ở vùng lân cận của hai đỉnh của đường cong $K_1(\lambda)$, tốt nhất nếu chúng đạt đỉnh đồng bộ. Điều này có nghĩa là:

$$\frac{\partial K_1}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_p} = \frac{\partial K_1}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_q} = 0 \quad (3.39)$$

Biểu thức của ξ_2 có thể được rút ra bằng cách sử dụng (3.25) và (3.39). Thật vậy, bình phương (3.25) dẫn đến:

$$K_1^2(q_0 + q_1\xi_2 + q_2\xi_2^2) = p_0 + p_1\xi_2 + p_2\xi_2^2 \quad (3.40)$$

Lấy đạo hàm hai vế của (3.40) tại P và/hoặc Q kết hợp với (3.39), dẫn đến:

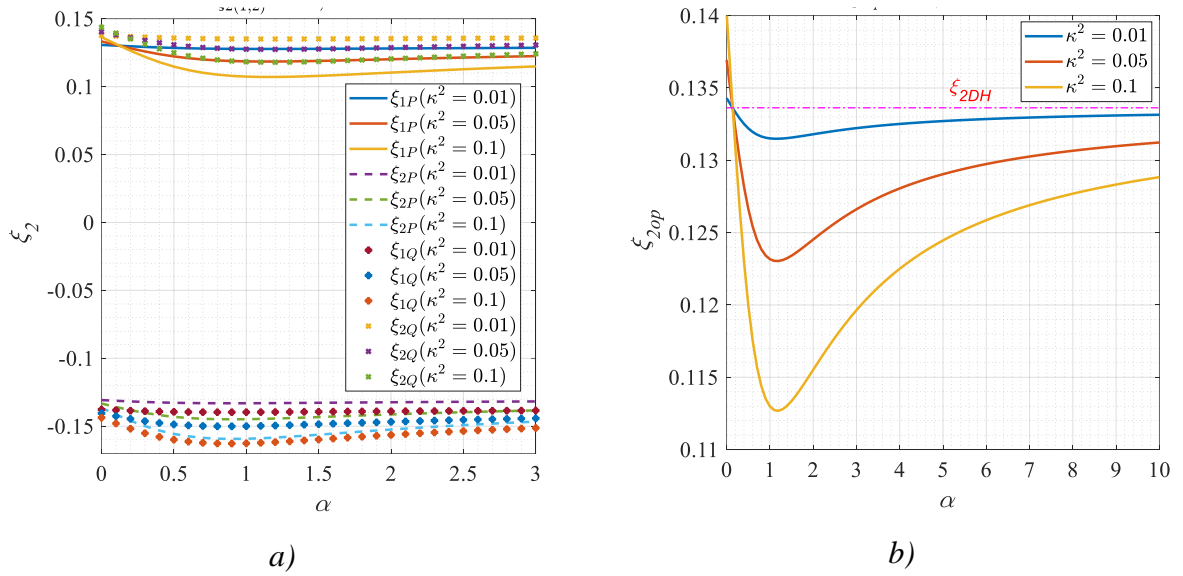
$$\left[\begin{aligned} K_{1(*)}^2 \left[\frac{\partial q_0}{\partial \lambda} + \frac{\partial q_1}{\partial \lambda} \xi_2 + \frac{\partial q_2}{\partial \lambda} \xi_2^2 \right] &= \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} + \frac{\partial p_1}{\partial \lambda} \xi_2 + \frac{\partial p_2}{\partial \lambda} \xi_2^2 \\ \left(K_{1(*)}^2 \frac{\partial q_2}{\partial \lambda} - \frac{\partial p_2}{\partial \lambda} \right) \xi_2^2 + \left(K_{1(*)}^2 \frac{\partial q_1}{\partial \lambda} - \frac{\partial p_1}{\partial \lambda} \right) \xi_2 + K_{1(*)}^2 \frac{\partial q_0}{\partial \lambda} - \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} &= 0 \end{aligned} \right] \quad (3.41)$$

Trong đó $K_{1(*)}$ là tọa độ K_{1P} và/hoặc K_{1Q} . Giải phương trình bậc hai (3.41) cho biến ξ_2 , ta được hai nghiệm:

$$\xi_{2(1)} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \xi_{2(2)} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.42)$$

trong đó

$$\begin{aligned}
A &= 8\beta^2\lambda(1+\alpha^2)(3\lambda^4(1+\mu)^2(K_{1(*)}^2-1)+K_{1(*)}^2(1-4\lambda^2(1+\mu))) \\
B &= 4\alpha\beta^3\kappa^2(5\lambda^4(1+\mu)^2(K_{1(*)}^2-1)+K_{1(*)}^2(1-6\lambda^2(1+\mu))) \\
C &= K_{1(*)}^2 \left[4\alpha^2\lambda(\beta^2(1+\mu)-2\lambda^2+1)((1-\lambda^2)(\lambda^2-\beta^2)+\beta^2\lambda^2\mu)+ \right. \\
&\quad \left. +4\lambda(\beta^2(1+\mu)(1+\kappa^2)-2\lambda^2+1)(\lambda^2(1-\lambda^2)+\beta^2(1+\kappa^2)(\lambda^2(1+\mu)-1)) \right] \\
&\quad -4\lambda^3(\beta^2(1+\mu)(1+\kappa^2)-\lambda^2)(\beta^2(1+\mu)(1+\kappa^2)-2\lambda^2) \\
&\quad -4\alpha^2\lambda^3(\beta^2(1+\mu)-\lambda^2)(\beta^2(1+\mu)-2\lambda^2)
\end{aligned} \tag{3.43}$$



Hình 3.2 Đồ thị hệ số cân theo biến α của hệ chịu kích động nền

$\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p}$: đường nét liền, $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_p}$: đường nét gạch, $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_Q}$: đường *, $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$: đường x

Tại điểm P, thay $\lambda = \lambda_p, K_{1(*)} = K_{1P}, \beta = \beta_{op}$ thu được hai nghiệm tương ứng $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p}$ và $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_p}$. Tại điểm Q, thay $\lambda = \lambda_Q, K_{1(*)} = K_{1Q}, \beta = \beta_{op}$ thu được hai nghiệm tương ứng $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_Q}$ và $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$. Trong số bốn nghiệm thì chỉ có hai nghiệm dương $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p}, \xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$ là được chọn như minh họa trong Hình 3.2a. Vì $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p} \neq \xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$, nên các điểm cố định tương ứng không đạt đỉnh đồng bộ với một trong hai giá trị này. Và giá trị tối ưu của ξ_2 sẽ được lấy bằng bình phương trung bình của $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p}, \xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$ theo đề xuất của Brock [89] (Hình 3.2b).

$$\xi_{2op} = \sqrt{\frac{\xi_{2(1)}^2|_{\lambda=\lambda_p} + \xi_{2(2)}^2|_{\lambda=\lambda_Q}}{2}} \tag{3.44}$$

Do đó các tỷ số tần số và giảm chấn tối ưu β_{op} và ξ_{2op} của TMD-PSEH được cho bởi (3.35) và (3.44) là các hàm của μ , κ^2 , α . Trong số các tham số này, μ and κ^2 không đổi đối với một loại vật liệu áp điện và TMD cụ thể. Trong khi đó, tỷ số điện trở $\alpha = 1/(\Omega RC)$ là hàm của Ω (R và C được coi là không đổi). Do đó, cần phải tìm một giá trị cụ thể của α độc lập với Ω .

Tiếp theo, hãy xem xét phần điện của PSEH được biểu diễn bằng mạch song song điện trở-tụ điện, như trong biểu thức (3.11). 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 [111]

$$P_R = \frac{I_0^2 R}{2(1 + R^2 \Omega^2 C^2)} \quad (3.45)$$

Giải điều kiện $\partial P_R / \partial R = 0$ sử dụng (3.45), ta thấy rằng mạch có công suất đầu ra cực đại ở tải điện trở tối ưu là $R = 1/(\Omega C)$ [111], khi đó thì $\alpha = 1/(\Omega RC) = 1$. Vì vậy, ta có được hệ số điện trở tối ưu cho phần điện là:

$$\alpha_{op} = 1 \quad (3.46)$$

Thay (3.46) vào (3.35) và (3.44) ta thu được β_{op} và ξ_{2op} là hàm của hai hằng số μ và κ^2 như sau:

$$\beta_{op} = \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\frac{2 + \mu}{2 + \kappa^2}}, \xi_{2op} = \xi_{2op}(\mu, \kappa^2) \quad (3.47)$$

Từ (3.47) cho thấy rằng khi $\kappa^2 = 0$ ta nhận được kết quả như đã biết của TMD cơ học tối ưu ở mục 2.1.1 là:

$$\begin{aligned} \beta_{op}(\kappa^2 = 0) &= \frac{\sqrt{2 + \mu}}{\sqrt{2(1 + \mu)}} = \beta^* \\ \xi_{2op}(\kappa^2 = 0) &= \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} = \xi^* \end{aligned} \quad (3.48)$$

3.1.3. Thiết kế tối ưu hệ thống TMD-PSEH chịu kích động nền

Như thấy được từ các phương trình của (3.47) thì các hệ số tối ưu β_{op} và ξ_{2op} là hàm của μ và κ^2 , trong khi hệ số điện trở tối ưu $\alpha_{op} = 1$ như được cho bởi

(3.46). Vì vậy, về mặt cơ học, ta cần xác định các giá trị tối ưu của độ cứng lò xo k_{dop} và hệ số giảm chấn $c_{2\text{op}}$, và về mặt điện cần xác định giá trị điện trở tối ưu R_{op} của TMD-PSEH. Từ các phương trình (3.4), (3.8), (3.46), (3.47), ta có các mối quan hệ sau:

$$\kappa^2 = \frac{\left(\frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p\right)^2}{\frac{k_d k_p}{k_d + k_p} \left(C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p}\right)} \quad (3.49)$$

$$\beta_{\text{op}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{\frac{k_2}{\mu k_1}} = \sqrt{\frac{1}{\mu k_1} \frac{k_d k_p}{k_d + k_p}} = \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\frac{2 + \mu}{2 + \frac{\left(\frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p\right)^2}{\frac{k_d k_p}{k_d + k_p} \left(C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p}\right)}}} \quad (3.50)$$

$$c_{2\text{op}} = 2\sqrt{m_2 k_2} \xi_{2\text{op}} = \sqrt{2m_2 \frac{k_d k_p}{k_d + k_p} \left(\xi_{2(1)}^2 |_{\lambda=\lambda_p} + \xi_{2(2)}^2 |_{\lambda=\lambda_o}\right)} \quad (3.51)$$

$$R_{\text{op}} = \frac{1}{\Omega C \alpha_{\text{op}}} = \frac{1}{\Omega} \left[C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p} \right]^{-1} \quad (3.52)$$

Điều này cho thấy để tính toán $k_{\text{dop}}, c_{2\text{op}}, R_{\text{op}}$ thì phải biết các tham số đầu vào $m_1, m_2, k_1, k_p, C_p, \theta_p$, đồng thời κ^2 được coi là đại lượng trung gian để đánh giá các giá trị tối ưu này. Trong số các tham số cơ học m_1, m_2, k_1 , thì khối lượng m_1 và độ cứng lò xo k_1 của kết cấu chính là đã biết, trong khi khối lượng m_2 của TMD thường được chọn dựa trên kinh nghiệm trong khoảng $0.01 \leq \mu \leq 0.1$ [84], [85]. Tương tự, các thông số cơ điện k_p, C_p, θ_p cũng có thể được chọn theo cách như vậy. Sau khi lựa chọn các thông số nêu trên cần xác định độ cứng tối ưu k_{dop} của TMD. Biến đổi phương trình (3.50) ta được:

$$\begin{aligned} & \left[(\mu + 1)^2 (2C_p k_p + \theta_p^2) - (2 + \mu) \mu C_p k_1 \right] k_d^2 + \\ & + \left[2k_p (\mu + 1)^2 (C_p k_p + \theta_p^2) - (2 + \mu) \mu k_1 (2C_p k_p + \theta_p^2) \right] k_d - (2 + \mu) \mu k_1 k_p (C_p k_p + \theta_p^2) = 0 \end{aligned} \quad (3.53)$$

Giải phương trình (3.53) ta thu được 2 nghiệm của k_d

$$k_{d(1)} = \frac{-\widehat{B} - \sqrt{\widehat{B}^2 - 4\widehat{A}\widehat{C}}}{2\widehat{A}} \quad (3.54)$$

$$k_{d(2)} = \frac{-\widehat{B} + \sqrt{\widehat{B}^2 - 4\widehat{A}\widehat{C}}}{2\widehat{A}} \quad (3.55)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \widehat{A} &= (\mu + 1)^2 (2C_p k_p + \theta_p^2) - (2 + \mu) \mu C_p k_1 \\ \widehat{B} &= 2k_p (\mu + 1)^2 (C_p k_p + \theta_p^2) - (2 + \mu) \mu k_1 (2C_p k_p + \theta_p^2) \\ \widehat{C} &= -(2 + \mu) \mu k_1 k_p (C_p k_p + \theta_p^2) \end{aligned} \quad (3.56)$$

Xét một trường hợp cụ thể trong đó hiệu ứng áp điện có thể không còn ảnh hưởng trong quá trình hoạt động của TMD-PSEH, khi $\theta_p = 0$, điều đó có nghĩa là khối áp điện kiểu xếp chồng chỉ hoạt động giống như một lò xo cơ học. Các giá trị của k_d trong (3.54), (3.55) chỉ còn là

$$k_{d(1)}(\theta_p = 0) = \frac{k_p (2 + \mu) \mu k_1 - 2k_p^2 (\mu + 1)^2}{2k_p (\mu + 1)^2 - (2 + \mu) \mu k_1} < 0 \quad (3.57)$$

$$k_{d(2)}(\theta_p = 0) = \frac{k_p (2 + \mu) \mu k_1}{2k_p (\mu + 1)^2 - (2 + \mu) \mu k_1} > 0 \quad (3.58)$$

Điều này cho thấy rằng $k_{d(1)}$ có thể âm trong khi $k_{d(2)}$ là không thể. Ở đây, độ cứng dương được quan tâm, do đó giá trị $k_{d(2)}$ được sử dụng để tính giá trị tối ưu của k_d , gọi là k_{dop} . Thay (3.56) vào (3.55) ta được kết quả:

$$k_{dop} = \frac{-2k_p (\mu + 1)^2 (C_p k_p + \theta_p^2) + (2 + \mu) \mu k_1 (2C_p k_p + \theta_p^2) + \sqrt{(2 + \mu)^2 \mu^2 k_1^2 (2C_p k_p + \theta_p^2)^2 + 4k_p (C_p k_p + \theta_p^2) [k_p (\mu + 1)^2 - (2 + \mu)^2 \mu^2 k_1^2 C_p]}}{2[(\mu + 1)^2 (2C_p k_p + \theta_p^2) - (2 + \mu) \mu C_p k_1]} \quad (3.59)$$

Đáng chú ý, ta có thể quan sát thấy tử số của (3.59) luôn dương. Để đảm bảo $k_{dop} > 0$ ngay cả khi trường hợp $\theta_p = 0$ xảy ra thì mẫu số của (3.59) phải dương. Theo đó, độ cứng của khối áp điện cần phải thỏa mãn điều kiện sau:

$$\begin{aligned}
& (\mu+1)^2(2C_p k_p + \theta_p^2) - (2+\mu)\mu C_p k_1 > 0 \\
& \Leftrightarrow k_p > \frac{(2+\mu)\mu}{2(\mu+1)^2} k_1 - \frac{\theta_p^2}{2C_p}
\end{aligned} \tag{3.60}$$

Từ các tính toán trên đây rút quy trình thiết kế tối ưu cho hệ thống TMD-PSEH chịu kích động nền như sau:

Bước 1: Xác định/chọn tham số đầu vào $m_1, m_2, k_1, k_p, C_p, \theta_p$ và tính toán μ theo (3.8), trong đó k_p được chọn dựa trên điều kiện (3.60);

Bước 2: Tính độ cứng tối ưu k_{dop} của lò xo TMD theo (3.59);

Bước 3: Tính hệ số cản tối ưu $c_{2\text{op}}$ theo (3.51);

Bước 4: Tính toán các hệ số tối ưu β_{op} và $\xi_{2\text{op}}$ được cho bởi (3.47);

Bước 5: Tính điện trở tối ưu R_{op} cho bởi (3.52) sau khi chọn tần số Ω để đảm bảo $\alpha_{\text{op}} = 1$.

Dựa trên các tham số đầu vào và các giá trị tối ưu thu được, các đại lượng trung gian k_2, θ, C cho bởi (3.4), ω_1, ω_2 cho bởi (3.8), tọa độ các điểm cố định không phụ thuộc hệ số giảm chấn P, Q cho bởi (3.37) cũng có thể được xác định để tiếp tục việc khảo sát.

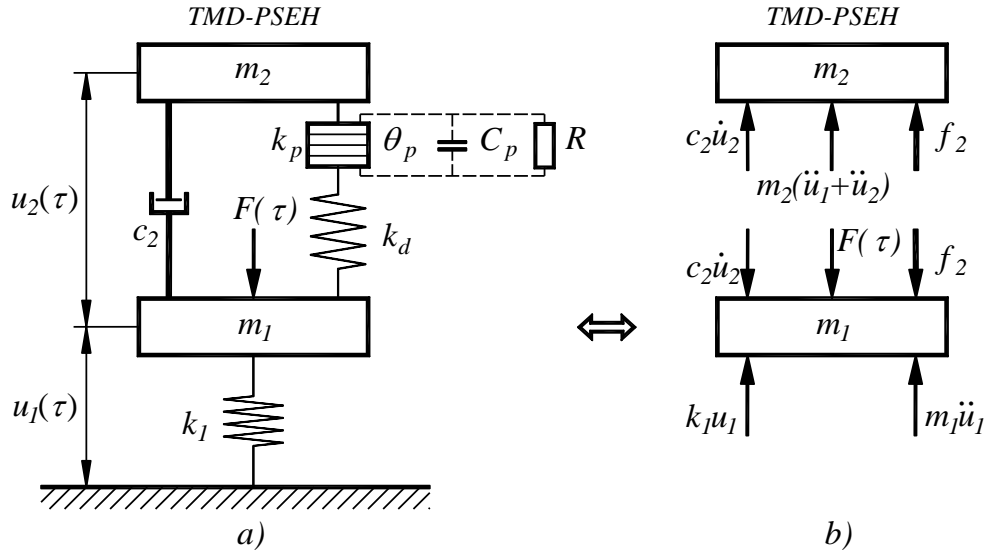
3.2. TMD-PSEH lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài

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

Hình 3.3 biểu diễn một hệ kết cấu chính không cản với TMD-PSEH chịu kích động ngoài, trong đó kết cấu chính có khối lượng m_1 và lò xo có độ cứng k_1 , TMD-PSEH có khối lượng m_2 , hệ số cản c_2 , lò xo có độ cứng k_d và PSEH. Về mặt vật lý, PSEH có thể được mô hình hóa cơ học như một lò xo có độ cứng k_p và về mặt điện thì được xem xét như một tụ điện có điện dung C_p , hệ số ghép cơ điện θ_p và điện trở tải R.

Bỏ qua hiệu ứng áp điện, người ta biết rằng đối với hệ cơ học tương ứng, tỷ số tần số tối ưu rút ra từ lý thuyết điểm cố định theo công thức (2.35) là:

$$\beta_{\text{DH}} = \sqrt{\frac{m_1 k_2}{m_2 k_1}} = \sqrt{\frac{1 k_2}{\mu k_1}} = \frac{1}{1 + \mu}, \quad \mu = \frac{m_2}{m_1} \quad (3.61)$$



Hình 3.3 Mô hình hệ kết cấu chính không cân tích hợp TMD-PSEH chịu kích động ngoài

a) mô hình vật lý, b) sơ đồ cân bằng lực

Độ cứng tương đương của tổ hợp PSEH và lò xo của TMD được mắc nối tiếp được tính theo công thức:

$$k_2 = \frac{k_d k_p}{k_d + k_p} \quad (3.62)$$

Vì PSEH có độ cứng cứng cao [74], [81], trong khi độ cứng của lò xo TMD mềm hơn, tức là $k_d \ll k_p$, nên ta có thể tính gần đúng $k_2 \approx k_d$. Do đó:

$$k_2 \approx k_d \approx \mu k_1 = \frac{k_1}{20} \quad (3.63)$$

Nếu PSEH và lò xo TMD được mắc song song thì độ cứng tương đương của tổ hợp song song được tính bởi:

$$k_2 = k_d + k_p \quad (3.64)$$

Chú ý rằng $k_d \ll k_p$, điều này dẫn đến:

$$k_2 \approx k_p \approx \mu k_1 = \frac{k_1}{20} \quad (3.65)$$

Từ (3.63) và (3.65) ta thấy tổ hợp mắc nối tiếp phù hợp với kết cấu chính có độ cứng lò xo cao hơn nhiều so với lò xo TMD, trong khi tổ hợp lắp song song phù hợp với kết cấu chính có độ cứng cao hơn nhiều so với độ cứng của PSEH.

Để mô hình hóa kết cấu chính không cản tích hợp TMD-PSEH như biểu diễn trên Hình 3.3a, ta biểu thị τ là biến thời gian, khi đó kích động điều hòa bên ngoài tác động lên kết cấu chính được biểu diễn dưới dạng:

$$F(\tau) = F_0 \cos \Omega \tau \quad (3.66)$$

$F(\tau)$ gây ra sự dịch chuyển tương đối u_1 và u_2 của khối lượng m_1 và m_2 , đồng thời có thể tạo ra điện áp V trên điện trở R của PSEH. Như vậy, chuỗi hai lò xo mắc nối tiếp k_d và k_p có thể được mô hình hóa như một lò xo tương đương có độ cứng k_2 , trong khi đó điện trở R và điện dung C_p biểu diễn mạch điện trở-tụ điện song song (RC). Kết nối điện cơ của tổ hợp nối tiếp PSEH và TMD có thể được suy ra từ [75], [76] như sau

$$f_2 = k_2 u_2 + \theta V \quad (3.67)$$

$$q = \theta u_2 - CV \quad (3.68)$$

Trong đó

$$k_2 = \frac{k_d k_p}{k_d + k_p}, \theta = \frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p, C = C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p} \quad (3.69)$$

Trong công thức (3.67)-(3.69), u_2, V lần lượt là biến dạng và điện áp của PSEH dưới lực tác dụng f_2 gây ra bởi $F(\tau)$, q là điện tích sinh ra, k_2, θ, C là các đại lượng tương đương của khối, tương ứng là độ cứng, hệ số ghép cơ điện, và điện dung.

