

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN

BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP BỘ

NGHIÊN CỨU ĐỘNG LỰC HỌC PHI TUYẾN
THIẾT BỊ RUNG SIÊU ÂM CƯỜNG ĐỘ CAO

Mã số: B2020-TNA-02

Chủ nhiệm đề tài: TS. Lương Việt Dũng

THÁI NGUYÊN, NĂM 2023

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP BỘ**

**NGHIÊN CỨU ĐỘNG LỰC HỌC PHI TUYẾN
THIẾT BỊ RUNG SIÊU ÂM CƯỜNG ĐỘ CAO**

Mã số: B2020-TNA-02

Xác nhận của cơ quan chủ trì

Chủ nhiệm đề tài

TS. Lương Việt Dũng

THÁI NGUYÊN, NĂM 2023

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN**

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: **Nghiên cứu động lực học phi tuyến thiết bị rung siêu âm cường độ cao**

- Mã số: B2020 - TNA - 02

- Chủ nhiệm: TS. Lương Việt Dũng

- Cơ quan thực hiện: Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp

- Thời gian thực hiện: 1/2020 - 12/2022

2. Mục tiêu đăng ký:

Mục tiêu chung

Xây dựng được mô hình rung động có tải thay đổi (phi tuyến) cho đầu rung siêu âm trong gia công có trợ giúp của rung động siêu âm.

Mục tiêu cụ thể:

- Mô hình hóa phần tử hữu hạn đầu rung siêu âm nhằm phân tích ứng xử động lực học kết cấu đầu rung siêu âm.

- Đánh giá được độ tin cậy, tính chính xác và kiểm chứng khả năng ứng dụng của mô hình phân tích ứng xử động lực học trong thiết kế đầu rung siêu âm.

3. Kết quả đạt được:

Đề tài thực hiện đã đánh giá thực trạng và phân tích được các tồn tại của các mô hình hiện có, từ đó xây dựng được:

- Mô hình toán đáp ứng trở kháng phức của đầu rung siêu âm có cấu hình bất kỳ với tải đặt tại mặt công tác của đầu rung; chương trình Matlab cho phép phân tích đặc tính điện (trở kháng phức và pha) của đầu rung, làm công cụ để tính toán, thiết kế và đánh giá đầu rung về mặt điện.

- Phát triển được giải thuật và chương trình Matlab hồi quy dựa trên thuật toán HDS, cho phép xác định bộ thông số phức của vật liệu gồm áp điện dựa trên dữ liệu đo trở kháng và pha của chúng. Đây là công cụ đặc biệt có ý nghĩa khi thiết kế đầu rung với các tấm, vòng gốm áp điện thương mại.

- Mô hình phần tử hữu hạn, sử dụng phần tử 3D cho đầu rung siêu âm trên phần mềm ABAQUS để phân tích, mô phỏng ứng xử động lực học của đầu rung.

- Mô hình thí nghiệm xác định một số thông số đặc trưng cho đáp ứng động học, động lực học đầu rung siêu âm. Hệ thống cho phép đo biên độ rung động tại mặt công tác của đầu rung siêu âm ở các tần số và điện áp kích thích khác nhau. Đây là công cụ quan trọng nhằm đánh giá độ tin cậy của các mô hình cũng như đánh giá thiết kế.

- Bộ dữ liệu đầy đủ về các thông số điện của một số đầu rung siêu âm nhờ thiết bị đo, phân tích trở kháng phức chuyên dụng Keysight E5061B. Bộ dữ liệu từ các thiết bị chuyên dụng này có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế đầu rung và bộ nguồn siêu âm, đồng thời còn là công cụ quan trọng nhằm đánh giá độ tin cậy của các mô hình toán cũng như đánh giá, kiểm chứng thiết kế.

- Thiết kế và lắp được mạch điều khiển dao động siêu âm đa dải, ghép nối với mạch công suất siêu âm của bộ nguồn siêu âm có sẵn để nâng cấp bộ nguồn hàn siêu âm có thể chỉnh định hoạt động trên một số dải tần khác nhau (từ 20KHz đến 40Khz).

- Thiết kế và chế tạo được một mẫu đầu rung siêu âm thử nghiệm trong ứng dụng hàn nhựa, tần số làm việc 20KHz, công suất 2000W.

4. Sản phẩm đạt được:

a. Sản phẩm ứng dụng

- 01 hệ thống thiết bị rung siêu âm cường độ cao trợ giúp gia công cơ với các thành phần chính gồm: bộ nguồn siêu âm, đầu rung siêu âm 2000W và đồ gá phù hợp cho nghiên cứu thử nghiệm hàn nhựa siêu âm.

- 01 mô hình đo lường các đặc tính, thông số rung động siêu âm. Mô hình thí nghiệm đo xác định biên độ, tần số đầu rung siêu âm dùng trong gia công cơ.

Dải đo 1: Biên độ tới 64 microns, độ phân giải đạt khoảng 160nm, tần số đạt 100kHz. Dải đo 2: Biên độ tới 6 mm, độ phân giải đạt khoảng 14 microns, tần số đạt 100kHz.

b. Sản phẩm khoa học

- 01 bài báo quốc tế SCIE thuộc nhóm Q2;

- 01 bài báo quốc tế Scopus thuộc nhóm Q3 (đang phản biện);

- 01 bài báo hội nghị quốc tế, được xuất bản trên Scopus, Q4

- 02 bài báo trong nước đăng trên tạp chí được HĐGSNN tính điểm

c. Đào tạo

- 01 chuyên đề NCS thuộc lĩnh vực của đề tài

- 01 thạc sỹ bảo vệ thành công theo hướng nghiên cứu của đề tài

Ngày tháng 04 năm 2023

Cơ quan chủ trì đề tài

Chủ nhiệm đề tài

TS. Lương Việt Dũng

THE MINISTRY OF EDUCATION
THAI NGUYEN UNIVERSITY

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General information:

- Project title: Nonlinear dynamics study of high-intensity ultrasonic vibration equipment
- Code number: B2020 - TNA - 02
- Lead researcher: Dr. Luong Viet Dung
- Project implementing organization: TNU - University of Technology
- Duration: from January, 2020 to December, 2022

2. Objective(s):

General objective:

This project aims to develop nonlinear models for transducers in ultrasonic-assisted machining.

Specific objective:

Finite element modeling of the ultrasonic transducer to analyze the dynamic behavior of their structure.

Evaluate the reliability, accuracy, and validate the applicability of the dynamic behavior analysis model in designing ultrasonic transducers.

3. Research results

The study has assessed the current situation and analyzed the shortcomings of existing models, resulted in the following issues:

- A mathematical model of the complex impedance response of an ultrasonic transducer with arbitrary configuration and loading placed at the ultrasonic horn; A Matlab program to analyze the electrical characteristics of the transducer (complex impedance and phase), and can be used to calculate, design, and evaluate the transducer electrically.
- An algorithm and a Matlab regression program based on HDS algorithm, allowing to determine complex parameters of piezoelectric ceramic materials based on their impedance and phase measurement data. This is a particularly useful tool when designing transducer with commercial piezoelectric ceramic plates and rings.
- Finite element model, using 3D element for ultrasonic transducers on Abaqus FEA software to analyze and simulate the dynamic behavior of the transducers.
- Experimental model to determine some characteristic parameters for dynamic and kinematics response of ultrasonic transducers. The system can measure the

vibration amplitude of the ultrasonic horn at different excitation frequencies and voltages. This is an important tool to evaluate the reliability of models and previous design.

- A complete data set of electrical parameters of some ultrasonic transducer measured by E5061B-3L5 LF-RF ENA Vector Network Analyzer. This is an extremely important dataset in the design of the ultrasonic transducer and power supplies, as well as in evaluating the reliability of mathematical models, evaluating and verifying design.

- Design and install a multi-frequency ultrasonic oscillation control circuit, coupled with circuit of the existing ultrasonic power supply to upgrade the ultrasonic welding power supply operating on several different frequency bands (from 20kHz to 40kHz).

- Design and manufacture a sample of ultrasonic transducer for testing in plastic welding application, working frequency 20KHz, capacity 2000W.

4. Products:

a. Application products

- 01 high-intensity ultrasonic-assisted machining system including an ultrasonic generator, a ultrasonic transducer with the power of 2000W and suitable jigs for ultrasonic plastic welding.

- 01 measurement model for ultrasonic vibration characteristics and parameters. The experimental model measures and determines the amplitude and frequency of the ultrasonic wave used in machining as follows:

Measurement range 1: Amplitude up to 64 microns, resolution of about 160nm, frequency of 100kHz.

Measurement range 2: Amplitude up to 6mm, resolution of about 14 microns, frequency of 100kHz.

b. Scientific products

- 01 international journal article indexed in SCIE with a Q2 ranking.

- 01 international journal article indexed in Scopus with a Q3 ranking (in review progress).

- 01 international paper published in international conference proceedings indexed in Scopus with a Q4 ranking.