Hệ phương trình vi phân mô tả cho hệ kết cấu chính không cản với TMD-PSEH chịu kích động ngoài có thể được rút ra từ việc áp dụng định luật Newton cho dịch chuyển của m_1 và m_2 (xem Hình 3.3b), và định luật Kirchhoff cho mạch song song RC bằng cách lấy đạo hàm của phương trình (3.68) như sau:

$$m_1\ddot{u}_1 - c_2\dot{u}_2 + k_1u_1 - k_2u_2 - \theta V = F_0 \cos \Omega \tau \quad (3.70)$$

$$m_2\ddot{u}_2 + c_2\dot{u}_2 + k_2u_2 + \theta V = -m_2\ddot{u}_1 \quad (3.71)$$

$$CV + \frac{V}{R} - \theta\dot{u}_2 = 0 \quad (3.72)$$

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

$$\text{Đặt: } \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \mu = \frac{m_2}{m_1}, \xi_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2}, \beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_1}, \quad (3.73)$$

$$\kappa^2 = \frac{\theta^2}{k_2C}, \nu = \frac{CV}{\theta}, \alpha = \frac{1}{\Omega RC}$$

và thực hiện các phép biến đổi:

$$t = \omega_1\tau, u_1 = x_1, \dot{u}_1 = \omega_1\dot{x}_1, \ddot{u}_1 = \omega_1^2\ddot{x}_1, u_2 = x_2, \dot{u}_2 = \omega_1\dot{x}_2, \ddot{u}_2 = \omega_1^2\ddot{x}_2 \quad (3.74)$$

Khi đó hệ phương trình (3.70)-(3.72) có thể được chuyển đổi thành hệ phương trình không thứ nguyên như sau:

$$\ddot{x}_1 - 2\mu\beta\xi_2\dot{x}_2 + x_1 - \mu\beta^2x_2 - \mu\beta^2\kappa^2\nu = X_{st} \cos \lambda t \quad (3.75)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2x_2 + \beta^2\kappa^2\nu = -\ddot{x}_1 \quad (3.76)$$

$$\dot{\nu} + \lambda\alpha\nu = \dot{x}_2 \quad (3.77)$$

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

$$X_{st} = F_0 / k_1 \quad (3.78)$$

Về mặt vật lý, ω_1 và ω_2 lần lượt là tần số tự nhiên của kết cấu chính và TMD-PSEH, κ^2 là hệ số ghép điện cơ, α là tỷ số điện trở, ν là điện áp biến đổi và $\mu, \xi_2, \beta, \lambda$ lần lượt là tỷ số khối lượng, tỷ số giảm chấn, tỷ số tần số giữa kết cấu chính với TMD-PSEH và tỷ lệ tần số lực kích động với tần số của kết cấu chính.

Để giải hệ (3.75)-(3.77) ta sử dụng phương pháp biên độ phức.

Xét kích động điều hòa (3.66) ở dạng phức:

$$F(t) = F_0 e^{i\lambda t} \quad (3.79)$$

Các nghiệm phức ở trạng thái ổn định của hệ (3.75)-(3.77) có thể được viết dưới dạng:

$$\tilde{x}_1(t) = X_1 e^{i\lambda t}, \tilde{x}_2(t) = X_2 e^{i\lambda t}, \tilde{v}(t) = X_v e^{i\lambda t} \quad (3.80)$$

trong đó X_1, X_2, X_v là các biên độ phức.

Thay (3.80) vào (3.75)-(3.77) ta được:

$$(1 - \lambda^2)X_1 - (\mu\beta^2 + i2\mu\beta\xi_2\lambda)X_2 - \mu\kappa^2\beta^2 X_v = X_{st} \quad (3.81)$$

$$-\lambda^2 X_1 + (\beta^2 - \lambda^2 + i2\beta\xi_2\lambda)X_2 + \kappa^2\beta^2 X_v = 0 \quad (3.82)$$

$$-iX_2 + (i + \alpha)X_v = 0 \quad (3.83)$$

Giải hệ (3.81)-(3.83) ta thu được

$$\frac{X_1}{X_{st}} = \frac{B_1 + B_2 i}{E_1 + E_2 i}, \quad \frac{X_2}{X_{st}} = \frac{C_1 + C_2 i}{E_1 + E_2 i}, \quad \frac{X_v}{X_{st}} = \frac{D_1 + D_2 i}{E_1 + E_2 i} \quad (3.84)$$

với

$$B_1 = \alpha(\beta^2 - \lambda^2) - 2\beta\xi_2\lambda, B_2 = \beta^2 - \lambda^2 + 2\alpha\beta\xi_2\lambda + \kappa^2\beta^2 \quad (3.85)$$

$$C_1 = \alpha\lambda^2, C_2 = \lambda^2 \quad (3.86)$$

$$D_1 = 0, D_2 = \lambda^2 \quad (3.87)$$

$$E_1 = (\lambda^2 - 1)(2\beta\xi_2\lambda - \alpha\beta^2 + \alpha\lambda^2) + \mu\beta\lambda^2(2\xi_2\lambda - \alpha\beta), \quad (3.88)$$

$$E_2 = (1 - \lambda^2)(2\alpha\beta\xi_2\lambda + \kappa^2\beta^2 + \beta^2 - \lambda^2) - \mu\beta\lambda^2(\beta + 2\alpha\xi_2\lambda + \kappa^2\beta)$$

Gọi đáp ứng chuyển vị và điện áp của hệ có dạng:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_1 \cos(\lambda t + \varphi_1) \\ x_2(t) &= a_2 \cos(\lambda t + \varphi_2) \\ v(t) &= V_0 \cos(\lambda t + \varphi_v) \end{aligned} \quad (3.89)$$

trong đó a_1, a_2, V_0 và $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_v$ tương ứng là biên độ và pha của $x_1(t), x_2(t), v(t)$.

Khi đó, đáp ứng ở trạng thái ổn định $x_1(t), x_2(t)$ và $v(t)$ của hệ (3.75)-(3.77) được định nghĩa là phần thực của (3.80) có dạng:

$$\begin{aligned}
x_1(t) &= a_1 \cos(\lambda t + \varphi_1) \\
x_2(t) &= a_2 \cos(\lambda t + \varphi_2) \\
v(t) &= V_0 \cos(\lambda t + \varphi_v)
\end{aligned} \tag{3.90}$$

trong đó

$$\begin{aligned}
a_1 &= |X_1| = X_{st} \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}; \quad \varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_2 E_1 - B_1 E_2}{B_1 E_1 + B_2 E_2} \right) \\
a_2 &= |X_2| = X_{st} \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}; \quad \varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{C_2 E_1 - C_1 E_2}{C_1 E_1 + C_2 E_2} \right) \\
V_0 &= |X_v| = X_{st} \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}; \quad \varphi_v = \tan^{-1} \left(\frac{D_2 E_1 - D_1 E_2}{D_1 E_1 + D_2 E_2} \right)
\end{aligned} \tag{3.91}$$

Theo đó, hệ số khuếch đại cơ học của $x_1(t)$, $x_2(t)$ và biên độ điện áp được xác định như sau:

$$K_1 = \frac{a_1}{X_{st}} = \sqrt{\frac{p_0 + p_1 \xi_2 + p_2 \xi_2^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2}} \tag{3.92}$$

$$K_2 = \frac{a_2}{X_{st}} = \lambda^2 \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2}} \tag{3.93}$$

$$V_0 = X_{st} v_0, v_0 = \frac{\lambda^2}{\sqrt{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2}} \tag{3.94}$$

trong đó

$$\begin{aligned}
p_0 &= [\beta^2(1 + \kappa^2) - \lambda^2]^2 + \alpha^2(\beta^2 - \lambda^2)^2, \quad p_1 = 4\alpha\kappa^2\lambda\beta^3, \quad p_2 = 4\lambda^2\beta^2(1 + \alpha^2), \\
q_0 &= \{(\lambda^2 - 1)[\beta^2(1 + \kappa^2) - \lambda^2] + \mu\lambda^2\beta^2(1 + \kappa^2)\}^2 + \\
&\quad + \alpha^2[(\lambda^2 - 1)(\beta^2 - \lambda^2) + \mu\lambda^2\beta^2]^2, \\
q_1 &= 4\alpha\kappa^2\lambda\beta^3[\lambda^2(1 + \mu) - 1]^2, \quad q_2 = 4\lambda^2\beta^2(1 + \alpha^2)[\lambda^2(1 + \mu) - 1]^2
\end{aligned} \tag{3.95}$$

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:

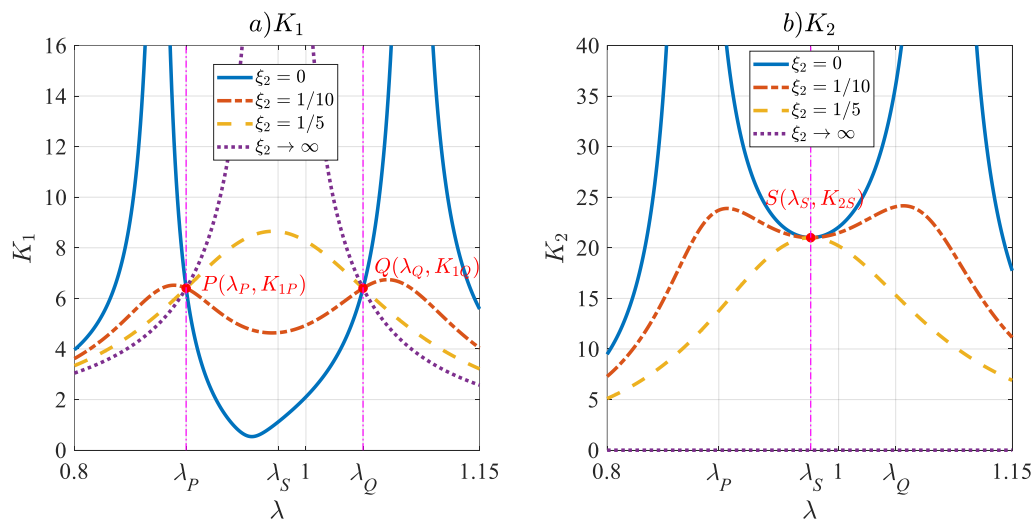
(a) thứ nhất là hoạt động như đối với TMD cơ học thông thường để triệt tiêu rung động của kết cấu cơ sở

(b) thứ hai là thu thập năng lượng điện được càng nhiều càng tốt.

Để giải quyết hai yêu cầu đó, ở đây phương pháp của Den Hartog trong lý thuyết điểm cố định [84] sẽ được mở rộng để xác định các giá trị tối ưu của tỷ số tần số và hệ số giảm chấn.

Đầu tiên, ta xem xét hệ số khuếch đại biên độ dao động của kết cấu chính K_1 , hệ số này có thể được biểu thị dưới dạng hàm số của hệ số giảm chấn ξ_2 như trong công thức (3.92).

Như đã thấy trong công thức (3.92) và (3.95), K_1 phụ thuộc vào 6 tham số bao gồm 3 tham số cơ học μ, β, ξ_2 , một tham số điện α , một tham số ghép cơ điện κ^2 và một tham số kích động λ còn được gọi là nhiễu đầu vào. Khi khớp nối cơ điện biến mất, tức là $\kappa^2 = 0$ thì phương trình (3.92) trở thành hệ số khuếch đại của hệ kết cấu chính không cần với TMD cơ học thông thường [84], [85], và K_1 chỉ phụ thuộc vào μ, β, ξ_2 và λ .



Hình 3.4 Các điểm cố định của đường cong hệ số khuếch đại của hệ kết cấu chính không cần với TMD-PSEH chịu kích động ngoài

a) $P(\lambda_P, K_{1P}), Q(\lambda_Q, K_{1Q})$ của K_1 ; b) $S(\lambda_S, K_{2S})$ của K_2

Như trong Hình 3.4a ta thấy rằng đường cong biên độ-tần số $K_1(\lambda)$ có hai điểm cố định, ký hiệu là $P(\lambda_P, K_{1P})$ và $Q(\lambda_Q, K_{1Q})$, tọa độ của chúng K_{1P}, K_{1Q} thì

không phụ thuộc vào hệ số giảm chấn ξ_2 . Nói cách khác, các giá trị của K_1 không đổi đối với các giá trị tùy ý tại hai điểm cố định này. Ví dụ, lấy hai giá trị cụ thể của ξ_2 , $\xi_2 = 0$ and $\xi_2 \rightarrow \infty$, và thay thế chúng vào (3.92) ta được

$$K_1(\xi_2 = 0) = \sqrt{\frac{p_0}{q_0}} = \sqrt{\frac{[\beta^2(1+\kappa^2) - \lambda^2]^2 + \alpha^2(\beta^2 - \lambda^2)^2}{\{(\lambda^2 - 1)[\beta^2(1+\kappa^2) - \lambda^2] + \mu\lambda^2\beta^2(1+\kappa^2)\}^2 + \alpha^2[(\lambda^2 - 1)(\beta^2 - \lambda^2) + \mu\lambda^2\beta^2]^2}} \quad (3.96)$$

$$K_1(\xi_2 \rightarrow \infty) = \sqrt{\frac{p_2}{q_2}} = \sqrt{\frac{1}{[\lambda^2(1+\mu) - 1]^2}} \quad (3.97)$$

Cân bằng (3.96) và (3.97) dẫn đến phương trình trùng phương của biến λ :

$$(1 + \alpha^2)(2 + \mu)\lambda^4 - 2[\beta^2(1 + \mu)(1 + \alpha^2 + \kappa^2) + 1 + \alpha^2]\lambda^2 + 2\beta^2(1 + \alpha^2 + \kappa^2) = 0 \quad (3.98)$$

Giải phương trình (3.98) ta được 2 nghiệm dương λ_p và λ_q

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\beta^2(1 + \mu)(1 + \alpha^2 + \kappa^2) + 1 + \alpha^2 - \beta\sqrt{2(1 + \alpha^2)(2 + \mu)(1 + \alpha^2 + \kappa^2)}}{(1 + \alpha^2)(2 + \mu)}} \quad (3.99)$$

$$\lambda_q = \sqrt{\frac{\beta^2(1 + \mu)(1 + \alpha^2 + \kappa^2) + 1 + \alpha^2 + \beta\sqrt{2(1 + \alpha^2)(2 + \mu)(1 + \alpha^2 + \kappa^2)}}{(1 + \alpha^2)(2 + \mu)}}$$

Thay (3.99) vào (3.97) ta thu được các tọa độ K_{1p}, K_{1q}

$$K_{1p} = \sqrt{\frac{1}{[\lambda_p^2(1 + \mu) - 1]^2}}, K_{1q} = \sqrt{\frac{1}{[\lambda_q^2(1 + \mu) - 1]^2}} \quad (3.100)$$

Theo gợi ý của Den Hartog [84], tỷ số tần số tối ưu β được xác định bởi:

$$K_{1p} = K_{1q} \quad (3.101)$$

Thay (3.100) vào (3.101) ta thu được phương trình theo biến β

$$(c_0 + c_2\beta^2)(d_0 + d_2\beta^2 + d_4\beta^4)^2 = 0 \quad (3.102)$$

trong đó c_0, c_2, d_0, d_2 là hàm của μ, κ^2, α

$$\begin{aligned} c_0 &= -(1 + \alpha^2), c_2 = (1 + \mu)^2(1 + \alpha^2 + \kappa^2), \\ d_0 &= (1 + \alpha^2)^2, d_2 = -2(1 + \alpha^2)(1 + \alpha^2 + \kappa^2), d_4 = (1 + \mu)^2(1 + \alpha^2 + \kappa^2)^2 \end{aligned} \quad (3.103)$$

Nghiệm thực dương duy nhất của (3.102) thu được từ phương trình $c_0 + c_2\beta^2 = 0$. Khi đó tỷ số tần số tối ưu được xác định bởi:

$$\beta_{\text{op}} = \sqrt{-\frac{c_0}{c_2}} = \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{1 + \alpha^2 + \kappa^2}} \quad (3.104)$$

Thay (3.104) vào (3.99), ta thu được các kết quả của λ_p và λ_Q :

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{\frac{\mu}{2 + \mu}}}{1 + \mu}}, \lambda_Q = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{\frac{\mu}{2 + \mu}}}{1 + \mu}} \quad (3.105)$$

Thay (3.105) vào (3.100), ta thu được các giá trị của K_{1P}, K_{1Q}

$$K_{1P} = K_{1Q} = \sqrt{\frac{2 + \mu}{\mu}} \quad (3.106)$$

Từ (3.105) và (3.106) ta thấy rằng hoành độ và tọa độ của hai điểm cố định của TMD-PSEH hoàn toàn trùng khớp với hai điểm cố định của TMD cơ học như đã cho trong [84], [85], tuy nhiên, hệ số β_{op} của TMD-PSEH được cho bởi (3.104) phụ thuộc vào tỷ lệ điện trở α , và hệ số ghép điện cơ κ^2 . Bên cạnh đó, từ (3.104) cho thấy rằng

$$\beta_{\text{op}} = \beta_{\text{DH}} \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{1 + \alpha^2 + \kappa^2}} \leq \beta_{\text{DH}} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (3.107)$$

trong đó β_{DH} là tỷ số tần số tối ưu của TMD cơ học được xác định bởi lý thuyết điểm cố định của Den Hartog.

Tiếp theo, để tìm ra hệ số giảm chấn tối ưu, cần có các điểm cố định P và Q nằm gần hai đỉnh của đường cong $K_1(\lambda)$, tốt nhất là nếu chúng đạt đỉnh đồng bộ. Điều này dẫn đến các điều kiện sau

$$\frac{\partial K_1}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_p} = \frac{\partial K_1}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_Q} = 0 \quad (3.108)$$

Biểu thức của ξ_2 có thể được rút ra bằng cách sử dụng (3.92) và (3.108).
Thật vậy, bình phương 2 vế của (3.92) dẫn đến

$$K_1^2(q_0 + q_1\xi_2 + q_2\xi_2^2) = p_0 + p_1\xi_2 + p_2\xi_2^2 \quad (3.109)$$

Lấy đạo hàm cả hai vế của (3.109) tại $\lambda = \lambda_p$ và/hoặc $\lambda = \lambda_Q$ kết hợp với (3.108) ta thu được

$$\begin{aligned} K_{1^{(*)}}^2 \left[\frac{\partial q_0}{\partial \lambda} + \frac{\partial q_1}{\partial \lambda} \xi_2 + \frac{\partial q_2}{\partial \lambda} \xi_2^2 \right] &= \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} + \frac{\partial p_1}{\partial \lambda} \xi_2 + \frac{\partial p_2}{\partial \lambda} \xi_2^2 \\ \left[K_{1^{(*)}}^2 \frac{\partial q_2}{\partial \lambda} - \frac{\partial p_2}{\partial \lambda} \right] \xi_2^2 + \left[K_{1^{(*)}}^2 \frac{\partial q_1}{\partial \lambda} - \frac{\partial p_1}{\partial \lambda} \right] \xi_2 + K_{1^{(*)}}^2 \frac{\partial q_0}{\partial \lambda} - \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} &= 0 \end{aligned} \quad (3.110)$$

trong đó $K_{1^{(*)}}$ đại diện cho tọa độ K_{1P} và/hoặc K_{1Q} . Giải phương trình bậc hai (3.110) cho ẩn ξ_2 , ta được hai nghiệm:

$$\xi_{2(1)} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad \xi_{2(2)} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.111)$$

trong đó

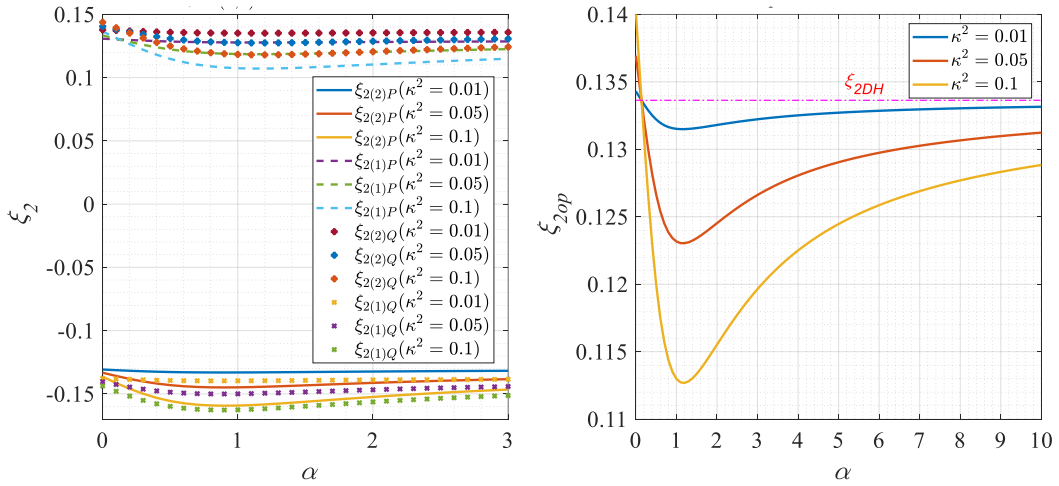
$$\begin{aligned} A &= 8\beta^2\lambda(\alpha^2 + 1) \left\{ K_{1^{(*)}}^2\lambda^2(1 + \mu) \left[3\lambda^2(1 + \mu) - 4 \right] + K_{1^{(*)}}^2 - 1 \right\} \\ B &= 4\alpha\beta^3\kappa^2 \left\{ K_{1^{(*)}}^2\lambda^2(1 + \mu) \left[5\lambda^2(1 + \mu) - 6 \right] + K_{1^{(*)}}^2 - 1 \right\} \\ C &= 4\lambda \left[\beta^2(1 + \kappa^2) - \lambda^2 \right] + 4\alpha^2\lambda(\beta^2 - \lambda^2) + \\ &+ K_{1^{(*)}}^2 \left\{ 4\lambda \left\{ (\lambda^2 - 1) \left[\beta^2(1 + \kappa^2) - \lambda^2 \right] + \mu\lambda^2\beta^2(1 + \kappa^2) \right\} \left[\beta^2(1 + \mu)(1 + \kappa^2) - 2\lambda^2 + 1 \right] \right. \\ &\left. + 4\alpha^2\lambda \left[\beta^2(1 + \mu) - 2\lambda^2 + 1 \right] \left\{ \lambda^2(1 - \lambda^2) + \beta^2 \left[\lambda^2(1 + \mu) - 1 \right] \right\} \right\} \end{aligned} \quad (3.112)$$

Tại điểm P , thay $\lambda = \lambda_p, K_{1^{(*)}} = K_{1P}, \beta = \beta_{op}$ thu được 2 nghiệm tương ứng $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p}$ và $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_p}$. Tại điểm Q , thay $\lambda = \lambda_Q, K_{1^{(*)}} = K_{1Q}, \beta = \beta_{op}$ thu được 2 nghiệm tương ứng $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_Q}$ và $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$. Trong số bốn giá trị của hệ số giảm chấn này, chỉ có hai giá trị dương, $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p}, \xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$ như minh họa trong Hình 3.5a, được chọn. Vì $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p} \neq \xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$, nên các điểm cố định tương ứng không thể đạt đỉnh đồng bộ với một trong hai giá trị này. Ngoài ra, giá trị tối ưu của ξ_2 sẽ được xác định như đề xuất của Brock [89] như dưới đây (Hình 3.5b).

$$\xi_{2op} = \sqrt{\frac{\xi_{2(1)}^2|_{\lambda=\lambda_p} + \xi_{2(2)}^2|_{\lambda=\lambda_Q}}{2}} \quad (3.113)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p} &= \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \Big|_{\lambda=\lambda_p} = \left[\alpha \kappa^2 (\mu + 2)^{1/4} \left(\sqrt{\mu(\mu + 2)} - 2 - \mu \right) + \right. \\ &\quad \left. + (1 + \alpha^2 + \kappa^2) \sqrt{2\mu} \sqrt{\sqrt{\mu + 2}(4\mu^2 + 9\mu + 3) - \sqrt{\mu}(4\mu^2 + 13\mu + 10)} \right] \times \\ &\quad \times \left[2 \left(\sqrt{\mu + 2} - \sqrt{\mu} \right)^{3/2} \sqrt{(\mu + 1)(\mu + 2)(\alpha^2 + 1)(1 + \alpha^2 + \kappa^2)} \right]^{-1} \\ \xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q} &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \Big|_{\lambda=\lambda_Q} = \left[\alpha \kappa^2 (\mu + 2)^{1/4} \left(\sqrt{\mu(\mu + 2)} - 2 + \mu \right) + \right. \\ &\quad \left. + (1 + \alpha^2 + \kappa^2) \sqrt{2\mu} \sqrt{\sqrt{\mu + 2}(4\mu^2 + 9\mu + 3) + \sqrt{\mu}(4\mu^2 + 13\mu + 10)} \right] \times \\ &\quad \times \left[2 \left(\sqrt{\mu + 2} + \sqrt{\mu} \right)^{3/2} \sqrt{(\mu + 1)(\mu + 2)(1 + \alpha^2)(1 + \alpha^2 + \kappa^2)} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (3.114)$$



Hình 3.5 Đồ thị hệ số cản theo biến α của hệ chịu kích động ngoài

$\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_p}$: đường nét liền, $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_p}$: đường nét gạch, $\xi_{2(1)}|_{\lambda=\lambda_Q}$: đường *, $\xi_{2(2)}|_{\lambda=\lambda_Q}$: đường x

Do đó, các biểu thức rõ ràng về tỷ lệ tần số tối ưu β_{op} và hệ số giảm chấn tối ưu ξ_{2op} cho TMD-PSEH lần lượt được cho bởi (3.104) và (3.113) phụ thuộc vào μ, κ^2, α . Trong số các tham số này, μ và κ^2 không đổi đối với một loại vật liệu áp điện và TMD cụ thể. Trong khi đó, tỷ số điện trở $\alpha = 1/(\Omega RC)$ là một hàm của Ω (R và C được coi là không đổi). Do đó, cần phải tìm một giá trị cụ thể của α độc lập với Ω để β_{op} và ξ_{2op} là hằng số.

Tiếp theo, hãy xem xét phần điện của PSEH được biểu diễn bằng mạch RC song song, như trong biểu thức (3.77). Bỏ qua hiệu ứng ghép trong mạch, dưới sự kích động bởi nguồn dòng hình sin có độ lớn I_R và tần số Ω , công suất tiêu tán bởi điện trở tải R được xác định như sau [111], [112]

$$P_R = \frac{I_R^2 R}{2(1 + R^2 \Omega^2 C^2)} \quad (3.115)$$

Giải điều kiện $\partial P_R / \partial R = 0$ bằng cách sử dụng (3.103), ta thấy rằng mạch có công suất đầu ra cực đại ở tải điện trở tối ưu $R = 1/(\Omega C)$ [111], khi đó $\alpha = 1/(\Omega RC) = 1$. Sử dụng phân tích này, ta thấy rằng hệ số điện trở tối ưu có thể được tính như sau:

$$\alpha_{op} = 1 \quad (3.116)$$

Thay (3.116) vào (3.104) và (3.113) ta xác định được các biểu thức của β_{op} và ξ_{2op} chỉ chứa 2 hằng số μ và κ^2 :

$$\beta_{op} = \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\frac{2}{2 + \kappa^2}}, \xi_{2op} = \sqrt{\frac{\xi_{2P}^2 + \xi_{2Q}^2}{2}} \quad (3.117)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \xi_{2P} = & \left[\kappa^2 (\mu + 2)^{1/4} \left(\sqrt{\mu(\mu + 2)} - 2 - \mu \right) + \right. \\ & \left. + (2 + \kappa^2) \sqrt{2\mu} \sqrt{\sqrt{\mu + 2}(4\mu^2 + 9\mu + 3) - \sqrt{\mu}(4\mu^2 + 13\mu + 10)} \right] \times \\ & \times \left[2 \left(\sqrt{\mu + 2} - \sqrt{\mu} \right)^{3/2} \sqrt{2(\mu + 1)(\mu + 2)(2 + \kappa^2)} \right]^{-1} \\ \xi_{2Q} = & \left[\kappa^2 (\mu + 2)^{1/4} \left(\sqrt{\mu(\mu + 2)} - 2 + \mu \right) + \right. \\ & \left. + (2 + \kappa^2) \sqrt{2\mu} \sqrt{\sqrt{\mu + 2}(4\mu^2 + 9\mu + 3) + \sqrt{\mu}(4\mu^2 + 13\mu + 10)} \right] \times \\ & \times \left[2 \left(\sqrt{\mu + 2} + \sqrt{\mu} \right)^{3/2} \sqrt{2(\mu + 1)(\mu + 2)(2 + \kappa^2)} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (3.118)$$

Từ (3.117) và (3.118) có thể thấy rằng khi $\kappa^2 = 0$ ta nhận được các hệ số tối ưu của TMD cơ học tương ứng như ở mục 2.1.2 là:

$$\beta_{\text{op}}(\kappa^2 = 0) = \frac{1}{1 + \mu} = \beta_{\text{DH}}$$

$$\xi_{2\text{op}}(\kappa^2 = 0) = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} = \xi_{\text{DH}}$$
(3.119)

3.2.3. Thiết kế tối ưu hệ thống TMD-PSEH chịu kích động ngoài

Từ các phương trình (3.69), (3.73), (3.116), (3.117), ta có:

$$\beta_{\text{op}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{\frac{k_2}{\mu k_1}} = \sqrt{\frac{1}{\mu k_1} \frac{k_d k_p}{k_d + k_p}} = \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\frac{2}{2 + \frac{\left(\frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p\right)^2}{\frac{k_d k_p}{k_d + k_p} \left(C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p}\right)}}$$
(3.120)

$$\kappa^2 = \frac{\left(\frac{k_d}{k_d + k_p} \theta_p\right)^2}{\frac{k_d k_p}{k_d + k_p} \left(C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p}\right)}$$
(3.121)

$$c_{2\text{op}} = 2\sqrt{m_2 k_2} \xi_{2\text{op}} = \sqrt{2m_2 \frac{k_d k_p}{k_d + k_p} \left[\xi_{2P}^2(\mu, \kappa^2) + \xi_{2Q}^2(\mu, \kappa^2) \right]}$$
(3.122)

$$R_{\text{op}} = \frac{1}{\Omega C \alpha_{\text{op}}} = \frac{1}{\Omega} \left[C_p + \frac{\theta_p^2}{k_d + k_p} \right]^{-1}$$
(3.123)

trong đó ξ_{2P}, ξ_{2Q} được cho bởi (3.118). Điều này cho thấy để tính toán $k_{\text{dop}}, c_{2\text{op}}, R_{\text{op}}$ thì phải biết các tham số đầu vào $m_1, m_2, k_1, k_p, C_p, \theta_p$, đồng thời κ^2 được coi là đại lượng trung gian để đánh giá các giá trị tối ưu này. Trong số các tham số cơ học m_1, m_2, k_1 , thì khối lượng m_1 và độ cứng lò xo k_1 của kết cấu chính là đã biết, trong khi khối lượng m_2 của TMD thường được chọn dựa trên kinh nghiệm từ việc ước tính μ , trong khoảng $0.01 \leq \mu \leq 0.1$ [84], [85]. Tương tự, các thông số cơ điện k_p, C_p, θ_p cũng có thể được chọn theo cách tương tự. Sau khi lựa chọn các thông số nêu trên cần xác định độ cứng tối ưu k_{dop} của TMD. Biến đổi phương trình (3.120) ta được:

$$\begin{aligned} & [(\mu+1)^2(2C_p k_p + \theta_p^2) - 2\mu C_p k_1] k_d^2 + \\ & + 2[k_p(\mu+1)^2(C_p k_p + \theta_p^2) - \mu k_1(2C_p k_p + \theta_p^2)] k_d - 2\mu k_1 k_p (C_p k_p + \theta_p^2) = 0 \end{aligned} \quad (3.124)$$

Giải phương trình (3.124) ta thu được 2 nghiệm:

$$k_{d(1)} = \frac{-\tilde{B} - \sqrt{\tilde{B}^2 - \tilde{A}\tilde{C}}}{\tilde{A}} \quad (3.125)$$

$$k_{d(2)} = \frac{-\tilde{B} + \sqrt{\tilde{B}^2 - \tilde{A}\tilde{C}}}{\tilde{A}} \quad (3.126)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= (\mu+1)^2(2C_p k_p + \theta_p^2) - 2\mu k_1 C_p, \tilde{B} = k_p(\mu+1)^2(C_p k_p + \theta_p^2) - \mu k_1(2C_p k_p + \theta_p^2), \\ \tilde{C} &= -2\mu k_1 k_p (C_p k_p + \theta_p^2), \tilde{B}^2 - \tilde{A}\tilde{C} = k_p^2(\mu+1)^4(C_p k_p + \theta_p^2)^2 + \mu^2 k_1^2 \theta_p^4 > 0 \end{aligned} \quad (3.127)$$

Xét một trường hợp cụ thể trong đó hiệu ứng áp điện có thể không còn ảnh hưởng trong quá trình hoạt động của TMD-PSEH, khi $\theta_p = 0$, điều đó có nghĩa là khối áp điện kiểu xếp chồng chỉ hoạt động giống như một lò xo cơ học. Các giá trị của k_d trong (3.125), (3.126) chỉ còn là:

$$k_{d(1)}(\theta_p = 0) = -k_p \quad (3.128)$$

$$k_{d(2)}(\theta_p = 0) = \frac{\mu k_1 k_p}{k_p(\mu+1)^2 - \mu k_1} \quad (3.129)$$

Điều này cho thấy rằng $k_{d(1)}$ có thể âm trong khi $k_{d(2)}$ là không thể. Ở đây, độ cứng dương được quan tâm, do đó giá trị $k_{d(2)}$ được sử dụng để tính giá trị tối ưu của k_d , gọi là k_{dop} . Thay (3.127) vào (3.126) ta được kết quả:

$$k_{\text{dop}} = \frac{\mu k_1(2C_p k_p + \theta_p^2) - k_p(\mu+1)^2(C_p k_p + \theta_p^2) + \sqrt{k_p^2(\mu+1)^4(C_p k_p + \theta_p^2)^2 + \mu^2 k_1^2 \theta_p^4}}{(\mu+1)^2(2C_p k_p + \theta_p^2) - 2\mu k_1 C_p} \quad (3.130)$$

Đáng chú ý, ta có thể quan sát thấy tử số của (3.130) luôn dương. Để đảm bảo $k_{\text{dop}} > 0$ ngay cả khi trường hợp $\theta_p = 0$ xảy ra thì mẫu số của (3.130) phải dương. Theo đó, độ cứng của khối áp điện cần phải thỏa mãn điều kiện sau:

$$\begin{aligned}
& (\mu + 1)^2 (2C_p k_p + \theta_p^2) - 2\mu k_1 C_p > 0 \\
& \Leftrightarrow k_p > \frac{\mu k_1}{(\mu + 1)^2} - \frac{\theta_p^2}{2C_p}
\end{aligned} \tag{3.131}$$

Phân tích biểu thức (3.131) với các giá trị rất nhỏ của μ, θ_p, C_p dẫn đến:

$$k_p > k_1 \tag{3.132}$$

Kết hợp (3.132) với (3.63) để đưa ra đánh giá sau

$$k_d \approx \mu k_1 < \mu k_p \Rightarrow \frac{k_d}{k_p} < \mu \Rightarrow k_d \ll k_1 < k_p \tag{3.133}$$

Một lần nữa, những điều này cho thấy sự lắp ghép nối tiếp giữa lò xo TMD và khối áp điện xếp chồng là phù hợp với kết cấu chính có độ cứng cao hơn nhiều so với lò xo TMD nhưng kém hơn so với độ cứng của khối áp điện.

Từ các tính toán trên đây rút quy trình thiết kế tối ưu cho hệ thống TMD-PSEH như sau

Bước 1: Xác định/chọn tham số đầu vào $m_1, m_2, k_1, k_p, C_p, \theta_p$ và tính toán μ theo (3.73), trong đó k_p được chọn dựa trên điều kiện (3.131).

Bước 2: Tính độ cứng tối ưu k_{dop} của lò xo TMD theo (3.130).

Bước 3: Tính hệ số cản tối ưu c_{2op} theo (3.122) sau khi tính κ^2 theo (3.121) và ξ_{2P}, ξ_{2Q} theo (3.118).

Bước 4: Tính toán các hệ số tối ưu β_{op} và ξ_{2op} được cho bởi (3.117).

Bước 5: Tính điện trở tối ưu R_{op} cho bởi (3.123) sau khi chọn tần số Ω để đảm bảo $\alpha_{op} = 1$.

Dựa trên các tham số đầu vào và các giá trị tối ưu thu được, các đại lượng trung gian k_2, θ, C cho bởi (3.69), ω_1, ω_2 cho bởi (3.73), tọa độ các điểm cố định không phụ thuộc hệ số giảm chấn P, Q cho bởi (3.106), (3.107) cũng có thể được xác định để tiếp tục việc khảo sát.

3.3. TMD-PSEH với khung khuếch đại lực lắp trên kết cấu chính chịu kích động ngoài

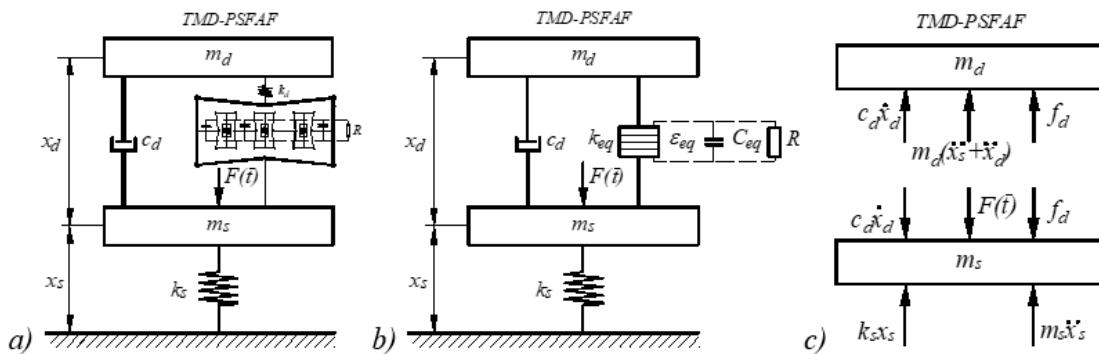
3.3.1. Phân tích đáp ứng của hệ thống

Hệ thống được đề xuất trong Bảng sáng chế [117] liên quan đến một TMD kết hợp với bộ thu thập năng lượng xếp chồng kết hợp khung khuếch đại lực kép (TMD-2sPSFAF) được mô tả trong Hình 3.6a. Kết cấu chính không cản có khối lượng m_s và một lò xo tuyến tính có độ cứng k_s , chịu kích động ngoài điều hòa $F(\bar{t})$ có dạng:

$$F(\bar{t}) = F_0 \cos \omega \bar{t} \quad (3.134)$$

trong đó \bar{t} là thời gian, F_0 là biên độ và ω là tần số kích thích.

TMD-2sPSFAF có khối lượng m_d , hệ số cản nhớt tuyến tính c_d , và 2sPSFAF lắp nối tiếp với lò xo của TMD có độ cứng k_d . Từ những điều đã được chứng minh ở chương 2, hệ mắc nối tiếp này có thể được thay thế bằng một PSEH tương đương như trong Hình 3.6b. PSEH tương đương có độ cứng k_{eq} , hệ số ghép điện cơ θ_{eq} , và điện dung C_{eq} , được cho bởi (2.84).



Hình 3.6 Mô hình kết cấu chính không cản với bộ thu thập năng lượng xếp chồng kết hợp khung khuếch đại lực kép

a) mô hình vật lý, b) mô hình tương đương, c) phân tích lực

Sơ đồ phân tích lực trong Hình 3.6c biểu thị sự cân bằng lực của các khối lượng, trong đó lực của PSEH tương đương được cho bởi (2.81). Theo đó, các phương trình của hệ đang xét được cho bởi:

$$\begin{aligned}
m_s \ddot{x}_s - c_d \dot{x}_d + k_s x_s - k_{eq} x_d - \theta_{eq} V &= F_0 \cos(\Omega \bar{t}) \\
m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_{eq} x_d + \theta_{eq} V &= -m_d \ddot{x}_s \\
C_{eq} \dot{V} + \frac{V}{R} &= \theta_{eq} \dot{x}_d
\end{aligned} \tag{3.135}$$

Thực hiện phép đặt:

$$\begin{aligned}
t = \omega_s \bar{t}, x_s = x_1, x_d = x_2, \omega_s = \sqrt{k_s / m_s}, \omega_d = \sqrt{k_{eq} / m_d}, \mu = m_d / m_s, \\
\xi_d = \frac{c_d}{2m_d \omega_d}, \beta = \frac{\omega_d}{\omega_s}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_s}, \kappa^2 = \frac{\theta_{eq}^2}{k_{eq} C_{eq}}, \nu = \frac{C_{eq} V}{\theta_{eq}}, \alpha = \frac{1}{\Omega R C_{eq}}, X_{st} = \frac{F_0}{k_s}
\end{aligned} \tag{3.136}$$

Trong đó, ω_s và ω_d là tần số riêng của kết cấu chính và PSEH tương đương, κ^2 là hệ số ghép cơ điện, α là hệ số điện trở, ν là điện áp biến đổi và $\mu, \xi_2, \beta, \lambda$ lần lượt là tỷ số khối lượng, hệ số giảm chấn, tỷ số tần số tự nhiên và tỷ số tần số lực kích động.