- 02 domestic journal article published in a journal with a scored ranking in the field of science and technology.

c. Training

- A doctoral-partial project in the field of the topic

- A successful master's thesis defense in the research direction of the topic

Date:/04/2023

Project leading organization

Lead researcher

Dr. Luong Viet Dung

DANH SÁCH THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU

TT	Họ và tên	Đơn vị công tác và lĩnh vực chuyên môn
1	PGS.TS. Ngô Như Khoa	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Cơ kỹ thuật
2	PGS.TS. Dương Phạm Tường Minh	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Cơ kỹ thuật
3	ThS. Nguyễn Thị Hoa	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Cơ khí
4	ThS. Nguyễn Quang Hưng	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Cơ khí
5	ThS. Nguyễn Văn Sỹ	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Cơ khí
6	TS. Nguyễn Đình Ngọc	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Cơ khí
7	TS. Lương Việt Dũng	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Cơ khí
8	NCS. Nguyễn Thị Bích Ngọc	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Cơ khí
9	ThS. Trần Văn Quân	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Cơ khí
10	ThS. Trần Thiện Dũng	Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN Ngành Kỹ thuật Điện- Điện tử
11	HV. Trần Hoài Nam	Trường Cao đẳng nghề số 1- Bộ Quốc Phòng Ngành Kỹ thuật Cơ khí

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1. ĐẶT VẤN ĐỀ VÀ NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM	1
1.1. Đặt vấn đề	1
1.2. Tổng quan về rung động siêu âm.....	3
1.2.1. Các phương pháp tạo sóng siêu âm.....	4
1.2.2. Đầu rung siêu âm.....	8
1.2.3. Các chế độ rung động siêu âm	12
1.2.4. Các phương pháp mô hình hóa.....	13
1.3. Kết luận	16
CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHÂN TÍCH RUNG ĐỘNG CỦA ĐẦU RUNG SIÊU ÂM BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH	17
2.1. Chuyển động sóng trong vật rắn đàn hồi	17
2.2. Phương pháp mạch tương đương Mason	22
2.2.1. Mô hình mạch tương đương của đầu rung siêu âm.....	24
2.3. Tổn thất đầu rung gồm áp điện	37
2.4. Mô hình hóa tải trọng bên ngoài	38
2.5. Kết quả mô hình giải tích.....	39
2.6. Kết luận	43
CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN ĐẦU RUNG SIÊU ÂM	44
3.1. Giới thiệu	44
3.2. Các tham số thiết thiết kế đầu rung siêu âm	45
3.2.1. Tần số lan truyền và bước sóng.....	45
3.2.2. Lựa chọn các thành phần áp điện	46
3.2.3. Lựa chọn phần kim loại.....	47
3.3. Xây dựng mô hình phần tử hữu hạn đầu rung siêu âm.....	48
3.3.1. Cơ sở lý thuyết	49
3.3.2. Kết quả và thảo luận	54
3.4. Kết luận	65
Chương 4. THIẾT KẾ HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM	67
4.1. Các đại lượng cần đo và phương pháp xác định.....	67
4.1.1. Tần số cộng hưởng và trở kháng	67
4.1.2. Biên độ rung động	70
4.2. Xây dựng hệ thống thí nghiệm	74

4.2.1. Hệ thống thí nghiệm xác định tần số cộng hưởng và biên độ rung siêu âm bằng phương pháp đo không tiếp xúc.....	74
4.2.2. Hệ thống thí nghiệm xác định tần số cộng hưởng và trở kháng của đầu rung siêu âm bằng thiết bị phân tích trở kháng	77
4.3. Kết quả thí nghiệm.....	79
4.3.1. Tần số cộng hưởng, biên độ rung siêu âm bằng phương pháp đo không tiếp xúc.....	79
4.3.2. Tần số cộng hưởng và trở kháng của đầu rung siêu âm bằng thiết bị phân tích trở kháng	82
4.4. Kiểm chứng kết quả mô phỏng số với kết quả thực nghiệm	86
4.4.1. Đối với mô hình giải tích	86
4.4.2. Đối với mô hình phần tử hữu hạn	87
4.5. Kết luận.....	88
CHƯƠNG 5. THIẾT KẾ CHẾ TẠO BỘ NGUỒN SIÊU ÂM CẢI TIẾN ỨNG DỤNG TRONG HÀN SIÊU ÂM.....	89
5.1. Đặt vấn đề	89
5.2. Cấu tạo của bộ nguồn siêu âm nguyên mẫu	89
5.3. Cấu trúc bộ nguồn siêu âm cải tiến.....	91
5.4. Đánh giá kết quả	96
5.5. Kết luận.....	98
KẾT LUẬN	99
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	101

DANH MỤC KÍ HIỆU

PZT	Vật liệu áp điện
I, I_m, I_e	Dòng điện
V, V_1, V_2, V_e, V_m	Điện áp
v	Vận tốc
c	Tốc độ sóng âm
FEM	Phương pháp phần tử
FE	Phần tử hữu hạn
F	Lực
S	Diện tích
$Z, Z_L, Z_C, Z_{Co}, Z_e, Z_m$	Trở kháng
N	Hệ số chuyển đổi cơ – điện
l	Chiều dài của thiết bị
ρ	Mật độ khối lượng
k	Số sóng
C_0	Điện dung
R	Điện trở
X	Điện kháng
k_t, k_{eff}	Hệ số khớp nối cơ – điện
2D	Hai chiều không gian
3D	Ba chiều không gian
D	Độ rộng xung