Hệ phương trình (3.135) có thể chuyển thành hệ không thứ nguyên như sau:

$$\begin{aligned}
\ddot{x}_1 - 2\mu\beta\xi_2\dot{x}_2 + x_1 - \mu\beta^2 x_2 - \mu\beta^2 \kappa^2 \nu &= X_{st} \cos \lambda t \\
\ddot{x}_2 + 2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2 x_2 + \beta^2 \kappa^2 \nu &= -\ddot{x}_1 \\
\dot{\nu} + \lambda\alpha\nu &= \dot{x}_2
\end{aligned} \tag{3.137}$$

Trong đó các dấu chấm phía trên biểu thị đạo hàm liên quan đến thời gian không thứ nguyên. Ta thấy rằng hệ (3.137) là một hệ tuyến tính gồm các phương trình vi phân thông thường cho ba ẩn số $x_1(t), x_2(t)$ và $\nu(t)$. Giải hệ (3.137) bằng phương pháp biên độ phức ta thu được:

$$\begin{aligned}
x_1(t) = A_1 \cos(\lambda t + \varphi_1); \quad x_2(t) = A_2 \cos(\lambda t + \varphi_2) \\
\nu(t) = A_3 \cos(\lambda t + \varphi_3)
\end{aligned} \tag{3.138}$$

với A_1, A_2, A_3 và $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ là biên độ và pha của $x_1(t), x_2(t), \nu(t)$, được cho bởi:

$$\begin{aligned}
A_1 &= X_{st} \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}, \varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_2 E_1 - B_1 E_2}{B_1 E_1 + B_2 E_2} \right), \\
A_2 &= X_{st} \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}, \varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{C_2 E_1 - C_1 E_2}{C_1 E_1 + C_2 E_2} \right), \\
A_3 &= X_{st} \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}, \varphi_3 = \tan^{-1} \left(\frac{D_2 E_1 - D_1 E_2}{D_1 E_1 + D_2 E_2} \right)
\end{aligned} \tag{3.139}$$

trong đó

$$\begin{aligned}
B_1 &= \alpha(\beta^2 - \lambda^2) - 2\beta\xi_2\lambda, B_2 = \beta^2 - \lambda^2 + 2\alpha\beta\xi_2\lambda + \kappa^2\beta^2, \\
C_1 &= \alpha\lambda^2, C_2 = \lambda^2, D_1 = 0, D_2 = \lambda^2, \\
E_1 &= (\lambda^2 - 1)(2\beta\xi_2\lambda - \alpha\beta^2 + \alpha\lambda^2) + \mu\beta\lambda^2(2\xi_2\lambda - \alpha\beta), \\
E_2 &= (1 - \lambda^2)(2\alpha\beta\xi_2\lambda + \kappa^2\beta^2 + \beta^2 - \lambda^2) - \mu\beta\lambda^2(\beta + 2\alpha\xi_2\lambda + \kappa^2\beta)
\end{aligned} \tag{3.140}$$

Theo đó, các hệ số khuếch đại cơ học K_1, K_2 của $x_1(t), x_2(t)$ và hệ số biên độ điện áp v_0 được tính toán tương ứng bằng:

$$K_1 = \frac{A_1}{X_{st}} = \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{E_1^2 + E_2^2}} \tag{3.141}$$

$$K_2 = \frac{A_2}{X_{st}} = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{E_1^2 + E_2^2}} \tag{3.142}$$

$$v_0 = \frac{A_3}{X_{st}} = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{E_1^2 + E_2^2}} \tag{3.143}$$

3.3.2. Xác định các tham số của hệ thống

Từ (3.137) có thể thấy rằng khi $\kappa^2 = 0$ ta thu được hệ thống TMD cơ học tương ứng. Thông thường, κ^2 có một giá trị nhỏ đối với các vật liệu áp điện khác nhau nên ta có thể tạm bỏ qua trong trường hợp này. Để nghiên cứu hệ kết cấu chính không cản 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:

$$\beta = \beta_{DH} = \frac{1}{1 + \mu} \tag{3.144}$$

$$\xi_2 = \xi_{DH} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \tag{3.145}$$

Từ (3.144) ta có:

$$k_{eq} = \frac{\mu}{(1 + \mu)^2} k_1 \tag{3.146}$$

Thay (3.146) vào công thức đầu tiên của hệ (2.84), ta được:

$$k_d = \frac{\mu k_s k_{p,i}}{(1 + \mu)^2 k_{p,i} - \mu N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi) k_s} \quad (3.147)$$

Rõ ràng, số lượng N của PSFAF đơn phải là số nguyên dương. Vì φ_i, φ thường là các góc nhỏ, cụ thể là $\varphi_i, \varphi < 10^\circ$ [12] nên $\cot \varphi, \cot \varphi_i > 0$. Do đó, để đảm bảo k_d dương, điều kiện sau được rút ra từ (3.147):

$$\begin{aligned} (1 + \mu)^2 k_{p,i} - \mu N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi) k_s &> 0 \\ \Leftrightarrow \frac{k_{p,i}}{k_s} &> \frac{\mu N \cot^2(\varphi_i) \cot(\varphi)}{(1 + \mu)^2} \end{aligned} \quad (3.148)$$

Từ góc độ kỹ thuật, tỷ lệ khối lượng μ và độ cứng lò xo của kết cấu chính k_1 là các thông số đã biết. Các tham số đặc trưng của FAF, chẳng hạn như góc cấu trúc φ_i, φ , cũng như của PSEH, chẳng hạn như độ cứng $k_{p,i}$, hệ số ghép cơ điện $\theta_{p,i}$, và điện dung $C_{p,i}$, có thể được chọn từ các vật liệu có sẵn. Như vậy công thức (3.148) cung cấp điều kiện chọn độ cứng $k_{p,i}$ thì độ cứng của lò xo k_d của TMD có thể tìm được bằng (3.147).

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 cản tích hợp TMD-PSEH chịu kích động nền và kích động ngoài. Từ đó chứng minh được rằng hệ thống tích hợp này có hai điểm cố định P và Q trùng với các điểm cố định của cùng một kết cấu chính không cản tích hợp TMD tối ưu thông thường;

- 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 chấn ξ_{2op} và tỷ số điện trở tối ưu α_{op} đã được xác định bằng phương pháp giải tích;

- Đưa ra quy trình thiết kế tối ưu hóa cho hệ thống TMD-PSEH. Đáng chú ý, điều kiện chọn độ cứng k_p của PSEH liên quan đến độ cứng lò xo k_{dop} của TMD và độ cứng k_1 của kết cấu chính cũng được đưa ra;

- Xây dựng được mô hình thiết bị thu thập năng lượng áp điện kiểu xếp chồng gắn trong khung khuếch đại lực kép 2sPSFAF. Sau đó, hệ phương trình mô tả của hệ thống kết cấu chính không cản tích hợp TMD-2sPSFAF chịu kích động ngoài 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

Trong chương này, Luận án trình bày việc phân tích dòng năng lượng trong TMD-PSEH để từ đó xác định được công thức tính công suất và hiệu suất năng lượng điện thu thập được. Sau đó tiến hành khảo sát số để kiểm nghiệm những kết quả tính toán đã thu được trước đó bằng phần mềm Matlab.

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 3.3, 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. Cần nhấn mạnh rằng phần năng lượng thu thập được này khác với năng lượng điện thực tế có được sau lần chuyển đổi cuối cùng của mô-đun điện [107], [108]. Do đó, trong phần này luận án tập trung vào dòng điện từ nguồn kích động đến PSEH và việc cung cấp năng lượng điện tạo ra cho tải điện trở.

Xét các phương trình (3.75)-(3.77) trong đó sử dụng độ dịch chuyển tuyệt đối $y = x_1 + x_2$ của khối lượng m_2 :

$$X_{st} \cos \lambda t = \ddot{x}_1 + x_1 - \mu(2\xi_2\beta\dot{x}_2 + \beta^2x_2 + \beta^2\kappa^2v) \quad (4.1)$$

$$(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) = \ddot{y} = -(2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2x_2 + \beta^2\kappa^2v) \quad (4.2)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{v} + \lambda\alpha v \quad (4.3)$$

Từ (4.1) và (4.2) ta có:

$$X_{st} \cos \lambda t = \ddot{x}_1 + x_1 + \mu\ddot{y} \quad (4.4)$$

Phương trình này cho thấy lực tác dụng F được truyền tới các lực quán tính của các khối lượng m_1 và m_2 , và lực đàn hồi của lò xo kết cấu chính. Nhân cả hai vế của (4.4) với vận tốc \dot{x}_1 để thu được phương trình cân bằng công suất:

$$\dot{x}_1 X_{st} \cos \lambda t = \ddot{x}_1\dot{x}_1 + x_1\dot{x}_1 + \mu\ddot{y}\dot{x}_1 \quad (4.5)$$

Để làm rõ mối quan hệ đầu vào-đầu ra giữa công suất cơ và công suất điện trong (4.5), cần phải biến đổi vế phải của biểu thức (4.5) để thể hiện những công suất đó. Nhân cả hai vế của (4.2) với vận tốc \dot{x}_1 và nhân cả hai vế của (4.3) với điện áp v , dẫn đến:

$$\begin{aligned} (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2)\dot{x}_1 &= \ddot{y}\dot{x}_1 = -(2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2x_2 + \beta^2\kappa^2v)\dot{x}_1 \\ &= -(2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2x_2 + \beta^2\kappa^2v)(\dot{y} - \dot{x}_2) \\ &= 2\beta\xi_2\dot{x}_2^2 + \beta^2x_2\dot{x}_2 + \beta^2\kappa^2v\dot{x}_2 + \ddot{y}\dot{y} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\dot{v} + \lambda\alpha v^2 = \dot{x}_2v \quad (4.7)$$

Thay (4.6), (4.7) vào (4.5) ta thu được:

$$\dot{x}_1 X_{st} \cos \lambda t = \ddot{x}_1\dot{x}_1 + \mu\ddot{y}\dot{y} + x_1\dot{x}_1 + \mu\beta^2x_2\dot{x}_2 + 2\mu\beta\xi_2\dot{x}_2^2 + \mu\beta^2\kappa^2(\dot{v} + \lambda\alpha v^2) \quad (4.8)$$

hoặc

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 X_{st} \cos \lambda t &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{x}_1^2}{2} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu(\dot{x}_1 + \dot{x}_2)^2}{2} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{x_1^2}{2} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu\beta^2x_2^2}{2} \right) + 2\mu\beta\xi_2\dot{x}_2^2 + \\ &+ \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu\beta^2\kappa^2v^2}{2} \right) + \mu\beta^2\kappa^2\lambda\alpha v^2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Công thức (4.9) có thể được viết dưới dạng cân bằng năng lượng như sau:

$$P_{in} = \dot{\Pi}_1 + \dot{\Pi}_2 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{E}_d + \dot{E}_c + P_{out} \quad (4.10)$$

trong đó Π_1, Π_2 lần lượt là động năng và U_1, U_2 lần lượt là thế năng của khối lượng m_1 và m_2 , E_d năng lượng tiêu tán, E_c năng lượng tĩnh điện và E_{out} năng lượng đầu ra, tương ứng được xác định bởi:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\dot{x}_1^2}{2}, \Pi_2 = \frac{\mu(\dot{x}_1 + \dot{x}_2)^2}{2}, U_1 = \frac{x_1^2}{2}, U_2 = \frac{\mu\beta^2x_2^2}{2}, E_d = 2\mu\beta\xi_2 \int \dot{x}_2^2 dt \\ E_c &= \frac{\mu\beta^2\kappa^2v^2}{2}, E_{out} = \mu\beta^2\kappa^2\lambda\alpha \int v^2 dt \end{aligned} \quad (4.11)$$

Bên cạnh đó, dòng công suất/năng lượng độc lập với thời gian cũng là một vấn đề được quan tâm. Năng lượng trên mỗi chu kỳ được định nghĩa là tích phân của công suất trong một khoảng thời gian như được cho bởi [105], [122], [123]:

$$\bar{E} = \int_0^T P dt \quad (4.12)$$

Áp dụng (4.12) vào (4.10) với chu kỳ dao động $T = 2\pi / \lambda$ ta được:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{\text{in}} &= \bar{E}_d + \bar{E}_{\text{out}} \\ \Leftrightarrow \pi K_1 |-\sin \varphi_1| &= 2\pi\mu\lambda\beta\xi_2 K_2^2 + \pi\mu\beta^2\kappa^2\alpha v_0^2 \end{aligned} \quad (4.13)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \bar{E}_{\text{in}} &= X_{\text{st}} \int_0^{2\pi/\lambda} \cos \lambda t [-\lambda a_1 \sin(\lambda t + \varphi_1)] dt = \pi X_{\text{st}} a_1 |-\sin \varphi_1| = \pi |-\sin \varphi_1| K_1 X_{\text{st}}^2 \\ \bar{\Pi}_1 &= \frac{[-\lambda a_1 \sin(\lambda t + \varphi_1)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \bar{\Pi}_2 = \frac{\mu\lambda^2 [-a_1 \sin(\lambda t + \varphi_1) - a_2 \sin(\lambda t + \varphi_2)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \\ \bar{U}_1 &= \frac{[a_1 \cos(\lambda t + \varphi_1)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \bar{U}_2 = \frac{\mu\beta^2 [a_2 \cos(\lambda t + \varphi_2)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \\ \bar{E}_C &= \frac{\mu\beta^2\kappa^2 [V_0 \cos(\lambda t + \varphi_v)]^2}{2} \Big|_0^{2\pi/\lambda} = 0, \\ \bar{E}_d &= 2\mu\beta\xi_2 \int_0^{2\pi/\lambda} [-\lambda a_2 \sin(\lambda t + \varphi_2)]^2 dt = 2\pi\mu\lambda\beta\xi_2 a_2^2 = 2\pi\mu\lambda\beta\xi_2 K_2^2 X_{\text{st}}^2 \\ \bar{E}_{\text{out}} &= \mu\beta^2\kappa^2\lambda\alpha \int_0^{2\pi/\lambda} [V_0 \cos(\lambda t + \varphi_v)]^2 dt = \pi\mu\beta^2\kappa^2\alpha V_0^2 = \pi\mu\beta^2\kappa^2\alpha v_0^2 X_{\text{st}}^2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

trong đó số hạng $(-\sin \varphi_1)$ được lấy ở giá trị tuyệt đối để đảm bảo năng lượng đầu vào dương. Cần phải nhấn mạnh rằng các số hạng $\bar{\Pi}_1, \bar{\Pi}_2, \bar{U}_1, \bar{U}_2$ và \bar{E}_C bằng 0 sau khi lấy tích phân trong một khoảng thời gian vì chúng là hàm hình sin của thời gian.

Rõ ràng, phía bên trái của phương trình (4.10) đại diện cho công suất đầu vào P_{in} và phía bên phải biểu thị tốc độ thời gian của bảy phần năng lượng được chuyển đổi. Phương trình này đưa ra một dạng cụ thể của định luật bảo toàn năng lượng phổ quát cho mô hình của kết cấu chính không cản với TMD-PSEH. Sự đóng góp của từng phần năng lượng vào quá trình chuyển đổi năng lượng có thể được rút ra như sau

- **Chuyển đổi năng lượng cơ - cơ:** cơ năng đầu vào E_{in} được thu giữ và chuyển hóa một phần từ nguồn kích động thành cơ năng, bao gồm động năng và

thể năng, làm cho các khối lượng m_1, m_2 dao động chống lại năng lượng tiêu tán E_d do giảm chấn. Trong số các phần này, động năng có nguồn gốc từ vận tốc tuyệt đối của khối lượng, mặt khác, thế năng và năng lượng tiêu tán tương ứng liên quan đến độ dịch chuyển tương đối và vận tốc của các khối lượng.

- **Chuyển đổi năng lượng cơ - điện:** thông qua hiệu ứng áp điện, phần cơ năng còn lại được chuyển hóa thành năng lượng điện đầu ra, gồm hai phần, một phần là năng lượng tĩnh điện tích trữ trong điện dung áp điện, phần còn lại là năng lượng ra đưa tới tải điện trở.

Như đã thấy trong (4.13), các giá trị hiệu dụng chỉ đến từ \bar{E}_{in}, \bar{E}_d và \bar{E}_{out} , điều đó có nghĩa là trong một chu kỳ thì công suất đầu vào trung bình được phân phối cho công suất tiêu tán trung bình và công suất đầu ra trung bình trên điện trở tải.

4.1.2. Công suất và hiệu suất trong TMD-PSEH

Hiệu suất của hệ thống thu thập năng lượng được định nghĩa là công suất điện đầu ra chia cho công suất đầu vào cơ học. Bởi vì công suất tức thời cho bởi (4.8)-(4.10) thay đổi theo thời gian nên phương án được sử dụng là công suất trung bình. Bây giờ ta xác định công suất trung bình là lượng năng lượng trung bình thực hiện trong mỗi chu kỳ [106], [122], [123]:

$$\bar{P} = \frac{\bar{E}_{cycle}}{T} \quad (4.15)$$

Theo đó, công suất trung bình $\bar{P}_{in}, \bar{P}_{out}$ có thể thu được từ (4.14), (4.15) và sử dụng các biểu thức của K_1 trong (3.92) và v_0 trong (3.94):

$$\bar{P}_{in} = \frac{\bar{E}_{in}}{2\pi / \lambda} = \frac{\lambda |\sin \varphi_1| X_{st}^2}{2} K_1 = \frac{\lambda |\sin \varphi_1| X_{st}^2}{2} \sqrt{\frac{p_0 + p_1 \xi_2 + p_2 \xi_2^2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2}} \quad (4.16)$$

$$\bar{P}_d = \frac{\bar{E}_d}{2\pi / \lambda} = \lambda^2 \mu \beta \xi_2 X_{st}^2 K_2^2 = \lambda^4 \mu \beta X_{st}^2 \frac{(1 + \alpha^2) \xi_2}{q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2} \quad (4.17)$$

$$\bar{P}_{out} = \frac{\bar{E}_{out}}{2\pi / \lambda} = \frac{\mu \beta^2 \kappa^2 \alpha \lambda X_{st}^2}{2} v_0^2 = \frac{\mu \alpha \beta^2 \kappa^2 \lambda^5 X_{st}^2}{2(q_0 + q_1 \xi_2 + q_2 \xi_2^2)} \quad (4.18)$$

trong đó $p_0, p_1, p_2, q_0, q_1, q_2$ được cho bởi (3.95). Như đã thấy trong các phương trình (3.92), (3.93), (3.94), (4.16), (4.17), (4.18) rằng các hệ số khuếch đại K_1, K_2 , biên độ điện áp v_0 , công suất trung bình $\bar{P}_{in}, \bar{P}_d, \bar{P}_{out}$, cũng như năng lượng trung bình $\bar{E}_{in}, \bar{E}_d, \bar{E}_{out}$, là các hàm hữu tỷ của hệ số giảm chấn ξ_2 có cùng mẫu số, còn tử số phụ thuộc vào ξ_2 hoặc không. Ta thấy rằng:

- K_1 có hai điểm cố định độc lập với hệ số giảm chấn tại đó có trục hoành là λ_p và λ_q , như đã chứng minh ở phần trước.

- Trong khi đó, đường cong K_2 cũng có một điểm cố định như được mô tả trong Hình 3.4b dẫn đến mỗi đường cong $v_0, \bar{P}_{out}, \bar{E}_{out}$ cũng sẽ có một điểm cố định như thế. Thật vậy, vì chỉ có mẫu số của chúng là hàm bậc hai của ξ_2 , nên chúng độc lập với hệ số tắt dần khi $q_1 = q_2 = 0$, hoặc tương đương với:

$$\lambda^2(1+\mu)-1=0 \Leftrightarrow \lambda_s = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} \quad (4.19)$$

Đây là hoành độ của các điểm cố định liên quan đến các đường cong $K_2, v_0, \bar{P}_{out}, \bar{E}_{out}$.

Thay (4.19) vào (3.93), (3.94), (4.14), (4.18) ta thu được các tọa độ tương ứng của $K_{2s}, v_{0s}, \bar{P}_{outs}, \bar{E}_{outs}$ như sau:

$$\begin{aligned} K_{2s} &= \frac{1+\mu}{\mu}, v_{0s} = \frac{\mu+1}{\mu\sqrt{\alpha^2+1}}, \\ \bar{P}_{outs} &= \frac{X_{st}^2 \alpha \beta_{op}^2 \kappa^2 (\mu+1)^{3/2}}{2\mu(\alpha^2+1)}, \bar{E}_{outs} = \frac{\pi X_{st}^2 \alpha \beta_{op}^2 \kappa^2 (\mu+1)^2}{\mu(\alpha^2+1)} \end{aligned} \quad (4.20)$$

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, hoặc bằng tỷ số giữa năng lượng đầu ra và năng lượng đầu vào trung bình, nhưng cách đầu tiên được dùng để tính toán phổ biến hơn trong thực tế. Vì vậy, công thức tính hiệu suất cho hệ thống PSEH như sau [101], [115], [116]:

$$\eta = \frac{\bar{P}_{out}}{\bar{P}_{in}} = \frac{\bar{E}_{out}}{\bar{E}_{in}} \quad (4.21)$$

Thay (4.16), (4.18) vào (4.21) ta được:

$$\eta = \frac{\mu\beta^2\kappa^2\alpha v_0^2}{|-\sin\varphi_1| K_1} = \frac{\mu\alpha\beta^2\kappa^2\lambda^4}{|-\sin\varphi_1|\sqrt{(p_0 + p_1\xi_2 + p_2\xi_2^2)(q_0 + q_1\xi_2 + q_2\xi_2^2)}} \quad (4.22)$$

Vì không có giá trị nào của λ thỏa mãn điều kiện mẫu số trong (4.22) độc lập với ξ_2 , nên không tồn tại một điểm cố định độc lập với hệ số giảm chấn trên đường cong hiệu suất.

Mặt khác, vì $\beta = \beta_{\text{op}}, \xi_2 = \xi_{2\text{op}}$ là các hàm của μ, κ^2 như được trình bày trong các phương trình (3.105) và (3.106), do đó dòng năng lượng (4.13), công suất trung bình (4.16), (4.18) và hiệu suất (4.22) phụ thuộc vào bốn tham số, đó là một tham số cơ học μ , một tham số ghép nối cơ điện κ^2 , một tham số điện α , và tần số kích thích λ . Rõ ràng, ta không thể mong đợi đạt được điện áp đầu ra hoặc công suất đầu ra tối đa, cũng như hiệu suất, khi để số hạng $(q_0 + q_1\xi_2 + q_2\xi_2^2)$ trong mẫu số của chúng có xu hướng bằng 0, vì điều này cũng sẽ làm cho biên độ dao động của kết cấu chính trở nên quá lớn. Thay vào đó, ta có thể điều chỉnh tỷ lệ điện trở để đạt được công suất đầu ra cực đại cục bộ. Tiếp theo, phân tích tiệm cận của các đại lượng cơ và điện được xem xét đối với các giá trị rất lớn và nhỏ tương ứng của α trong điều kiện ngắn mạch và hở mạch.

Đối với điều kiện ngắn mạch, tải điện trở $R \rightarrow 0, \alpha \rightarrow \infty$, từ công thức (3.91), (3.92), (3.93), (4.16) ta có:

$$K_{1,\alpha \rightarrow \infty} = \sqrt{\frac{(\lambda^2 - \beta^2)^2 + 4\lambda^2\beta^2\xi_2^2}{[(1 - \lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\lambda^2\beta^2]^2 + 4\lambda^2[\lambda^2(1 + \mu) - 1]^2\beta^2\xi_2^2}} \quad (4.23)$$

$$K_{2,\alpha \rightarrow \infty} = \frac{\lambda^2}{\sqrt{[(1 - \lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\lambda^2\beta^2]^2 + 4\lambda^2[\lambda^2(1 + \mu) - 1]^2\beta^2\xi_2^2}} \quad (4.24)$$

$$\varphi_{1,\alpha \rightarrow \infty} = \text{atan} \left\{ \frac{2\lambda\beta\xi_2 \left[1 + \frac{\lambda^2(1 + \mu) - 1}{(1 - \lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\lambda^2\beta^2} (\lambda^2 - \beta^2) \right]}{\beta^2 - \lambda^2 + \frac{\lambda^2(1 + \mu) - 1}{(1 - \lambda^2)(\lambda^2 - \beta^2) + \mu\lambda^2\beta^2} 4\lambda^2\beta^2\xi_2^2} \right\} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{out},\alpha \rightarrow \infty} = 0, \eta_{\alpha \rightarrow \infty} = 0, \\ \frac{\bar{P}_{d,\alpha \rightarrow \infty}}{X_{st}^2} = \frac{\bar{P}_{\text{in},\alpha \rightarrow \infty}}{X_{st}^2} = \mu \lambda^2 K_{2,\alpha \rightarrow \infty}^2 \beta \xi_2 = \frac{\lambda \left| -\sin \varphi_{1,\alpha \rightarrow \infty} \right|}{2} K_{1,\alpha \rightarrow \infty} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Trong trường hợp này, điện áp ngắn mạch $v_{0,\alpha \rightarrow \infty} = 0$, thì các phương trình (3.75)-(3.77) trở về các phương trình của kết cấu chính không cản gấn TMD cơ học, và các biểu thức (4.23), (4.24) có dạng giống với hệ số khuếch đại của hệ đó [84], [85], và nếu $\kappa^2 = 0$ thì β, ξ_2 bằng các hệ số tối ưu $\beta_{\text{DH}}, \xi_{2\text{DH}}$ của TMD cơ học tương ứng được cho bởi (3.119). Phương trình (4.26) cho thấy công suất đầu ra trung bình bằng 0 khi $v_{0,\alpha \rightarrow \infty} = 0$, dẫn đến hiệu suất cũng bằng 0. Các đẳng thức trong (4.26) có thể được chứng minh bằng cách sử dụng hệ thức lượng giác, điều này có nghĩa là công suất đầu vào trung bình được phân phối đầy đủ cho công suất tiêu tán trung bình trên mỗi chu kỳ.

Đối với điều kiện hở mạch, tải điện trở $R \rightarrow \infty, \alpha \rightarrow 0$, từ (3.91), (3.92), (3.93), (3.94), (4.16) ta có:

$$K_{1,\alpha \rightarrow 0} = \sqrt{\frac{[\beta^2(1+\kappa^2) - \lambda^2]^2 + 4\lambda^2\beta^2\xi_2^2}{\left\{ (1-\lambda^2)[\beta^2(1+\kappa^2) - \lambda^2] - \mu\lambda^2\beta^2(\kappa^2+1) \right\}^2 + 4\lambda^2[\lambda^2(1+\mu) - 1]^2\beta^2\xi_2^2}} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} K_{2,\alpha \rightarrow 0} = v_{0,\alpha \rightarrow 0} = \\ = \frac{\lambda^2}{\sqrt{\left\{ (1-\lambda^2)[\beta^2(1+\kappa^2) - \lambda^2] - \mu\lambda^2\beta^2(\kappa^2+1) \right\}^2 + 4\lambda^2[\lambda^2(1+\mu) - 1]^2\beta^2\xi_2^2}} \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\varphi_{1,\alpha \rightarrow 0} = \text{atan} \left\{ \frac{2\mu\lambda^5\beta\xi_2}{\left[\lambda^2 - 1 + \frac{\mu\lambda^2\beta^2(1+\kappa^2)}{\beta^2(1+\kappa^2) - \lambda^2} \right] [\beta^2(1+\kappa^2) - \lambda^2]^2 + 4\lambda^2[\lambda^2(1+\mu) - 1]\beta^2\xi_2^2} \right\} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{out},\alpha \rightarrow 0} = 0, \eta_{\alpha \rightarrow 0} = 0, \\ \frac{\bar{P}_{d,\alpha \rightarrow 0}}{X_{st}^2} = \frac{\bar{P}_{\text{in},\alpha \rightarrow 0}}{X_{st}^2} = \mu \lambda^2 \beta \xi_2 K_{2,\alpha \rightarrow 0}^2 = \frac{\lambda \left| -\sin \varphi_{1,\alpha \rightarrow 0} \right|}{2} K_{1,\alpha \rightarrow 0} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Trong trường hợp này, công suất đầu ra trung bình $\bar{P}_{\text{out},\alpha \rightarrow 0} = 0$ nhưng điện áp mạch hở khác 0. Về mặt vật lý, điện áp mạch hở là điện áp nguồn trên PSEH. Từ

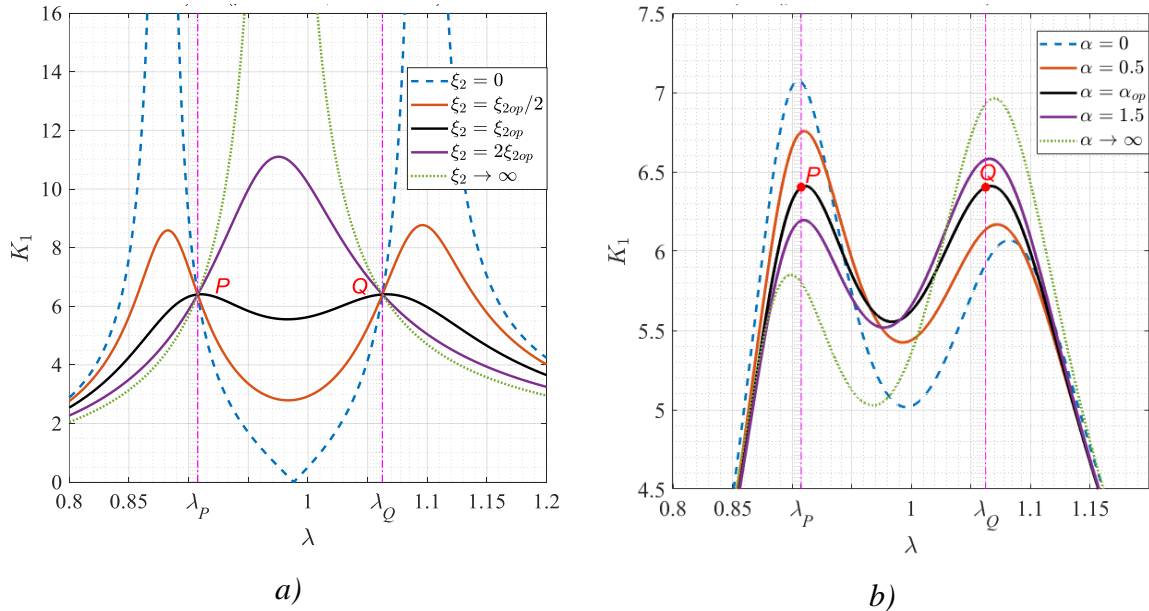
(4.27), (4.28) cho thấy hệ số cơ điện vẫn ảnh hưởng đến hệ số khuếch đại của các đáp ứng cơ học. Nếu $\kappa^2 \rightarrow 0$, thì $K_{1,\alpha \rightarrow 0} = K_{1,\alpha \rightarrow \infty}, K_{2,\alpha \rightarrow 0} = K_{2,\alpha \rightarrow \infty}$. Tương tự như trường hợp ngắn mạch, công suất đầu vào trung bình được phân phối đầy đủ đến công suất tiêu tán trung bình trên mỗi chu kỳ như trong (4.30).

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 cần 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 năm đường cong $K_1(\lambda)$ với năm giá trị của hệ số cản ξ_2 đó là $\xi_2 = 0, \xi_2 = \xi_{2op}/2, \xi_2 = \xi_{2op}, \xi_2 = 2\xi_{2op}, \xi_2 \rightarrow \infty$. 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. Tọa độ của P và Q lần lượt là P(0.908;6.403) và Q(1.062;6.403), rất gần với hai đỉnh bên trái có tọa độ (0.91;6.408) và đỉnh phải có tọa độ (1.067;6.407).



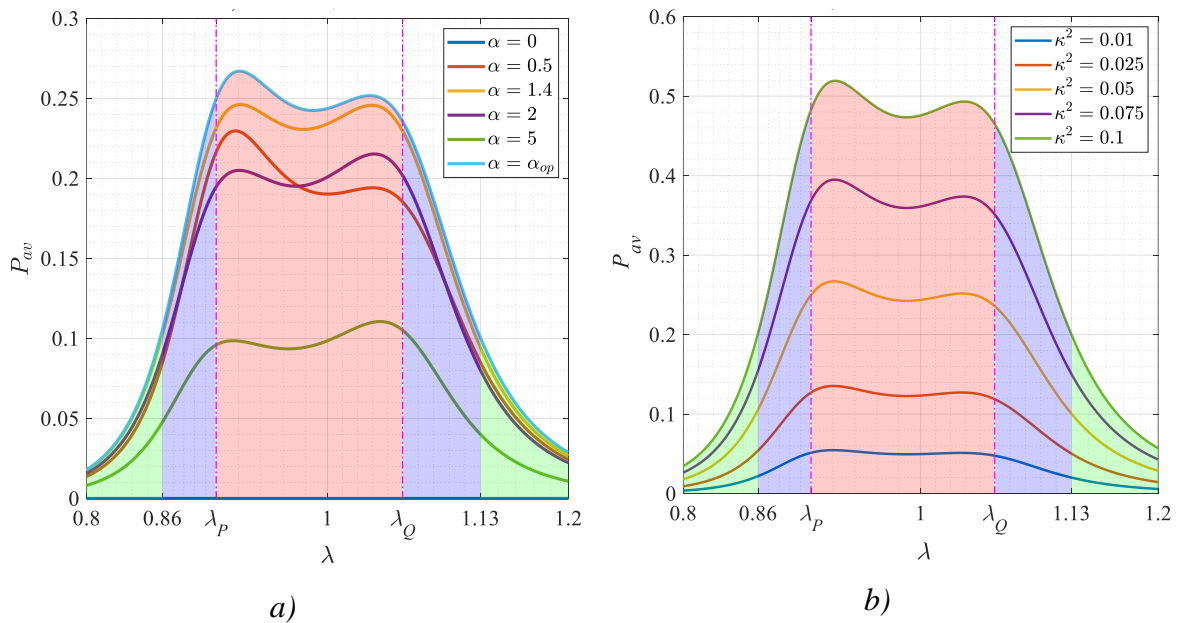
Hình 4.1 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của kết cấu chính theo biến λ

a) Khi ξ_2 thay đổi, b) Khi α thay đổi

Hình 4.1b mô tả các đường cong $K_1(\lambda)$ với và năm giá trị của α . Trường hợp này tương ứng với việc điều chỉnh điện trở ngoài R khi sử dụng TMD-

PSEH. Ta thấy rằng, đường cong với $\alpha = \alpha_{op}$ có các đỉnh thấp nhất so với các đường cong với các giá trị khác của α như $\alpha = 0.5 < \alpha_{op}, \alpha = 1.5 > \alpha_{op}, \alpha = 0$ (mạch hở, $R \rightarrow \infty$) và $\alpha \rightarrow \infty$ (ngắn mạch, $R = 0$). Khi $\alpha \neq \alpha_{op}$ thì các đường cong tương ứng có hai đỉnh và một trong số chúng luôn cao hơn hai đỉnh của đường cong $\alpha = \alpha_{op}$. Tọa độ của đỉnh cao nhất bên trái liên quan đến mạch hở là (0.905;7.075), tọa độ của đỉnh cao nhất bên phải liên quan đến ngắn mạch là (1.07;6.964).

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 . Đường cong $P_{av}(\lambda)$ cũng có hai đỉnh, và 2 đỉnh này có cùng độ cao khi $\alpha = 1.4$, đỉnh bên trái luôn cao hơn đỉnh bên phải khi $\alpha < 1.4$, và ngược lại với $\alpha > 1.4$. Tại các điều kiện mạch hở $\alpha = 0$ và ngắn mạch $\alpha \rightarrow \infty$ thì hệ thống không tạo ra công suất đầu ra. Rõ ràng, đường cong với $\alpha = 1 = \alpha_{op}$ có tung độ P_{av} là lớn nhất so với các giá trị còn lại, thể hiện năng lượng thu thập được lớn nhất trong một khoảng thời gian.



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 4.2b 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. Giá trị lớn nhất của P_{av} chủ yếu

xảy ra ở các đỉnh bên trái. Biên độ của P_{av} trong miền cộng hưởng $0.86 \leq \lambda \leq 1.13$, đặc biệt là trong miền cộng hưởng chính $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_Q$ thì cao hơn nhiều so với biên độ bên ngoài miền cộng hưởng.

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. Quá trình khảo sát sẽ bắt đầu từ các phương trình (3.70)-(3.72) để đánh giá hiệu suất của hệ thống về mặt lý thuyết. Các tham số ban đầu được lấy là $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.05$, từ đó các tham số dùng để khảo sát được tính toán như trong Bảng 4.1.

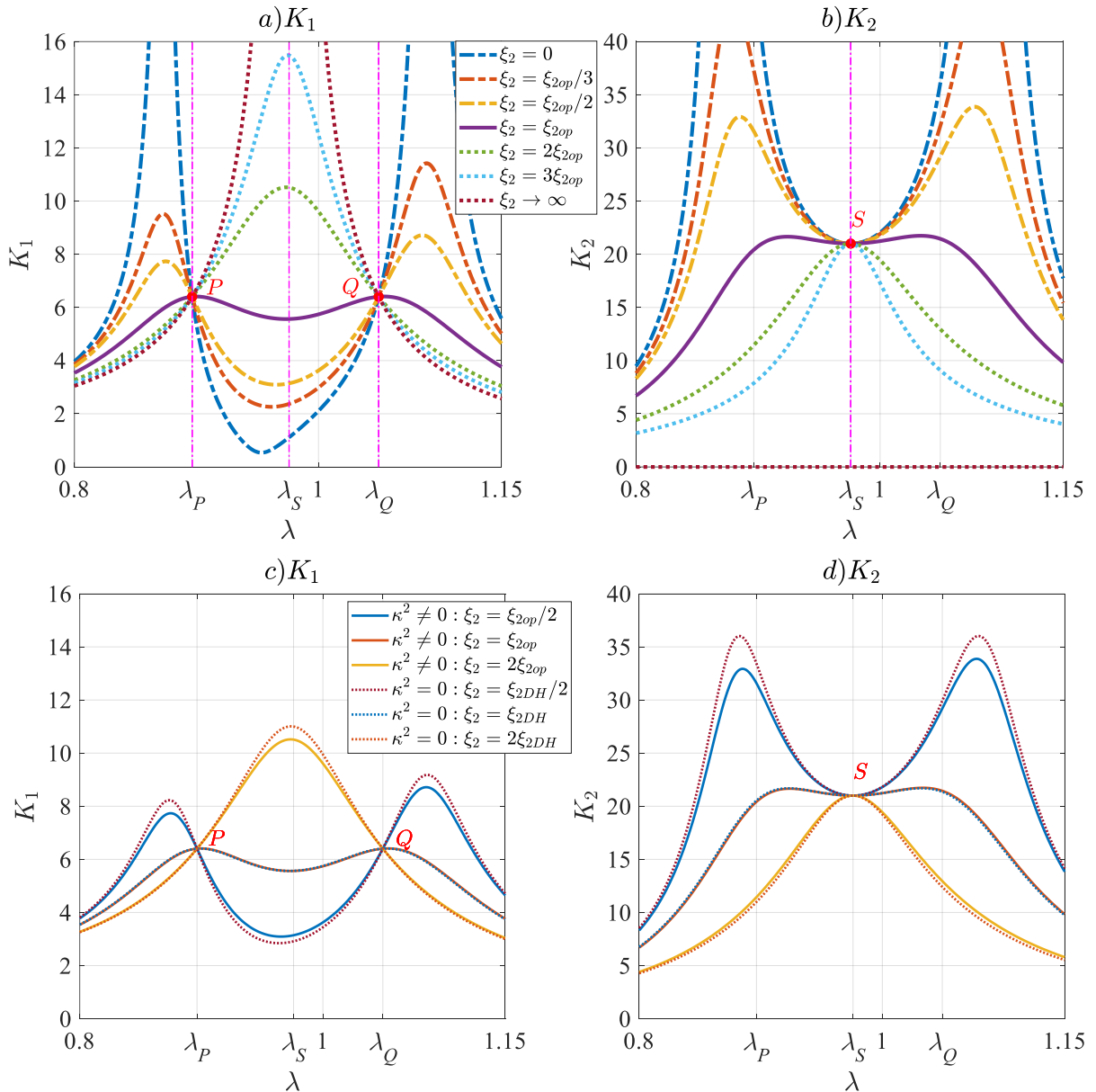
Bảng 4.1 Các thông số tính toán của hệ kết cấu chính không cản lắp TMD-PSEH chịu kích động ngoài với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.05$

Tham số	Giá trị	Công thức	Tham số	Giá trị	Công thức
λ_p	0.8965	(3.105)	β_{op}	0.9407	(3.117)
λ_Q	1.0493	(3.105)	ξ_{2op}	0.1232	(3.117)
$K_{1p} = K_{1Q}$	0.9759	(3.106)	β_{DH}	0.9524	(3.119)
λ_s	6.403	(4.19)	ξ_{DH}	0.1336	(3.119)
K_{2s}	21	(4.20)			

Qua bảng 4.1 ta có thể thấy rằng $\beta_{op} < \beta_{DH}$ như được trình bày bởi (3.107), cũng như $\xi_{2op} < \xi_{DH}$. Cụ thể là β_{op} giảm 1,23 % so với β_{DH} và ξ_{2op} giảm 7,78 % so với ξ_{DH} . Tiếp theo, các phân tích về hiệu quả giảm rung và khả năng thu thập năng lượng sẽ được thực hiện trong đó các ảnh hưởng của ξ_2, κ^2, α sẽ lần lượt được xem xét cùng với trực tần số.

Hình 4.3a,b mô tả hệ số khuếch đại K_1, K_2 được đưa ra bởi các phương trình (3.92), (3.93) 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 $S(\lambda_s, K_{2s})$. Sự khác biệt giữa tọa độ

của hai điểm cố định P và Q so với hai đỉnh của đường cong $K_1(\xi_2 = \xi_{2op})$ là rất nhỏ và có thể bỏ qua. Khi $\xi_2 < \xi_{2op}$ thì hai đỉnh này cao hơn K_{1P}, K_{1Q} . Nếu $\xi_2 > \xi_{2op}$ thì hai đỉnh này sẽ trở thành một và đỉnh đơn này sẽ lại cao hơn nữa. Do đó, 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.



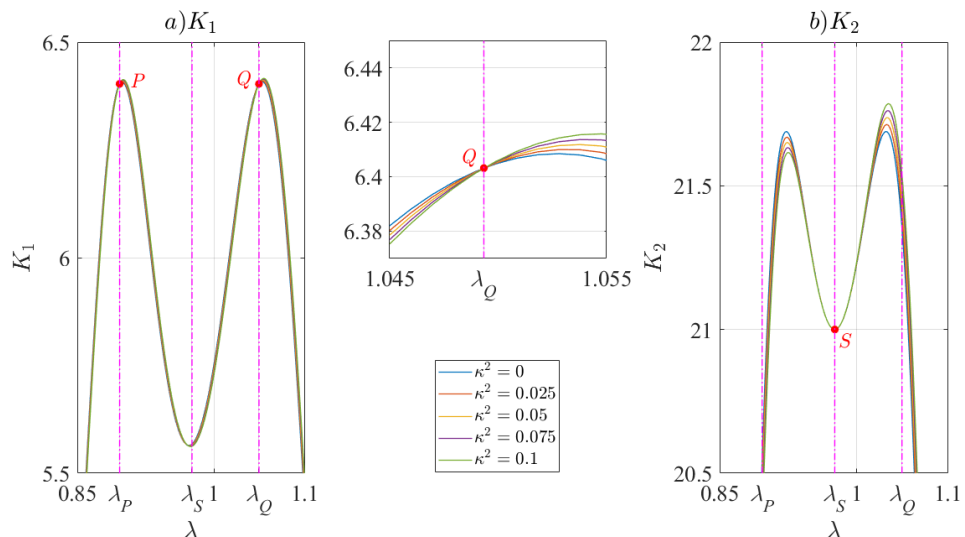
Hình 4.3 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của hệ theo biến λ

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) $K_2(\kappa^2 = 0)$

Tương tự, đường cong K_2 cũng có hai đỉnh với chiều cao gần bằng nhau xuất hiện ở vùng lân cận của λ_p, λ_Q . Hai đỉnh này cao hơn điểm K_{2S} khi ξ_2 là nhỏ và sẽ trở thành một đỉnh duy nhất trùng với điểm cố định S. Hai trường hợp tới hạn là $\xi_2 = 0$ (không giảm chấn) và $\xi_2 \rightarrow \infty$ (giảm chấn vô hạn, hay tương đương là hai khối lượng dao động “lồng vào nhau”) dẫn đến các đỉnh của K_1 có xu hướng tăng lên vô hạn, trong khi các đỉnh của K_2 có xu hướng tiến tới vô hạn trong trường hợp $\xi_2 = 0$ và có xu hướng bằng 0 trong trường hợp $\xi_2 \rightarrow \infty$. Vì các đỉnh của K_2 có biên độ cao hơn nhiều so với biên độ của K_1 , điều này cho thấy rằng dao động của khối lượng m_1 gây ra bởi sự kích thích bên ngoài thì bị triệt tiêu và chuyển thành các dao động khác, chẳng hạn như dao động của khối lượng m_2 .