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Các thành phần chính của hệ thống hàn nhựa hay cắt kim loại siêu âm	2
Hình 1.2 Sơ đồ nguyên lý truyền rung động (sóng) siêu âm trong cắt kim loại siêu âm [10].....	2
Hình 1.3 (a) Các thành phần chính của bộ công tác siêu âm;	3
(b) Cấu tạo của đầu rung siêu âm	3
Hình 1.4. Các ngưỡng tần số rung động [12]	4
Hình 1.5. Mạch từ giao tạo rung siêu âm	5
Hình 1.6. Ảnh hưởng của từ trường biến đổi đến cấu trúc vật liệu mang từ tính tạo ra dao động cơ học.....	5
Hình 1.7. Hiệu ứng áp điện [17].....	6
Hình 1.8. Ảnh hưởng áp điện trực tiếp (trái) và ảnh hưởng áp điện ngược (phải) [20]..	6
Hình 1.9. Kết cấu PZT: (a) dạng màng mỏng; (b) dạng Sandwich.....	7
Hình 1.10. Mô hình liên kết phân tử	7
Hình 1.11. Hình dạng một số mode truyền sóng.....	8
Hình 1.12. Sơ đồ một đầu rung siêu âm từ tính điển hình	9
Hình 1.13. Minh họa một đầu rung siêu âm từ giao.....	9
Hình 1.14. Sơ đồ một bộ chuyển đổi siêu âm Langevin điển hình.	10
Hình 1.15. Hình ảnh mặt cắt ngang của một đầu rung siêu âm áp điện điển hình.....	10
Hình 1.16. Các chế độ rung động từ mô hình phân tử hữu hạn cho thanh.....	12
Hình 1.17. Thiết bị hàn siêu âm, sử dụng chế độ rung dọc (L).....	13
Hình 2.1. Lực tác dụng lên phân tử vi phân của thanh đồng chất.....	17
Hình 2.2. Sóng phản xạ và truyền qua bề mặt ranh giới giữa hai môi trường	20
Hình 2.3. Minh họa đĩa gốm áp điện và mô hình mạch tương đương Mason.....	22
Hình 2.4. Môi trường với thiết diện đồng nhất và sơ đồ mạch tương đương.....	24
Hình 2.5. Cấu hình của đầu rung siêu âm.....	24
Hình 2.6. Sơ đồ mạch tương đương vùng 1	25
Hình 2.7. Sơ đồ mạch tương đương vùng 2	25
Hình 2.8. Sơ đồ mạch tương đương vùng 3	26
Hình 2.9. Sơ đồ mạch tương đương vùng 4	27
Hình 2.10. Mạch tương đương hoàn chỉnh của đầu rung dựa trên mô hình Mason	28
Hình 2.11 Mô hình mạch tương đương được đơn giản hóa	29
Hình 2.12. Sự chuyển đổi trở kháng sóng âm sang trở kháng điện.....	30
Hình 2.13. Sơ đồ dòng điện tương đương	31

Hình 2.14. Mô hình bộ khuếch đại	32
Hình 2.15. Môi trường với thiết diện không đồng nhất và sơ đồ mạch tương đương...36	
Hình 2.16. Mạch tương đương dạng T của bộ khuếch đại	36
Hình 2.17. Sơ đồ thuật toán của HDS	40
Hình 2.18. So sánh mô hình Martin với các mô hình của IEEE và Kwok.....	41
Hình 2.19. Thiết bị đầu rung siêu âm	42
Hình 2.20. Tổng trở kháng và sơ đồ pha	43
Hình 3.1. Nguyên lý nửa bước sóng.....	46
Hình 3.2. Các thành phần của đầu rung siêu âm	55
Hình 3.3. Mô hình phần tử hữu hạn	56
Hình 3.4. Phân tích modal của đầu rung siêu âm	57
Hình 3.5. Biên độ dao động của đầu rung siêu âm.....	58
Hình 3.6. Đầu rung và bộ khuếch đại siêu âm	58
Hình 3.7. Mô hình 3D phần tử hữu hạn của thiết bị rung siêu âm	59
Hình 3.8. Chế độ và tần số tự nhiên của thiết bị rung siêu âm (kích thước lưới 2mm) 60	
Hình 3.9. Biên độ dao động của đầu rung siêu âm (kích thước lưới 2mm)	60
Hình 3.10. Ảnh hưởng của kích thước lưới đối với tần số và biên độ cộng hưởng	61
Hình 3.11. Ảnh hưởng của kích thước lưới đến các năng lượng khác nhau của mô hình: (a) Động năng, (b) Cân bằng năng lượng.....	61
Hình 3.12. So sánh thời gian tính toán giữa hai loại phần tử	62
Hình 3.13. Mô hình 2D phần tử hữu hạn.....	63
Hình 3.14. Kết quả mô phỏng với phần tử bậc nhất CAX4R (CAX4RE)	64
Hình 3.15. Lực tác động lên thiết bị và mẫu trong quá trình hàn.....	65
Hình 3.16. Ảnh hưởng của lực đến biên độ cộng hưởng (a) và tần số (b)	65
Hình 4.1. Vùng tần số làm việc của đầu rung.....	67
Hình 4.2. Sơ đồ mạch vòng đo tổng trở	68
Hình 4.3. Phương pháp I – V	69
Hình 4.4. Sơ đồ mạch cầu tự cân bằng đo tổng trở	69
Hình 4.5. Thiết bị phân tích tổng trở và tần số cộng hưởng TRZ.....	70
Hình 4.6. Sơ đồ nguyên lý đo biên độ bằng kính hiển vi	71
Hình 4.7. Hệ thống đo Laser vibrometer	72
Hình 4.8. Sơ đồ cảm biến đo biên độ rung siêu âm	72
Hình 4.9. Hệ thống đo gia tốc kế.....	73
Hình 4.10. Sơ đồ đo biên độ rung của Cong (a) và Emmer(b).....	73
Hình 4.11. Sơ đồ mạch đo biên độ kiểu tiếp xúc dùng panme đo ngoài 1 μm	74