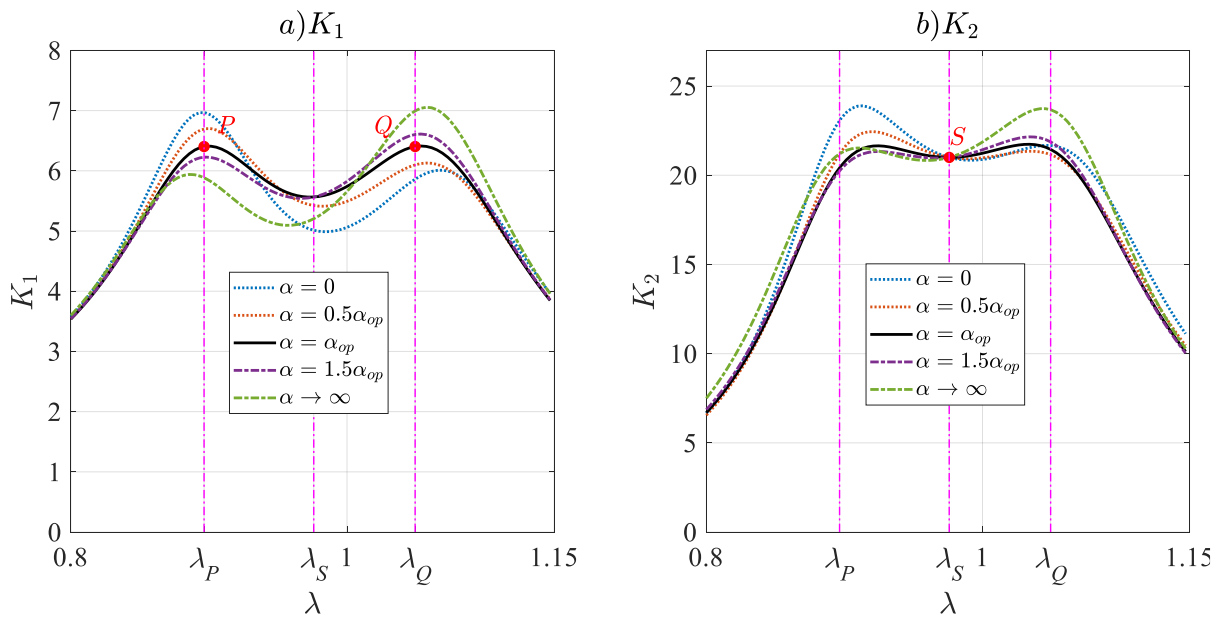
Ngoài ra, khi so sánh với kết cấu chính không cản trở tương tự lắp một TMD cơ học tối ưu (tức là khi $\kappa^2 = 0, \beta_{op} = \beta_{DH}, \xi_{2op} = \xi_{DH}$), như được minh họa trong Hình 4.3c và Hình 4.3d. Qua đồ thị ta thấy rằng các đường cong K_1 và K_2 của TMD-PSEH thì khác với các đường cong 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 . Ngoài ra, tọa độ của các điểm cố định P, Q và S đều giống nhau trong cả hai trường hợp.



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 4.4 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 $S(\lambda_s, K_{2s})$

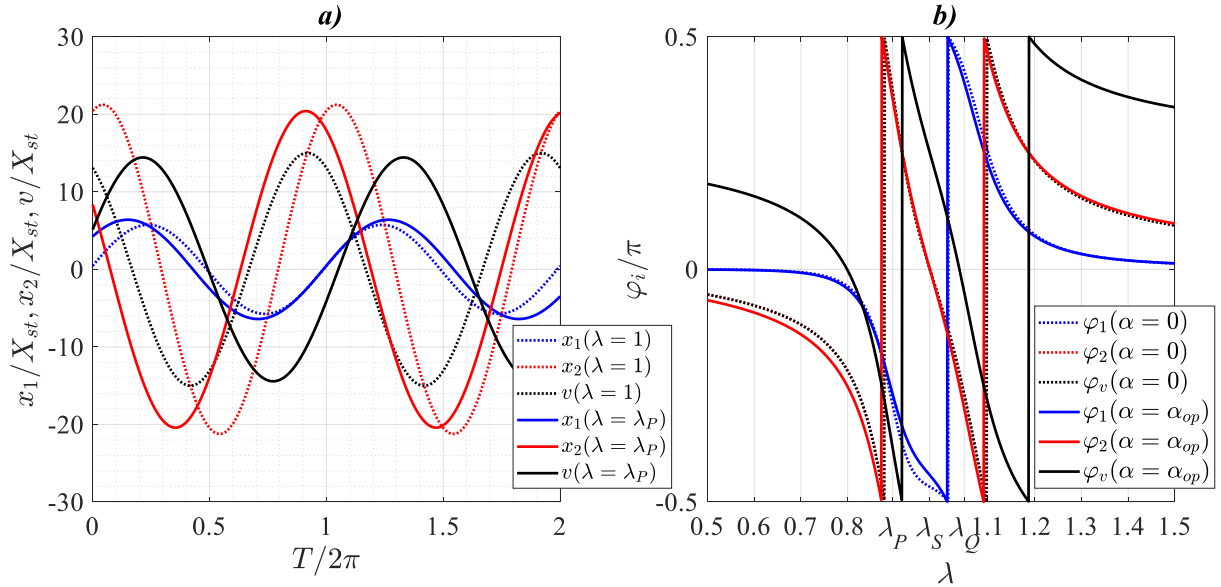


Hình 4.5 Đồ thị mô tả hệ số khuếch đại biên độ dao động của hệ theo biến λ

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 . Qua đồ thị ta có thể 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. Cụ thể, khi $\alpha < \alpha_{op}$ thì đỉnh bên trái của K_1, K_2 cao hơn đỉnh bên phải và đạt mức cao nhất khi $\alpha = 0$, và ngược lại khi $\alpha > \alpha_{op}$ thì đỉnh bên phải của chúng đạt mức cao nhất khi $\alpha \rightarrow \infty$. Ta có thể quan sát thấy rằng điểm cố định $S(\lambda_s, K_{2s})$ của K_2 thì độc lập với α , trong khi K_1 không có điểm cố định.



Hình 4.6 Đồ thị mô tả đáp ứng của chuyển vị và điện áp

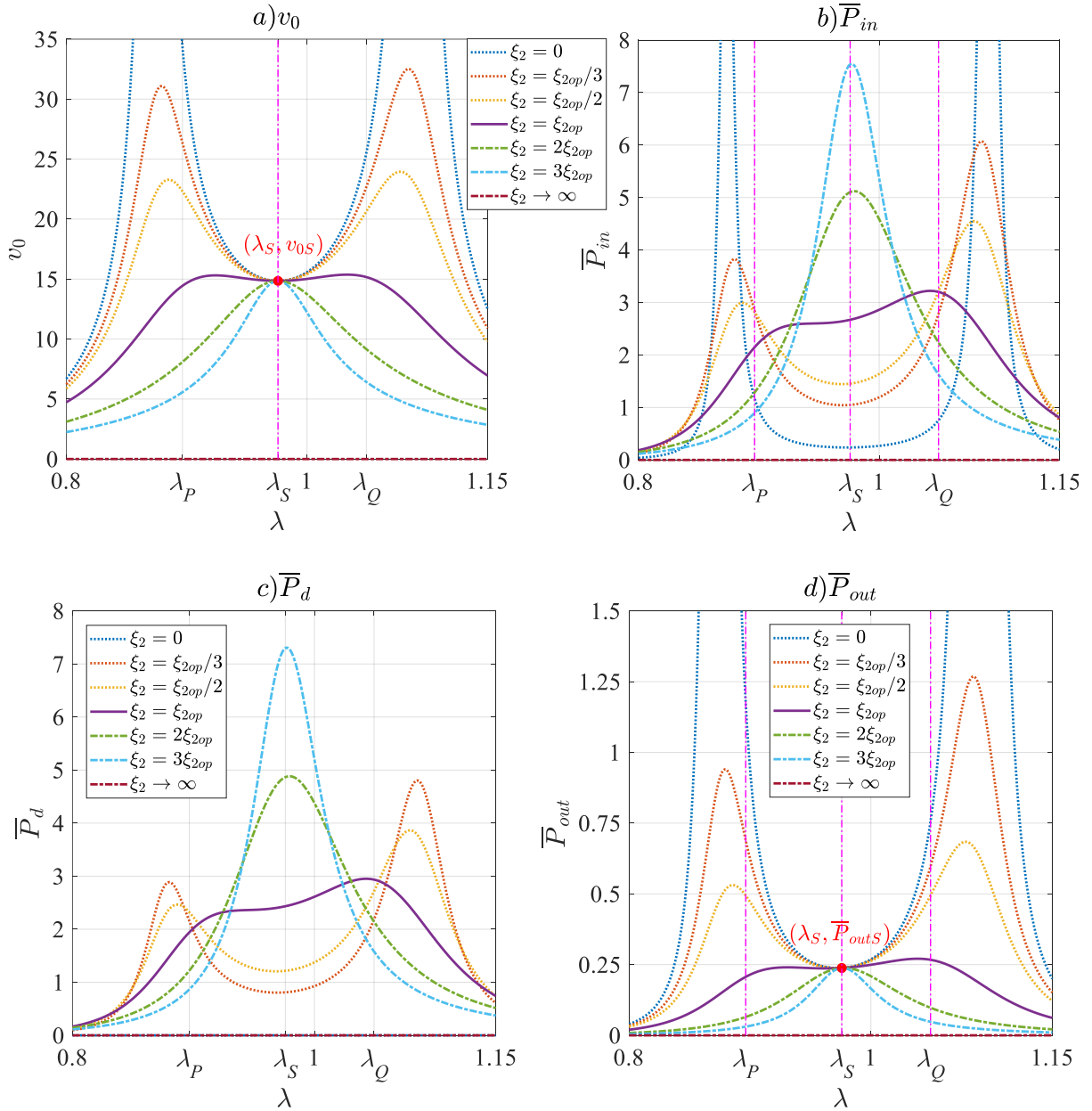
a chuyển vị và điện áp theo biến thời gian, b) biểu đồ pha theo tần số thay đổi

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 $2\pi/\lambda$. Bên cạnh đó, tỷ lệ biên độ dịch chuyển a_2 đối với a_1 là $21.2/5.8 = 3.7$ với $\lambda = 1$ thì lớn hơn tỷ lệ tại hai điểm cố định là $20.4/6.4 = 3.19$ đối với $\lambda = \lambda_p$.

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 $\alpha = [0, \alpha_{op}]$, trong đó $\alpha = 0$ (điều kiện mạch hở) liên quan đến biên độ điện áp cao nhất. Các đường cong $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_v$ tương ứng với các đường nét đứt khi $\alpha = 0$, và tương ứng với các đường liền khi $\alpha = \alpha_{op}$. Trước và sau vùng cộng hưởng, vùng cộng hưởng tương ứng với $\lambda \in [0.8, 1.2]$, thì cả hai giá trị của α và x_1 có xu hướng giữ nguyên pha với kích động, tức là $\varphi_1 \rightarrow 0$ khi $\lambda \rightarrow 0$ hoặc $\lambda \rightarrow \infty$, trong khi x_2 và v có một pha dẫn trước vùng cộng hưởng nhưng có một pha trễ sau miền này. Thật vậy, φ_2 trùng khớp với φ_v khi $\alpha = 0$. Khi $\alpha = \alpha_{op}$, v có độ trễ pha nằm ngoài vùng cộng hưởng. Trong vùng cộng hưởng, x_1 chỉ có một độ lệch pha, trong khi x_2 và v có hai độ lệch pha. Tất cả các độ lệch pha đều xấp xỉ π , nhưng chúng xảy ra ở các tần số khác nhau. Vì vậy, luôn có độ lệch pha lớn giữa x_1 và x_2 . Sự lệch pha như vậy tạo ra sự tiêu tán năng lượng lớn do lực quán tính của TMD-PSEH gây ra.

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

Như đã đề cập ở phần trước, đáp ứng điện v và đáp ứng cơ x_2 có đặc tính giống nhau về pha. Từ các phương trình (3.93), (3.94), mối quan hệ của chúng về biên độ là $v_0 = K_2 / \sqrt{1 + \alpha^2}$. Điều này có nghĩa là v_0 tỷ lệ tuyến tính với K_2 .

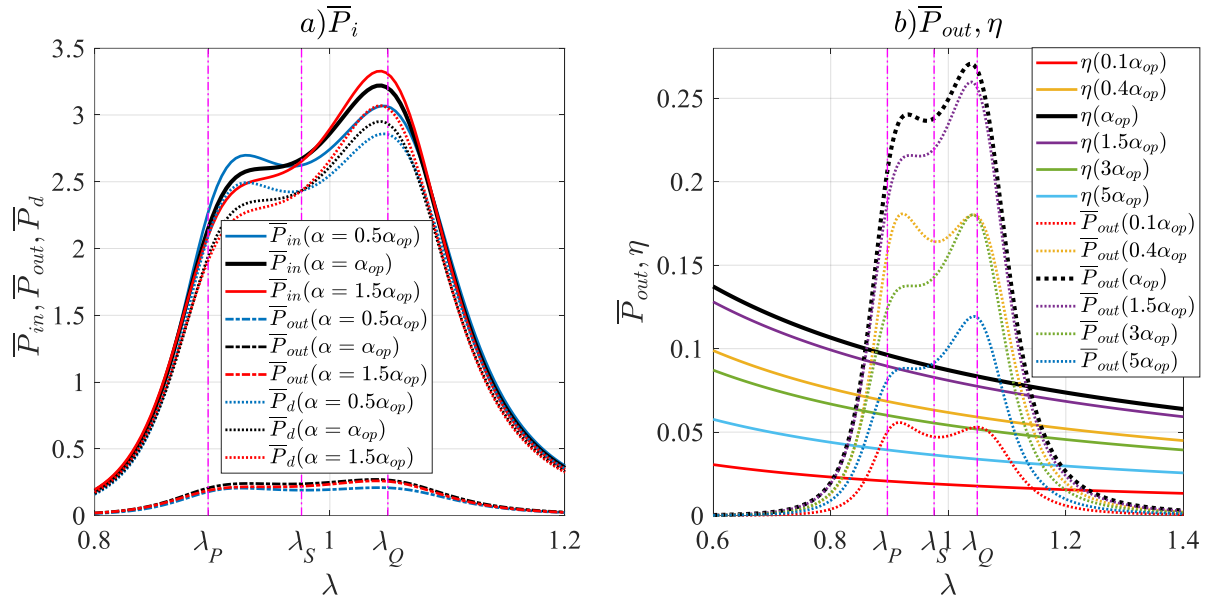


Hình 4.7 Đồ thị mô tả biên độ điện áp và công suất trung bình trong một chu kỳ theo biến λ với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.05, \alpha = \alpha_{op}, X_{st}^2 = 1$ và ξ_2 thay đổi

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

Tiếp theo, 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 được cho bởi các phương trình (4.16), (4.17), (4.18). Rõ ràng rằng v_0 và \bar{P}_{out} có một điểm cố định không phụ thuộc vào hệ số cản ở $\lambda = \lambda_s$ mà tại đó tọa độ được cho bởi (4.20), 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 . Hai đỉnh này cao hơn v_{0s} và \bar{P}_{outS} khi ξ_2 là nhỏ và sẽ trở thành một với một đỉnh duy nhất trùng với điểm cố định tại $\lambda = \lambda_s$. Trong khi đó, các đường cong của \bar{P}_{in} và \bar{P}_d cũng có hai đỉnh xuất hiện xung quanh λ_p, λ_Q . Khi $\xi_2 < \xi_{2op}$, hai đỉnh này cao hơn đỉnh ở $\xi_2 = \xi_{2op}$, còn nếu $\xi_2 > \xi_{2op}$ thì chúng sẽ trở thành một và đỉnh đơn này sẽ cao hơn. Tính chất này giống với đặc tính của đường cong K_1 , ngoại trừ đỉnh bên trái của \bar{P}_{in} , cũng như của \bar{P}_d , thì thấp hơn nhiều so với đỉnh bên phải. 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 triệt tiêu rung động cho kết cấu chính.

Ngoài ra, như đã đề cập trước đó trong Mục 3 và 4.2, ta có thể điều chỉnh tỷ lệ điện trở α để đạt được công suất đầu ra cực đại cục bộ, như minh họa trong Hình 4.8. 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 . So với các đỉnh của đường cong tương ứng với $\alpha = \alpha_{op}$ thì đỉnh bên phải của \bar{P}_{in}, \bar{P}_d thấp hơn và đỉnh bên trái thì cao hơn khi $\alpha < \alpha_{op}$ và ngược lại khi $\alpha > \alpha_{op}$. Thuộc tính này tương tự như của K_1 trong Hình 4.5.



Hình 4.8 Đồ thị mô tả công suất trung bình và hiệu suất theo biến λ

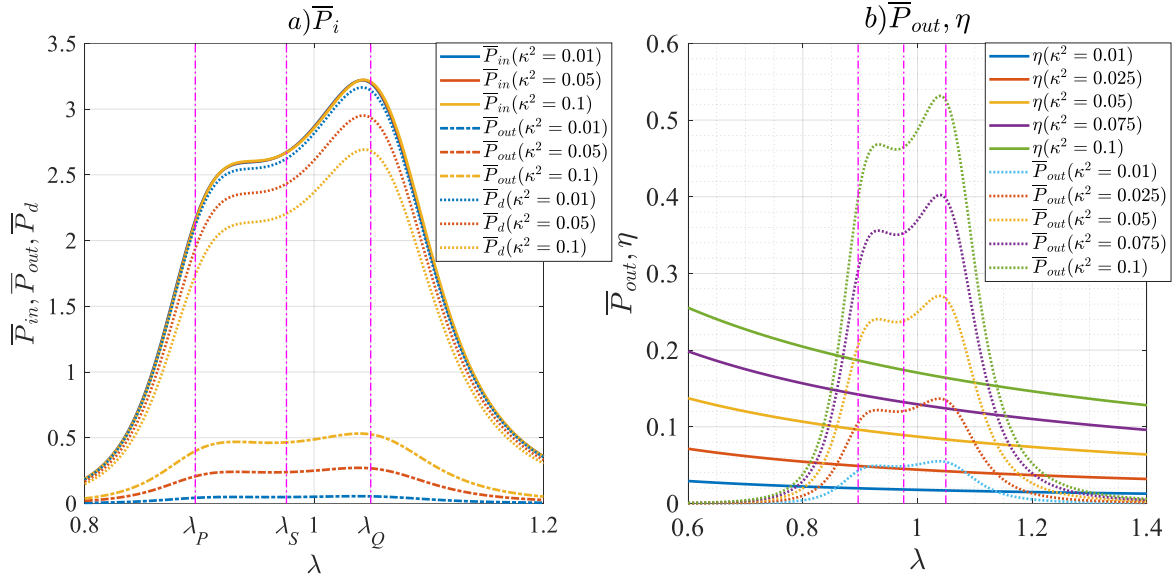
với $\kappa^2 = 0.05, \mu = 0.05, X_{st}^2 = 1$ và α thay đổi

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

Hình 4.8b minh họa mối liên hệ giữa công suất đầu ra trung bình \bar{P}_{out} và hiệu suất η được cho bởi biểu thức (4.21) 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 $\alpha = 0.4\alpha_{op}$. Khi $\alpha > 0.4\alpha_{op}$ thì đỉnh bên phải luôn cao hơn đỉnh bên trái và ngược lại 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 . Đáng chú ý là bên ngoài vùng cộng hưởng ($\lambda < 0.8$ và $\lambda > 1.2$) thì công suất \bar{P}_{out} giảm đáng kể. Đồng thời, đường cong hiệu suất tương ứng với $\alpha = \alpha_{op}$ cũng là đường nằm trên cùng khi so sánh với các giá trị khác của α .

Bất 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. Ví dụ, tại $\lambda = \lambda_Q$, khi κ^2 tăng gấp đôi, từ $\kappa^2 = 0.05$ lên $\kappa^2 = 0.1$, các giá trị của \bar{P}_{out} và η cũng tăng gần gấp đôi, từ 0.2679 lên 0.5273 và từ 8.4% lên 16.4%. 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 cho 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. Các thông số dùng để khảo sát được trình bày như trong Bảng 4.2, Bảng 4.3 và Bảng 4.4.

Hình 4.10a và Hình 4.10b lần lượt mô tả các đường cong của hệ số khuếch đại chuyển vị kết cấu chính K_1 và hệ số biên độ điện áp v_0 trong miền tần số λ .

Bảng 4.2 Các thông số của cụm áp điện kiểu xếp chồng [68]

Tham số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
Độ cứng	$k_{p,i}$	5.8×10^7	N/m
Hệ số kết nối cơ điện	$\theta_{p,i}$	8.41	N/V
Điện dung	$C_{p,i}$	1.6×10^{-6}	F

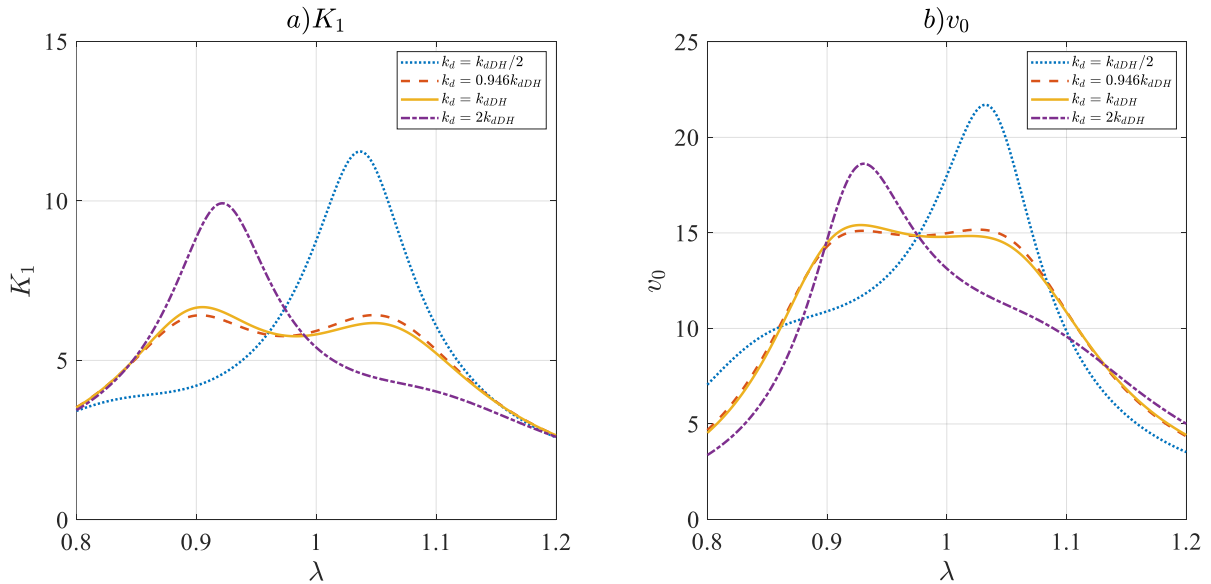
Bảng 4.3 Các thông số đầu vào của khung khuếch đại lực

Tham số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
Tỉ lệ khối lượng	μ	0.05	
Độ cứng lò xo của kết cấu chính	k_1	$1\% k_{p,i}$	N/m
Góc kết cấu của khung khuếch đại chính bao ngoài [124]	φ	$\pi / 30$	rad
Góc kết cấu của khung khuếch đại đơn bên trong [124]	φ_i	$\pi / 30$	rad
Số khung khuếch đại đơn	N	2	
Hệ số tỷ số điện trở	α	1	

Bảng 4.4 Các tham số tính toán khác

Tham số	Giá trị	Công thức tham chiếu	Tham số	Giá trị	Công thức tham chiếu
k_d (N/m)	1.2022×10^5	(3.147)	C_{eq} (F)	8.28×10^{-6}	(2.84)
k_{eq} (N/m)	2.6304×10^4	(2.84)	β	0.9524	(3.144)
θ_{eq} (N/V)	0.0726	(2.84)	κ^2	0.0242	(3.136)

Ảnh hưởng của độ cứng lò xo k_d của TMD tới K_1 được minh họa trong Hình 4.10a với bốn giá trị khác nhau của k_d , trong đó k_{dDH} được đưa ra bởi phương trình (3.147). 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 $k_d = k_{dDH} / 2$, $k_d = k_{dDH}$, và $k_d = 2k_{dDH}$. Do đó, các hệ số tỷ số tần số và giảm chấn tối ưu được đưa ra từ các phương trình (3.144), (3.145) rút ra từ kết quả của Den Hartog không đảm bảo đường cong K_1 được tối ưu. Trong khi đó, chúng ta có thể tối ưu K_1 bằng cách thay đổi giá trị của k_d theo kinh nghiệm, chẳng hạn như $k_d = 0.946k_{dDH}$, giá trị đó nhỏ hơn k_{dDH} . Khi đó, tọa độ của các đỉnh bên trái và bên phải tương ứng lần lượt là $(0.904; 6.414)$ và $(1.052; 6.414)$.

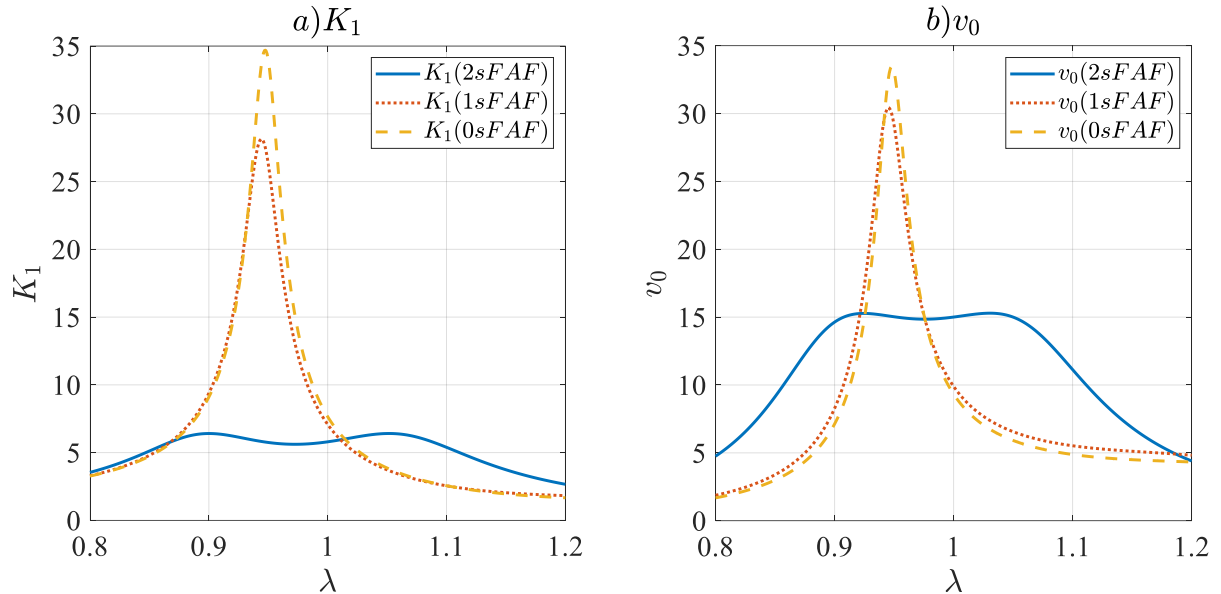


Hình 4.10 Đồ thị K_1, v_0 theo biến λ với $\mu = 0.05, \kappa^2 = 0.0242, \alpha = 1$ và k_d thay đổi

a) K_1 , b) v_0

Thoạt nhìn, đường cong v_0 có các đặc tính giống như đường cong K_1 , như trong Hình 4.10b. Với giá trị $k_d = 0.946k_{dDH}$, đường cong v_0 gần như được tối ưu hóa, cụ thể là hai đỉnh có tọa độ lần lượt là $(0.927; 15.11)$ và $(1.034; 15.14)$. 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 $k_d = 0.946k_{dDH}$.

Độ cứng của lò xo TMD và biên độ điện áp trong ba trường hợp riêng biệt: TMD-PSEH không có FAF, TMD-1sFAF và TMD-2sPSFAF được thể hiện trong đồ thị Hình 4.11.



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 có 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. Hơn nữa, chúng ta có thể quan sát từ Hình 4.11b rằng 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 tối ưu 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 tự nhiên β_{op} , hệ số giảm chấn ξ_{2op} và tỷ số điện trở α_{op} . Các biểu thức giải tích của β_{op}, ξ_{2op} cho thấy sự phụ thuộc rõ ràng vào hai tham số không đổi là tỷ lệ khối lượng μ và hệ số ghép cơ điện κ^2 khi $\alpha_{op} = 1$;

- 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, vol 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>.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Huicong Liu, Junwen Zhong, Chengkuo Lee, Seung-Wuk Lee, Liwei Lin, 2018, *A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications*, Applied physics reviews, vol. 5, 041306.
- [2] Muhamad Faizal Yaakub, Mohd Farriz Basar, Muhammad Sharil Yahaya, Faridah Hanim Mohd Noh, Hanis Zafirah Kamarudin, 2017, *A micro-power generation from rain shower utilizing PZT and PVDT piezoelectric transducer*, ARPN journal of engineering and applied sciences.
- [3] Kok Bc, Hui Hwang Goh, 2014, *Modelling and design analyses of a piezoelectric cymbal transducer (PCT) structure for energy harvesting application*, WIT Transactions on Ecology and the Environment, vol. 186, p. 103-114.
- [4] Michael Goldfarb, Nikola Celanovic, 1997, *Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation*, IEEE control systems.
- [5] T. B. Xu, E. J. Siochi, J. H. Kang, L. Zuo, W. Zhou, X. Tang, X. Jiang, 2013, *Energy harvesting using a PZT ceramic multilayer stack*, Smart Mater. Struct. Vol. 22(6), 065015.
- [6] Plinio Guzman, Wusi Chen, Ya Wang, Lei Zuo, 2015, *Design and testing of amplification frame for piezoelectric energy harvester*, <https://sbyireview.com>.
- [7] De Jong PH, de Boer A, Loendersloot R, et al., 2013, *Power harvesting in a helicopter rotor using a piezo stack in the lag damper*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 24(11), p. 1392–1404.
- [8] Zhao S and Erturk A (2014) *Deterministic and band-limited stochastic energy harvesting from uniaxial excitation of a multilayer piezoelectric stack*. Sensors and Actuators A: Physical, vol. 214, p. 58–65.
- [9] Feenstra J, Granstrom J and Sodano H, 2008, *Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 22(3), p. 721–734.
- [10] Xu T, Jiang X and Su J, 2011, *A piezoelectric ceramic multilayer-stacked hybrid actuation/transduction system*, Applied Physics Letters, vol. 98(24): 243503.

- [11] Zhou W and Zuo L, 2013, *A novel piezoelectric multilayer stack energy harvester with force amplification*, In: Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences, Portland, OR, 4–7 August.
- [12] Y. Wang, W. Chen, P. Guzman, 2016, *Piezoelectric stack energy harvesting with a force amplification frame*, Modeling and experiment. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 27(17), p. 2324–2332.
- [13] Secord TW, Mazumdar A and Asada H, 2010, *A multi-cell piezoelectric device for tunable resonance actuation and energy harvesting*, In: Proceedings of the IEEE International Conference on robotics and automation, Anchorage, AK, 3–7 May, p. 2169–2176. New York: IEEE
- [14] Liu J, O’Connor W, Ahearne E, et al., 2014, *Electromechanical modeling for piezoelectric flextensional actuators*. Smart Materials and Structure, 23: 025005.
- [15] Y. Kuang, Z. J. Chew, J. Dunville, J. Sibson, M. Zhu, 2021, *Strongly coupled piezoelectric energy harvesters: Optimised design with over 100 mW power, high durability and robustness for self-powered condition monitoring*, Energy Conversion and Management, vol. 237, 114129.
- [16] Huicong Liu, Junwen Zhong, Chengkuo Lee, Seung-Wuk Lee, Liwei Lin, 2018, *A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications*, Applied physics reviews 5, 041306.
- [17] T. Starner, 1996, *Human-powered wearable computing*, IBM Systems Journal, vol. 35, Issue 3.4, pp. 618-629.
- [18] T. Starner and J. Paradiso,, 2004, *Low Power Electronics Design*, CRC Press, New York, chap.45.
- [19] S. Khalifa, G. Lan, M. Hassan, A. Seneviratne, and S. K. Das, 2018, *Human-powered wearable computing*, IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 17(6), pp. 1353–1368.
- [20] J. L. Gonzalez, A. Rubio, and F. Moll, 2002, *Human Powered Piezoelectric Batteries to Supply Power to Wearable Electronic Devices*, International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources,

- vol. 10 (1), pp. 34–40.
- [21] P. Niu, P. Chapman, R. Riemer, and X. Zhang, 2004, *paper presented at the 35th Annual Power Electronics Specialists Conf.*, pp. 2100–2106.
- [22] N.S. Shenck and J.A. Paradiso, 2001, *Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics*, IEEE Micro, vol. 21(3), pp. 30–42.
- [23] K. Ishida, T. C. Huang, K. Honda, Y. Shinozuka, H. Fuketa, T. Yokota, U. Zschieschang, H. Klauk, G. Tortissier, T. Sekitani, H. Toshiyoshi, M. Takamiya, T. Someya, and T. Sakurai, 2013, *Insole Pedometer With Piezoelectric Energy Harvester and 2 V Organic Circuits*, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 48(1), pp. 255–264.
- [24] J. Zhao and Z. You, 2014, *A Shoe-Embedded Piezoelectric Energy Harvester for Wearable Sensors*, Sensors, vol. 14(7), pp.12497–12510.
- [25] Y. Han, Y. Cao, J. Zhao, Y. Yin, L. Ye, X. Wang, and Z. You, 2016, *A Self-Powered Insole for Human Motion Recognition*, Sensors, vol. 16(9), 1502.
- [26] K. Fan, Z. Liu, H. Liu, L. Wang, Y. Zhu, and B. Yu, 2017, *Scavenging energy from human walking through a shoe-mounted piezoelectric harvester*, Appl. Phys. Lett. vol. 110(14), 143902.
- [27] W. S. Jung, M. J. Lee, M. G. Kang, H. G. Moon, S. K. Yoon, S. H. Baek, and C. Y. Kang, 2015, *Powerful curved piezoelectric generator for wearable applications*, Nano Energy, vol.13, pp. 174–181.
- [28] R. Shukla and A. J. Bell, 2015, *A novel energy harvesting concept for low frequency human waistline*, Sens. Actuators, vol. 222, pp. 39–47.
- [29] Y. Kuang, T. Ruan, J. C. Zheng, and M. Zhu, 2017, *Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node*, Sens. Actuators, vol. 254, pp. 69–77.
- [30] I. Izadgoshasb, Y. Y. Lim, N. Lake, L. Tang, R. V. Padilla, and T. Kashiwao, 2018, *Optimizing orientation of piezoelectric cantilever beam for harvesting energy from human walking*, Energy Convers. Manage. vol. 161, pp. 66–73.
- [31] Wang, Z. Shi, H. Xiang and G. Song, 2015, *Modeling on energy harvesting from a railway system using piezoelectric transducers*, Smart Materials and Structures, vol. 24 (2).

- [32] C. Sun, J. Shi, D. J. Bayerl, and X. Wang, 2011, *PVDF microbelts for harvesting energy from respiration*, *Energy Environ. Sci.* vol. 4(11), pp. 4508–4512.
- [33] H. Xue, Q. Yang, D. Wang, W. Luo, W. Wang, M. Lin, D. Liang, and Q. Luo, 2017, *A wearable pyroelectric nanogenerator and self-powered breathing sensor*, *Nano Energy*, vol. 38, pp. 147–154.
- [34] Q. Zheng, B. Shi, Z. Li, and Z. L. Wang, 2017, *Recent Progress on Piezoelectric and Triboelectric Energy Harvesters in Biomedical Systems*, *Adv. Sci.* vol. 4(7), 1700029.
- [35] S. H. Lee, C. K. Jeong, G.-T. Hwang, and K. J. Lee, 2015, *Self-powered flexible inorganic electronic system*, *Nano Energy*, vol. 14, pp. 111–125.
- [36] M. Kindermann, B. Schwaab, M. Berg, and G. Frohlig, 2001, *Longevity of Dual Chamber Pacemakers: Device and Patient Related Determinants*, *Pacing Clin. Electrophysiol.*, vol. 24(5), pp. 810–815.
- [37] J. C. Deharo and P. Djiane, 2005, *Pacemaker longevity: Replacement of the device*, *Ann. Cardiol. Angeiol.*, vol. 54(1), pp. 26–31.
- [38] V. R. Vorperian, S. Lawrence, and K. Chlebowski, *Pacing Clin.*, 1999, *Replacing Abdominally Implanted Defibrillators: Effect of Procedure Setting on Cost*, *Electrophysiol.*, vol. 22(5), pp. 698–705.
- [39] M. A. Wood and K. A. Ellenbogen, 2002, *Cardiac Pacemakers From the Patient's Perspective*, *Circulation*, vol. 105(18), pp. 2136–2138.
- [40] Q. Zheng, B. Shi, F. Fan, X. Wang, L. Yan, W. Yuan, S. Wang, H. Liu, Z. Li, and Z. L. Wang, 2014, *In Vivo Powering of Pacemaker by Breathing-Driven Implanted Triboelectric Nanogenerator*, *Adv. Mater.*, vol. 26(33), pp. 5851–5856.
- [41] Q. Zheng, H. Zhang, B. Shi, X. Xue, Z. Liu, Y. Jin, Y. Ma, Y. Zou, X. Wang, Z. An, W. Tang, W. Zhang, F. Yang, Y. Liu, X. Lang, Z. Xu, Z. Li, and Z. L. Wang, 2016, *In Vivo Self-Powered Wireless Cardiac Monitoring via Implantable Triboelectric Nanogenerator*, *ACS Nano*, vol. 10, pp. 6510–6518.
- [42] Y. Ma, Q. Zheng, Y. Liu, B. Shi, X. Xue, W. Ji, Z. Liu, Y. Jin, Y. Zou, Z. An, W. Zhang, X. Wang, W. Jiang, Z. Xu, Z. L. Wang, Z. Li, and H. Zhang, 2016, *Self-Powered, One-Stop, and Multifunctional Implantable*

- Triboelectric Active Sensor for Real-Time Biomedical Monitoring*, Nano Lett., vol. 16(10), pp. 6042-6051.
- [43] Z. Li, G. Zhu, R. Yang, A. C. Wang, and Z. L. Wang, 2010, *Muscle-Driven In Vivo Nanogenerator*, Adv. Mater., vol. 22(23), pp. 2534–2537.
- [44] X. Cheng, X. Xue, Y. Ma, M. Han, W. Zhang, Z. Xu, H. Zhang, and H. Zhang, 2016, *Implantable and self-powered blood pressure monitoring based on a piezoelectric thinfilm: Simulated, in vitro and in vivo studies*, Nano Energy., vol. 22, pp. 453–460.
- [45] Y. Yu, H. Sun, H. Orbay, F. Chen, C. G. England, W. Cai, and X. Wang, 2016, *Biocompatibility and in vivo operation of implantable mesoporous PVDF-based nanogenerators*, Nano Energy, vol. 27, pp. 275–281.
- [46] C. Dagdeviren, Y. Shi, P. Joe, R. Ghaffari, G. Balooch, K. Usgaonkar, O. Gur, P. L. Tran, J. R. Crosby, M. Meyer, Y. Su, R. Chad Webb, A. S. Tedesco, M. J. Slepian, Y. Huang, and J. A. Rogers, 2015, *Conformal piezoelectric systems for clinical and experimental characterization of soft tissue biomechanics*, Nat. Mater., vol. 14(7), p. 728-736.
- [47] G. T. Hwang, M. Byun, C. K. Jeong, and K. J. Lee, 2015, *Flexible Piezoelectric Thin-Film Energy Harvesters and Nanosensors for Biomedical Applications*, Adv. Healthcare Mater., vol. 4(5), p. 646-658.
- [48] H. Zhang, X.-S. Zhang, X. Cheng, Y. Liu, M. Han, X. Xue, S. Wang, F. Yang, A. S. Smitha, H. Zhang, and Z. Xu, 2015, *A flexible and implantable piezoelectric generator harvesting energy from the pulsation of ascending aorta: in vitro and in vivo studies*, Nano Energy, vol. 12, p. 296-304.
- [49] S. R. Platt, S. Farritor, and H. Haider, 2005, *On low-frequency electric power generation with PZT ceramics*, IEEE/ASME Trans. Mech., vol. 10(2), p. 240–252.
- [50] S.R. Platt, S.Farritor, and H. Haider, 2005, *The use of piezoelectric ceramics for electric power generation within orthopedic implants*, IEEE/ASME Trans. Mech., vol. 10(4), p. 455–461.
- [51] M. Deterre, E. Lefevre, Y. Zhu, M. Woytasik, B. Boutaud, and R. D. Molin, 2014, *Micro Blood Pressure Energy Harvester for Intracardiac Pacemaker*, J. Microelectromech. Syst., vol. 23(3), p. 651–660.

- [52] G. T. Hwang, Y. Kim, J. H. Lee, S. Oh, C. K. Jeong, D. Y. Park, J. Ryu, H. S. Kwon, S. G. Lee, B. Joung, D. Kim, and K. J. Lee, 2015, *Self-powered deep brain stimulation via a flexible PIMNT energy harvester*, Energy Environ. Sci., vol. 8(9), p. 2677–2684.
- [53] C. Dagdeviren, B. D. Yang, Y. Su, P. L. Tran, P. Joe, E. Anderson, J. Xia, V. Doraiswamy, B. Dehdashti, X. Feng, B. Lu, R. Poston, Z. Khalpey, R. Ghaffari, Y. Huang, M. J. Slepian, and J. A. Rogers, 2014, *Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm*, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., vol. 111(5), p. 1927-1932.
- [54] D. H. Kim and K. J. Lee, 2017, *In Vivo Self-Powered Wireless Transmission Using Biocompatible Flexible Energy Harvesters*, Adv. Funct. Mater., vol. 27(25), 1700341.
- [55] N. Elvin, A. Elvin, and D. H. Choi, 2003, *A self-powered damage detection sensor*, J. Strain Anal. Eng. Des., vol. 38, p. 115–124.
- [56] S. Roundy and P. K. Wright, 2004, *A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics*, Smart Mater. Struct., vol. 13(5), p. 1131–1142.
- [57] S. W. Arms, C. P. Townsend, D. L. Churchill, J. H. Galbreath, and S. W. Mundell, 2005, *Power management for energy harvesting wireless sensors*, Proc. SPIE, vol. 5763, p. 267–275.
- [58] E. E. Aktakka, R. L. Peterson, and K. Najafi, 2011, in *Proceeding of the IEEE Conference on Industrial Automation and Control Emerging Technology Applications*, Vol. 6, p. 409.
- [59] D. Zhu, S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. R. Harris, 2011, *A credit card sized self powered smart sensor node*, Sens. Actuators A, vol. 169(2), p. 317–325.
- [60] K. B. Singh, V. Bedekar, S. Taheri, and S. Priya, 2012, *Piezoelectric vibration energy harvesting system with an adaptive frequency tuning mechanism for intelligent tires*, Mechatronics, vol. 22(7), p. 970–988.
- [61] Q. C. Tang, X. Y. Xia, and X. X. Li, 2012, in *Proceeding of the 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 1273–1276.
- [62] R. V. Schaijk, R. Elfrink, J. Oudenhoven, V. Pop, Z. Wang, and

- M. Renaud, 2013, *A MEMS vibration energy harvester for automotive applications*, Proc. SPIE, vol. 8763, 876305.
- [63] J. Lee and B. Choi, 2014, *Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires*, Energy Convers. Manage., vol. 78, p. 32–38.
- [64] Y. Zhang, R. Zheng, K. Shimono, T. Kaizka, and K. Nakano, 2016, *Effectiveness Testing of a Piezoelectric Energy Harvester for an Automobile Wheel Using Stochastic Resonance*, Sensors, vol. 16(10), 1727.
- [65] Y. Zhang, R. Zheng, K. Nakano, and M. P. Cartmell, 2018, *Stabilising high energy orbit oscillations by the utilisation of centrifugal effects for rotating-tyre-induced energy harvesting*, Appl. Phys. Lett., vol. 112(14), 143901.
- [66] Tran Ich Thinh, Le Kim Ngoc, 2010 *Static behavior and vibration control of piezoelectric cantilever composite plates and comparison with experiment*, Computational Material Science, 2010, 49 (4), 276-280.
- [67] Tran Huu Quoc, Vu Van Tham, Tran Minh Tu, 2018, *Optimal placement and active control of composite plates integrated with piezoelectric sensor/actuator pairs*, Vietnam Journal of Science and Technology, 56 (1), 113-126.
- [68] Nguyen Dinh Duc, Pham Hong Cong, 2016, *Nonlinear thermo-mechanical dynamic analysis and vibration of higher order shear deformable piezoelectric functionally graded material sandwich plates resting on elastic foundations*, Journal of Sandwich Structures and Materials, 20 (2), 191-218.
- [69] N.T. Khiem, T.T. Hai, L.Q. Huong, 2020, *Effect of Piezoelectric Patches on Natural Frequencies of Timoshenko Beam Made of Functionally Graded Material*, Mater. Res. Express, 7 (5), 055707 (17pp).
- [70] Duong Thanh Huan, Luu Quynh Huong, Nguyen Tien Khiem, 2021, *Modal analysis of cracked beam with piezoelectric layer*. Vietnam Journal of Mechanics 43 (2): 105-120.
- [71] Nguyễn Văn Mạnh, 2023, *Bài toán khai thác năng lượng cho mô hình dầm áp điện phi tuyến với hiệu ứng cộng hưởng chính và thứ cấp*, Luận án Tiến sĩ ngành Cơ kỹ thuật, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [72] L.Tang, Y.Yang, 2012, *A multiple-degree-of-freedom piezoelectric energy*