Hình 4.12. Đầu rung siêu âm và bộ khuếch đại	75
Hình 4.13. Đồ gá.....	75
Hình 4.14. Hệ thống thí nghiệm đo biên độ của đầu rung siêu âm	76
Hình 4.15. Gá đặt đầu cảm biến dịch chuyển.....	77
Hình 4.16. Hệ thống thí nghiệm sử dụng thiết bị phân tích trở kháng.....	78
Hình 4.17. Sơ đồ mạch điện tương đương sử dụng trong thí nghiệm	79
Hình 4.18. Tín hiệu điện áp trước và sau khi sử dụng phương pháp lọc nhiễu	79
Hình 4.19. Kết quả đo trước và sau lọc nhiễu	80
Hình 4.20. Quan hệ điện áp và thời gian	80
Hình 4.21. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 1-2).....	80
Hình 4.22. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 3-4).....	81
Hình 4.23. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 5-6).....	81
Hình 4.24. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 7-8).....	81
Hình 4.25. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 9)	81
Hình 4.26. Kết quả đo sử dụng máy phân tích trở kháng E5061B.....	83
Hình 4.27. Các thông số đo bởi máy phân tích trở kháng E5061B Network Analyzer	85
Hình 4.28. So sánh trở kháng và sơ đồ pha của phần vật liệu áp điện.....	87
Hình 4.29. So sánh trở kháng và sơ đồ pha của thiết bị rung siêu âm	87
Hình 4.30. Sự dịch chuyển của các điểm trên đỉnh của bộ khuếch đại.....	88
Hình 5.1. Các thành phần của hệ thống hàn siêu âm.....	89
Hình 5.2. Cấu tạo của bộ nguồn siêu âm.....	90
Hình 5.3. Sơ đồ cấu trúc hệ thống	90
Hình 5.4 Sơ đồ cấu trúc hệ thống cải tiến	91
Hình 5.5. Mạch điều khiển và tạo rung động siêu âm.....	92
Hình 5.6. Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển	93
Hình 5.7. Sơ đồ nguyên lý mạch tạo rung động siêu âm.....	94
Hình 5.8. Sơ đồ quan hệ giữa các phần của hệ thống mạch điều khiển.....	95
Hình 5.9. Sơ đồ khối tín hiệu đo.....	95
Hình 5.10. Khối gửi tín hiệu lệnh.....	96
Hình 5.11. Ví dụ	96
Hình 5.12. Thử nghiệm phát sung siêu âm với nhựa ở công suất đặt 2000W	97
Hình 5.13. Thử nghiệm phát sung siêu âm với gỗ ở công suất đặt 2500W	97
Hình 5.14. Vết tạo ra trên gỗ (a) và trên nhựa (b) ở công suất đặt 2500W và 2000W .	97

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1-1. So sánh giữa đầu rung từ tính và áp điện.....	11
Bảng 2.1. Bảng tính chất của vật liệu áp điện	41
Bảng 2.2. Bảng hằng số vật liệu của vật liệu áp điện.....	41
Bảng 2-3. Kích thước các bộ phận trong đầu rung siêu âm	42
Bảng 2-4. Thông số các loại vật liệu	42
Bảng 3-1. Tính chất của một số vật liệu đề xuất [58].	47
Bảng 3-2. Kích thước các bộ phận trong đầu rung siêu âm	55
Bảng 3-3. Thông số các loại vật liệu	55
Bảng 3-4. Thông số vật liệu PZT-8.....	56
Bảng 3-5. Modal và tần số tự nhiên của đầu rung.....	57
Bảng 3-6. Các thông số của đầu rung siêu âm	59
Bảng 3-7. Đặc tính vật liệu của bộ khuếch đại.....	59
Bảng 3-8. Ảnh hưởng của lưới kích thước và kiểu phần tử	62
Bảng 3-9. So sánh kết quả của các loại phần tử đối xứng trục.....	63
Bảng 4.1. Thông số kỹ thuật của đầu rung siêu âm.....	75
Bảng 4.2. Đặc tính của bộ khuếch đại	75
Bảng 4.3. Tổng hợp tần số cộng hưởng và biên độ rung động	82
Bảng 4.4. Bảng so sánh kết quả thực nghiệm và lý thuyết.....	86
Bảng 4.5. Tính chất của vật liệu PZT4	86
Bảng 4.6. Điều kiện biên của các biến thiết kế trong mô hình Kwok [50]	87
Bảng 4.7. So sánh kết quả mô phỏng số và thực nghiệm.....	88