- harvesting model*, Journal of intelligent material systems and structures.
- [73] X.Jiang, Y.Li, J.Li, 2014, *Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations*, Journal of renewable and sustainable energy.
- [74] H. Wang, A. Jasim, X. Chen, 2018, *Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – a comprehensive review*, Appl. Energy, vol. 212, pp. 1083–1094.
- [75] Y-A. Lai, J-Y. Kim, C-S. W. Yang, L-L. L. Chung, 2020, *A low-cost and efficient d33-mode piezoelectric tuned mass damper with simultaneously optimized electrical and mechanical tuning*, J. of Int. Mat. Sys. and Str., vol. 32 (6), p. 678–696.
- [76] N.N. Linh, V.A. Tuan, N.V. Man, N.D. Anh, 2022, *Response analysis of undamped primary system subjected to base excitation with a dynamic vibration absorber integrated with a piezoelectric stack energy harvester*, Vietnam J. Mech., vol. 44 (4), pp. 490 – 499.
- [77] G.M. Chatziathanasiou, N.A. Chrysochoidis, C.S. Rekatsinas, D.A. Saravanos, 2022, *A semi-active shunted piezoelectric tuned-mass-damper for multi-modal vibration control of large flexible structures*, J. Sound Vib., vol. 537 117222.
- [78] H. Xiao, X. Wang, S. John, 2015, *A dimensionless analysis of a 2DOF piezoelectric vibration energy harvester*, Mech. Syst. Signal Process, 58-59, 355-375.
- [79] M.A.A. Abdelkareem, L. Xu, M.K.A. Ali, A. Elagouz, J. Mi, S. Guo, L. Zuo, 2018, *Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review*, Appl. Energy, vol. 229, 672–699.
- [80] R. Tavares, M. Ruderma, 2020, *Energy harvesting using piezoelectric transducers for suspension systems*, Mechatronics 65 102294.
- [81] D. Al-Yafeai, T. Darabseh, A.H.I. Mourad, 2020, *A State-Of-The-Art Review of Car Suspension-Based Piezoelectric Energy Harvesting Systems*, Energies 13(9) 2336.
- [82] Nguyễn Đông Anh, Lê Đức Việt, 2007, *Giảm dao động bằng thiết bị tiêu tán năng lượng*, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội.
- [83] N. X. Nguyễn, 2016, *Nghiên cứu thiết kế tối ưu và điều khiển bộ hấp thụ dao động có bộ cản và lò xo lắp đặt phức hợp*, Luận án Tiến sĩ Cơ học, Đại

học Quốc gia Hà Nội.

- [84] J.P. Den Hartog, 1985, *Mechanical Vibrations*, Dover, New York, ISBN: 0-486-64785-4.
- [85] J. Connor, S. Laflamme, 2014, *Structural Motion Engineering*, Springer International Publishing, Switzerland, ISBN: 978-3-319-06281-5.
- [86] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, D. Inman, 2018, *High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications*, *Joule*. 2(4) 642–697.
- [87] N. Sezer, M. Koç, 2021, *A Comprehensive Review on the State-of-the-Art of Piezoelectric Energy Harvesting*, *Nano Energy* 80 105567.
- [88] R. Calìò, U.B. Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Stefanini, G. De Petris, C.M. Oddo, 2014, *Piezoelectric energy harvesting solutions*, *Sensors* 14 4755–4790.
- [89] J.E. Brock, 1946, *A Note on the Damped Vibration Absorber*, *J. Appl. Mech.* 13 (4) A284.
- [90] G.B. Warburton, 1982, *Optimal absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters*, *Eart. Eng. and Struc. Dyn.* 10 381-401.
- [91] T. Asami, O. Nishihara, 1999, *Analytical and Experimental Evaluation of an Air Damped Dynamic Vibration Absorber: Design Optimizations of the Three-Element Type Model*, *J. Vib. Acoust.* 121(3) 334-342.
- [92] W.O. Wong, Y.L. Cheung, 2008, *Optimal design of a damped dynamic vibration absorber for vibration control of structure excited by ground motion*, *Eng. Struc.* 30, 282-286.
- [93] A. Batou, S. Adhikari, 2019, *Optimal parameters of viscoelastic tuned-mass dampers*, *J. Sound Vib.* 445, 17–28.
- [94] N.D. Anh, N.X. Nguyen, 2011, *Extension of equivalent linearization method to design of TMD for linear damped systems*, *Struc. Cont. and Heal. Mon.* 19 (6) 565–573.
- [95] N.D. Anh, N.X. Nguyen, 2013, *Design of TMD for damped linear structures using the dual criterion of equivalent linearization method*, *Int. J. Mech. Sci.* 77, 164–170.
- [96] N.D. Anh, N.X. Nguyen, L.T. Hoa, 2013, *Design of three-element dynamic vibration absorber for damped linear structures*, *J. Sound Vib.* 332

- (19) 4482–4495.
- [97] N.D. Anh, N.X. Nguyen, N.H. Quan, 2014, *Global-local approach to the design of dynamic vibration absorber for damped structures*, J. Sound Vib. 22 (14) 3182–3201.
- [98] S.F. Ali, S. Adhikari, 2013, *Energy Harvesting Dynamic Vibration Absorbers*, J. Appl. Mech. 80 (4) 041004.
- [99] L.A. Zuppa, J. Awrejcewicz, N. Losyeva, V. Puzyrov, N. Savchenko, 2020, *Energy Harvesting for System of Coupled Oscillators under External Excitation in the Vicinity of Resonance 1:1*, J. Comp. Non. Dyn. 15 (12) 121005.
- [100] G. Zhao, N. Alujević, B. Depraetere, P. Sas, 2014 *Dynamic analysis and \mathcal{H}_2 optimisation of a piezo-based tuned vibration absorber*, J Int. Mat. Sys. Struc. 26 (15) 1995–2010.
- [101] Al-Yafeai D, Darabseh T, Mourad A-HI, 2019, *Quarter vs. Half Car Model energy harvesting systems*. In: Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). 2019:1-5
- [102] M.O. Chtiba, S. Choura, A.H. Nayfeh, S. El-Borgi, 2010, *Vibration confinement and energy harvesting in flexible structures using collocated absorbers and piezoelectric devices*, J. Sound Vib. 329 (3), 261-276.
- [103] P. Pan, D. Zhang, X. Nie, H. Chen, 2016, *Development of piezoelectric energy-harvesting tuned mass damper*, Science China Technological Sciences, 60(3), 467–478.
- [104] Al-Yafeai D, Darabseh T, Mourad A-HI, 2020, *Energy harvesting from car suspension system subjected to random excitation*, In: Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). 1-5
- [105] W. Hendrowati, H.L. Guntur, I.N. Sutantra, 2012, *Design, modeling and analysis of implementing a multilayer piezoelectric vibration energy harvesting mechanism in the vehicle suspension*, Engineering 4 (11), 728-738
- [106] N.G. Stephen, 2006, *On Energy Harvesting from Ambient Vibration*, J. Sound Vib., 293 (1-2) 409-425.
- [107] J. Liang, W-H. Liao, 2010, *Energy flow in piezoelectric energy harvesting systems*, Smart Mater. Struc., 20(1), 015005.
- [108] Z. Yang, A. Erturk, J. Zu, 2017, *On the efficiency of piezoelectric energy*

- harvesters*, Extreme Mechanics Letters, pp. 15, 26–37.
- [109] Q. Cai, S. Zhu, 2022, *The nexus between vibration-based energy harvesting and structural vibration control: A comprehensive review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 155, 111920.
- [110] A. Giaralis, 2021, *An inerter-based dynamic vibration absorber with concurrently enhanced energy harvesting and motion control performances under broadband stochastic excitation via inertance amplification*, ASME J. Risk Uncertainty Part B, 7(1), 010909.
- [111] J. Dicken, P.D. Mitcheson, I. Stoianov, E.M. Yeatman, 2012, *Power-Extraction Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters in Miniature and Low-Power Applications*, IEEE Trans. on Pow. Elec., 27(11), 4514–4529.
- [112] T. Hehn, Y. Manoli, 2015, *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*, Springer Series in Advanced Microelectronics, 38, 21–40.
- [113] X.Liu, J.Wang, W.Li, 2018, *Dynamic analytical solution of a piezoelectric stack utilized in an actuator and a generator*, Applied sciences.
- [114] T. B. Xu, E. J. Siochi, J. H. Kang, L. Zuo, W. Zhou, X. Tang, X. Jiang, 2013, *Energy harvesting using a PZT ceramic multilayer stack*, Smart Mater. Struct., 22(6), 065015.
- [115] IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987, *Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society*, IEEE, New York.
- [116] NN Linh, VA Tuan, NV Manh, ND Anh, 2022, *Response analysis of undamped primary system subjected to base excitation with a dynamic vibration absorber integrated with a piezo stack energy harvester*, Vietnam J. Mech. 44 (4), pp. 490-499.
- [117] NN Linh, ND Anh, LD Viet, NA Ngoc, VA Tuan, TD Nang, NV Manh, 2022, *Patent Title: Tuned mass damper with integrated vibrating piezoelectric energy harvester*, Intellectual Property Office of Vietnam, Application Number: 1-2022-02620, Publication Number: 1/088043 A, Publication date: 26 July (in Vietnamese).
- [118] NN Linh, 2022, *Series combination models of piezoelectric energy harvesters with spring and damper*, In the 11th National Conference on Mechanics, Vol. 2. (in Vietnamese).

- [119] NN Linh, ND Anh, 2023, *A Novel Configuration of Tuned Mass Damper With Energy Harvester of Piezo stack and Force Amplification Frame*, Proceedings of the ICEMA International Conference on Engineering Mechanics and Automation, Vietnam, November 11-12, pp. 217-222.
- [120] Muler P.C., Schiehlen W.O., 1997, *Dao động tuyến tính*, NXB xây dựng (Người dịch: Nguyễn Đông Anh).
- [121] Nguyễn Văn Khang, 2003, *Dao động kỹ thuật*, NXB Khoa học kỹ thuật.
- [122] N.D. Anh, N.N. Linh, N.V. Manh, V.A. Tuan, N.V. Kuu, N.T. Anh, I. Elishakoff, 2020, *Efficiency of mono-stable piezoelectric Duffing energy harvester in the secondary resonances by averaging method. Part 1: Sub-harmonic resonance*, Int. J Non-Linear Mec. 126, 103537.
- [123] N.N. Linh, N.T. Anh, N.V. Manh, V.A. Tuan, N.V. Kuu, N.D. Anh, I. Elishakoff, 2021, *Efficiency of mono-stable piezoelectric Duffing energy harvester in the secondary resonances by averaging method, Part 2: Super-harmonic resonance*, Int. J Non-Linear Mec. 137, 103817.
- [124] Wang, L., Chen, S., Zhou, W., Xu, T. B., & Zuo, L., 2017, *Piezoelectric vibration energy harvester with two-stage force amplification*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 28(9), pp. 1175-1187.

PHỤ LỤC

Ở đây: $\mu=\mu$; $\alpha=\alpha$; $\beta=\beta$; $\kappa=\kappa^2$

$$\begin{aligned} \lambda_Q = \text{lamdaQ} = & ((\mu + (4*\alpha^4*\beta^4*\mu^4 + \\ & 16*\alpha^4*\beta^4*\mu^3 + 24*\alpha^4*\beta^4*\mu^2 + \\ & 16*\alpha^4*\beta^4*\mu + 4*\alpha^4*\beta^4 + \\ & 4*\alpha^4*\beta^2*\mu^3 - 12*\alpha^4*\beta^2*\mu - \\ & 8*\alpha^4*\beta^2 + \alpha^4*\mu^2 + 4*\alpha^4*\mu + 4*\alpha^4 \\ & + 8*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu^4 + \\ & 32*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu^3 + \\ & 48*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu^2 + 32*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu \\ & + 8*\alpha^2*\beta^4*\kappa + 8*\alpha^2*\beta^4*\mu^4 + \\ & 32*\alpha^2*\beta^4*\mu^3 + 48*\alpha^2*\beta^4*\mu^2 + \\ & 32*\alpha^2*\beta^4*\mu + 8*\alpha^2*\beta^4 + \\ & 4*\alpha^2*\beta^2*\kappa*\mu^3 - 12*\alpha^2*\beta^2*\kappa*\mu - \\ & 8*\alpha^2*\beta^2*\kappa + 8*\alpha^2*\beta^2*\mu^3 - \\ & 24*\alpha^2*\beta^2*\mu - 16*\alpha^2*\beta^2 + 2*\alpha^2*\mu^2 \\ & + 8*\alpha^2*\mu + 8*\alpha^2 + 4*\beta^4*\kappa^2*\mu^4 + \\ & 16*\beta^4*\kappa^2*\mu^3 + 24*\beta^4*\kappa^2*\mu^2 + \\ & 16*\beta^4*\kappa^2*\mu + 4*\beta^4*\kappa^2 + \\ & 8*\beta^4*\kappa*\mu^4 + 32*\beta^4*\kappa*\mu^3 + \\ & 48*\beta^4*\kappa*\mu^2 + 32*\beta^4*\kappa*\mu + 8*\beta^4*\kappa \\ & + 4*\beta^4*\mu^4 + 16*\beta^4*\mu^3 + 24*\beta^4*\mu^2 + \\ & 16*\beta^4*\mu + 4*\beta^4 + 4*\beta^2*\kappa*\mu^3 - \\ & 12*\beta^2*\kappa*\mu - 8*\beta^2*\kappa + 4*\beta^2*\mu^3 - \\ & 12*\beta^2*\mu - 8*\beta^2 + \mu^2 + 4*\mu + 4)^{(1/2)} + \\ & 2*\beta^2*\kappa + \alpha^2*\mu + 4*\beta^2*\mu + 2*\alpha^2 + \\ & 2*\beta^2 + 2*\alpha^2*\beta^2 + 2*\beta^2*\mu^2 + \\ & 4*\alpha^2*\beta^2*\mu + 2*\beta^2*\kappa*\mu^2 + \\ & 2*\alpha^2*\beta^2*\mu^2 + 4*\beta^2*\kappa*\mu + 2)/(4*(\mu + \\ & \alpha^2*\mu + \alpha^2 + 1)))^{(1/2)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_P = \text{lamdaP} = & ((\mu - (4*\alpha^4*\beta^4*\mu^4 + \\ & 16*\alpha^4*\beta^4*\mu^3 + 24*\alpha^4*\beta^4*\mu^2 + \\ & 16*\alpha^4*\beta^4*\mu + 4*\alpha^4*\beta^4 + \\ & 4*\alpha^4*\beta^2*\mu^3 - 12*\alpha^4*\beta^2*\mu - \\ & 8*\alpha^4*\beta^2 + \alpha^4*\mu^2 + 4*\alpha^4*\mu + 4*\alpha^4 \\ & + 8*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu^4 + \\ & 32*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu^3 + \\ & 48*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu^2 + 32*\alpha^2*\beta^4*\kappa*\mu \\ & + 8*\alpha^2*\beta^4*\kappa + 8*\alpha^2*\beta^4*\mu^4 + \\ & 32*\alpha^2*\beta^4*\mu^3 + 48*\alpha^2*\beta^4*\mu^2 + \\ & 32*\alpha^2*\beta^4*\mu + 8*\alpha^2*\beta^4 + \\ & 4*\alpha^2*\beta^2*\kappa*\mu^3 - 12*\alpha^2*\beta^2*\kappa*\mu - \\ & 8*\alpha^2*\beta^2*\kappa + 8*\alpha^2*\beta^2*\mu^3 - \\ & 24*\alpha^2*\beta^2*\mu - 16*\alpha^2*\beta^2 + 2*\alpha^2*\mu^2 \\ & + 8*\alpha^2*\mu + 8*\alpha^2 + 4*\beta^4*\kappa^2*\mu^4 + \\ & 16*\beta^4*\kappa^2*\mu^3 + 24*\beta^4*\kappa^2*\mu^2 + \\ & 16*\beta^4*\kappa^2*\mu + 4*\beta^4*\kappa^2 + \\ & 8*\beta^4*\kappa*\mu^4 + 32*\beta^4*\kappa*\mu^3 + \\ & 48*\beta^4*\kappa*\mu^2 + 32*\beta^4*\kappa*\mu + 8*\beta^4*\kappa \\ & + 4*\beta^4*\mu^4 + 16*\beta^4*\mu^3 + 24*\beta^4*\mu^2 + \\ & 16*\beta^4*\mu + 4*\beta^4 + 4*\beta^2*\kappa*\mu^3 - \\ & 12*\beta^2*\kappa*\mu - 8*\beta^2*\kappa + 4*\beta^2*\mu^3 - \\ & 12*\beta^2*\mu - 8*\beta^2 + \mu^2 + 4*\mu + 4)^{(1/2)} - \\ & 2*\beta^2*\kappa + \alpha^2*\mu + 4*\beta^2*\mu + 2*\alpha^2 + \\ & 2*\beta^2 + 2*\alpha^2*\beta^2 + 2*\beta^2*\mu^2 + \\ & 4*\alpha^2*\beta^2*\mu + 2*\beta^2*\kappa*\mu^2 + \\ & 2*\alpha^2*\beta^2*\mu^2 + 4*\beta^2*\kappa*\mu + 2)/(4*(\mu - \\ & \alpha^2*\mu + \alpha^2 + 1)))^{(1/2)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 8\alpha^2\mu + 8\alpha^2 + 4\beta^4\kappa^2\mu^4 + 16\beta^4\kappa^2\mu^3 + 24\beta^4\kappa^2\mu^2 + 16\beta^4\kappa^2\mu + 4\beta^4\kappa^2 + 8\beta^4\kappa\mu^4 + 32\beta^4\kappa\mu^3 + 48\beta^4\kappa\mu^2 + 32\beta^4\kappa\mu + 8\beta^4\kappa + 4\beta^4\mu^4 + 16\beta^4\mu^3 + 24\beta^4\mu^2 + 16\beta^4\mu + 4\beta^4 + 4\beta^2\kappa\mu^3 - 12\beta^2\kappa\mu - 8\beta^2\kappa + 4\beta^2\mu^3 - 12\beta^2\mu - 8\beta^2 + \mu^2 + 4\mu + 4)^{(1/2)} + 2\beta^2\kappa + \alpha^2\mu + 4\beta^2\mu + 2\alpha^2 + 2\beta^2 + 2\alpha^2\beta^2 + 2\beta^2\mu^2 + 4\alpha^2\beta^2\mu + 2\beta^2\kappa\mu^2 + 2\alpha^2\beta^2\mu^2 + 4\beta^2\kappa\mu + 2)/(4(\mu + \alpha^2\mu + \alpha^2 + 1))^{(1/2)}; \\
& = ((\mu - (4\alpha^4\beta^4\mu^4 + 16\alpha^4\beta^4\mu^3 + 24\alpha^4\beta^4\mu^2 + 16\alpha^4\beta^4\mu + 4\alpha^4\beta^4 - 4\alpha^4\beta^2\mu^3 - 12\alpha^4\beta^2\mu - 8\alpha^4\beta^2 + \alpha^4\mu^2 + 4\alpha^4\mu + 4\alpha^4 + 8\alpha^2\beta^4\kappa\mu^4 + 32\alpha^2\beta^4\kappa\mu^3 + 48\alpha^2\beta^4\kappa\mu^2 + 32\alpha^2\beta^4\kappa\mu + 8\alpha^2\beta^4\kappa + 8\alpha^2\beta^4\mu^4 + 32\alpha^2\beta^4\mu^3 + 48\alpha^2\beta^4\mu^2 + 32\alpha^2\beta^4\mu + 8\alpha^2\beta^4 + 4\alpha^2\beta^2\kappa\mu^3 - 12\alpha^2\beta^2\kappa\mu - 8\alpha^2\beta^2\kappa + 8\alpha^2\beta^2\mu^3 - 24\alpha^2\beta^2\mu - 16\alpha^2\beta^2 + 2\alpha^2\mu^2 + 8\alpha^2\mu + 8\alpha^2 + 4\beta^4\kappa^2\mu^4 + 16\beta^4\kappa^2\mu^3 + 24\beta^4\kappa^2\mu^2 + 16\beta^4\kappa^2\mu + 4\beta^4\kappa^2 + 8\beta^4\kappa\mu^4 + 32\beta^4\kappa\mu^3 + 48\beta^4\kappa\mu^2 + 32\beta^4\kappa\mu + 8\beta^4\kappa + 4\beta^4\mu^4 + 16\beta^4\mu^3 + 24\beta^4\mu^2 + 16\beta^4\mu + 4\beta^4 + 4\beta^2\kappa\mu^3 - 12\beta^2\kappa\mu - 8\beta^2\kappa + 4\beta^2\mu^3 - 12\beta^2\mu - 8\beta^2 + \mu^2 + 4\mu + 4)^{(1/2)} + 2\beta^2\kappa + \alpha^2\mu + 4\beta^2\mu + 2\alpha^2 + 2\beta^2 + 2\alpha^2\beta^2 + 2\beta^2\mu^2 + 4\alpha^2\beta^2\mu + 2\beta^2\kappa\mu^2 + 2\alpha^2\beta^2\mu^2 + 4\beta^2\kappa\mu + 2)/(4(\mu + \alpha^2\mu + \alpha^2 + 1))^{(1/2)};
\end{aligned}$$