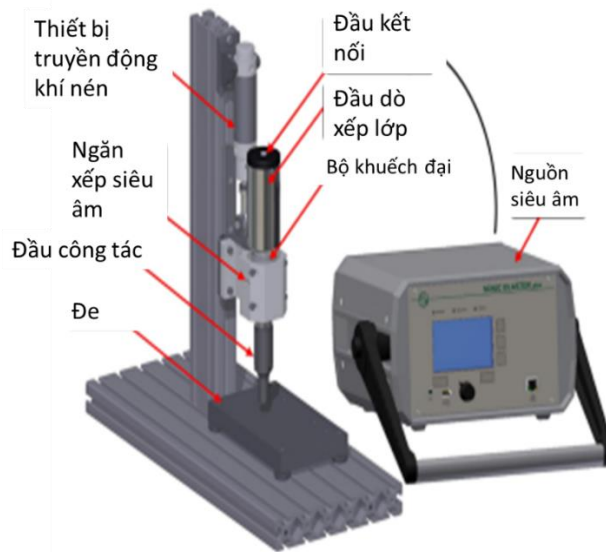
CHƯƠNG 1. ĐẶT VẤN ĐỀ VÀ NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM

1.1. Đặt vấn đề

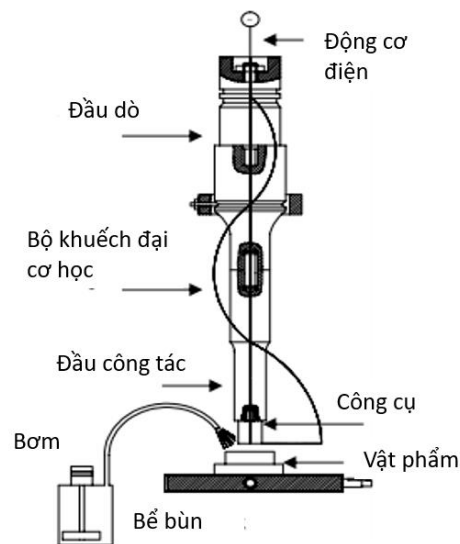
Rung động siêu âm là một loại rung động có tần số cao hơn mức con người có thể nghe được, tức là trên 20 kHz. Các ứng dụng khai thác rung động siêu âm được chia thành hai nhóm lớn: nhóm siêu âm có biên độ nhỏ, tần số cao và nhóm siêu âm có biên độ cao, tần số thấp. Siêu âm biên độ nhỏ thường có mật độ tập trung năng lượng trong khoảng từ 0,1 đến 1 W/cm², tần số thường cỡ vài MHz trở lên. Loại siêu âm này thường được ứng dụng trong soi chụp trong y học, thăm dò kiểm tra khuyết tật không phá hủy. Đã có nhiều công trình nghiên cứu trong nước về lĩnh vực này, chẳng hạn nghiên cứu [1] trong y học, nghiên cứu dò tìm hải sản bằng siêu âm [2], đánh giá độ đồng nhất của bê tông trong xây dựng [3]. Rung động siêu âm biên độ cao thường được ứng dụng trong sản xuất công nghiệp, nhằm làm thay đổi vĩnh viễn tính chất vật lý, hóa học hoặc sinh học của đối tượng được tác dụng. Cường độ công suất thường từ vài chục đến vài trăm W hoặc vài kW, tần số từ 20 đến vài trăm kHz, thậm chí đến MHz như trong tẩy rửa và xử lý hóa học. Trong những năm gần đây, rung động siêu âm được sử dụng ngày càng phổ biến trong nhiều ngành sản xuất công nghiệp, chẳng hạn: Gia công cắt gọt cơ khí; tẩy rửa siêu âm; hàn siêu âm; bôi trơn, giảm ma sát; sản xuất ô tô; chế biến thực phẩm... Kỹ thuật rung động siêu âm trợ giúp quá trình gia công cắt gọt đã cho thấy nhiều ưu điểm nổi trội, chẳng hạn: giảm lực cắt, nâng cao tuổi bền dụng cụ, cải thiện chất lượng bề mặt gia công, cắt được nhiều loại vật liệu khó gia công (thép sau nhiệt luyện, thép không gỉ, hợp kim độ bền cao...), giảm thiểu sử dụng dung dịch trơn nguội...[4-10]. Mặc dù công nghệ này đã được quan tâm từ những năm 1920 [11] và hiện đang thu hút nhiều nghiên cứu hoàn thiện và phát triển, nhưng cho đến nay hầu như chưa có tài liệu tiếng Việt nào được công bố trong lĩnh vực này. Đây vừa là khó khăn, đồng thời vừa là động lực thúc đẩy tác giả thực hiện nghiên cứu này.

Hiện nay, trên thế giới các công nghệ cắt kim loại và hàn siêu âm nói riêng, gia công cơ nói chung có sử dụng rung động cơ học ở dải tần từ 12kHz đến khoảng 70kHz để hàn nhựa và cắt kim loại là tương đối phổ biến. Các thành phần chính của hệ thống này được minh họa trên Hình 1.1. Bộ nguồn siêu âm (power supply) tạo ra tín hiệu điện cấp cho các tấm gốm áp điện của đầu rung siêu âm (hay còn gọi là bộ chuyển đổi điện-cơ siêu âm) để tạo ra rung động siêu âm, rung động này có thể được khuếch đại biên độ thông qua các bộ khuếch đại (booster) và đầu công tác (horn/ sonotrode) như

Hình 1.2. Rung động (sóng cơ học) này gây chảy vật liệu và trộn các phần tử vật liệu nóng chảy của các vật liệu hàn tạo ra mối hàn bền vững.



Hình 1.1. Các thành phần chính của hệ thống hàn nhựa hay cắt kim loại siêu âm [10]



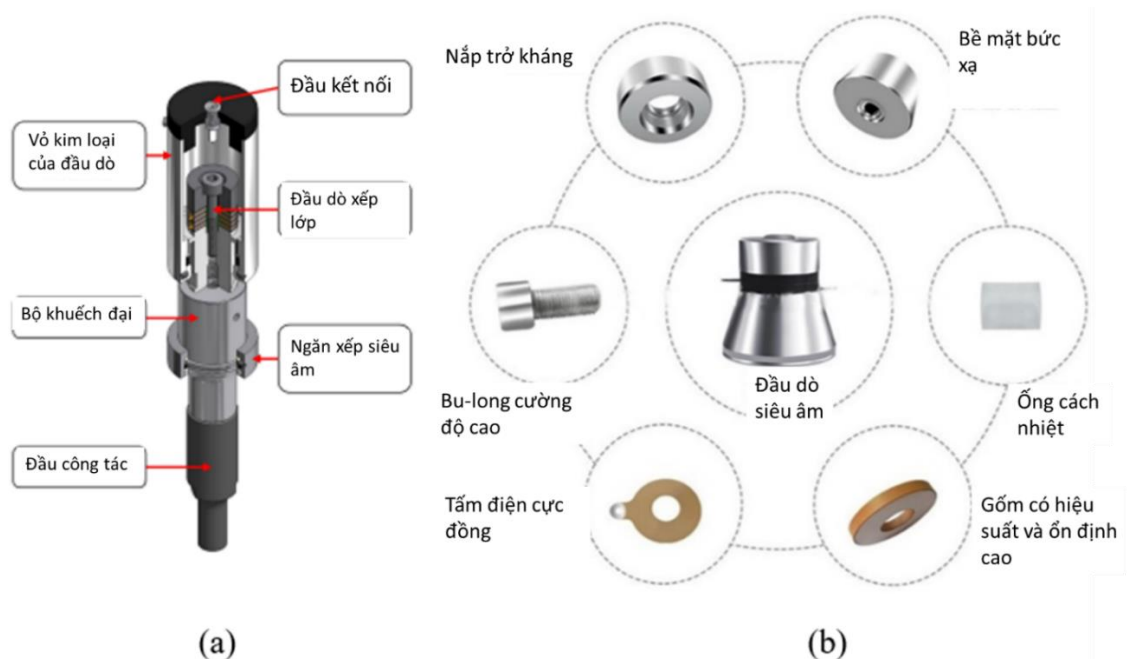
Hình 1.2 Sơ đồ nguyên lý truyền rung động (sóng) siêu âm trong cắt kim loại siêu âm [10].

Các quá trình hàn và cắt siêu âm diễn ra nhanh và hiệu quả về năng lượng, vì năng lượng siêu âm được cấp chính xác đến vùng gia công cần thiết ở dạng xung ngắn. Nhờ những tính chất ưu việt mà các công nghệ hàn, cắt siêu âm ngày càng được phát triển và ứng dụng rộng rãi, đặc biệt trong sản xuất hàng loạt. Tuy nhiên, để phát triển các ứng dụng này một cách hiệu quả thì hệ thống công nghệ đóng vai trò chủ chốt, trong đó, độ bền hay tuổi bền của các thành phần trong hệ thống cùng giá thành chế tạo các thành phần là đặc biệt quan trọng.

Trên thực tế sản xuất đã chỉ ra rằng, các bộ đầu rung siêu âm, booster và sonotrode, mà trong đó, đặc biệt là đầu rung siêu âm có tuổi bền, tuổi thọ khá hạn chế

do điều kiện làm việc và đặc tính rã của vật liệu trong chế độ biến dạng đàn hồi liên tục, theo chu kỳ. Trong khi đó, hiểu biết sâu sắc về tính toán, thiết kế và phân tích chúng còn nhiều hạn chế do tính phức tạp về vật liệu tổ hợp, điều kiện biên liên kết và đặc biệt tải trọng cơ, nhiệt là rất phức tạp. Chính vì lý do đó, đã có nhiều nhà nghiên cứu, nhiều hãng sản xuất đã tiến hành nghiên cứu về vấn đề này một cách độc lập, tuy nhiên các công bố lại khá hạn chế so với sự phát triển và mức độ ứng dụng rộng rãi của hệ thống công nghệ này trên thế giới hiện nay.

Mô hình hóa đầu rung siêu âm nói riêng, hệ thống công tác rung siêu âm biên độ cao (Hình 1.3) trợ giúp gia công cơ nói chung là vấn đề cốt lõi phục vụ thiết kế hệ thống và các thành phần của nó. Hiện nay ở nước ta, một số đầu rung siêu âm đã được ứng dụng trong các thiết bị hàn và rửa siêu âm. Các ứng dụng rung động siêu âm trong quá trình gia công cắt gọt kim loại, vật liệu dẻo (tiện, phay, khoan, mài...) hầu như chưa có. Việc phát triển nghiên cứu, khai thác ứng dụng kỹ thuật gia công mới này là một hướng rất cần thiết. Hơn nữa, các đầu rung siêu âm hiện đang sử dụng trong nghiên cứu, thực nghiệm hoàn toàn là nhập từ nước ngoài với giá thành đắt, khó khăn trong việc đặt hàng và kém tính linh hoạt khi muốn thay đổi thông số trong quá trình thực nghiệm. Vì vậy, việc chủ động trong công nghệ thiết kế, chế tạo và đánh giá các đầu rung siêu âm là rất cấp thiết.



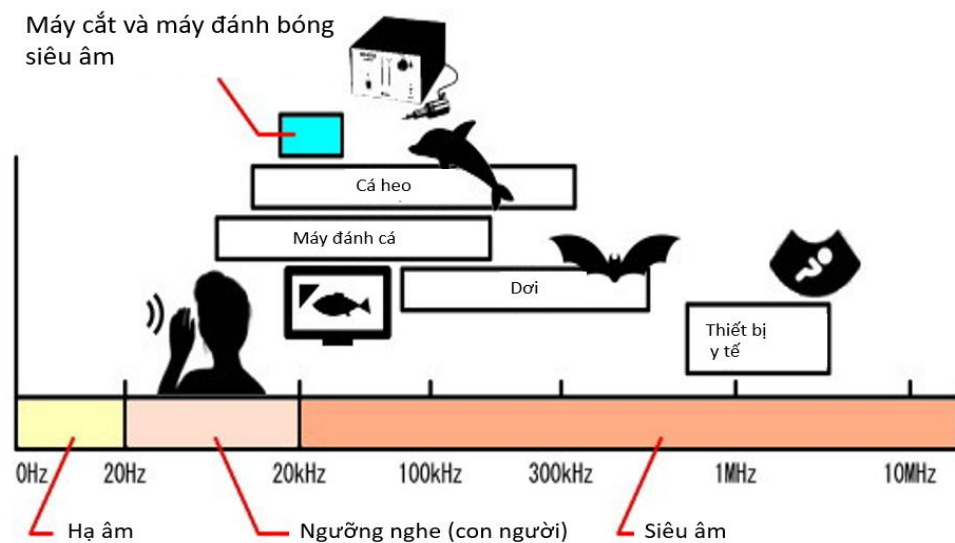
Hình 1.3 (a) Các thành phần chính của bộ công tác siêu âm;
(b) Cấu tạo của đầu rung siêu âm [10]

1.2. Tổng quan về rung động siêu âm

Rung động siêu âm là một dạng dao động cơ, có tần số vượt quá ngưỡng nghe của thính giác con người. Để phân biệt các mức độ giới hạn của rung động, thường sử

dụng giá trị ngưỡng tần số rung động như minh họa trên Hình 1.4. Ngưỡng sóng âm mà con người nghe được thường có tần số từ 20 Hz đến 20 kHz. Ngưỡng tần số rung động thấp hơn và cao hơn các giá trị giới hạn trên lần lượt được gọi là ngưỡng hạ âm và siêu âm. Một số loài động vật như chó, mèo, cá voi hay dơi có khả năng nhận biết được tần số siêu âm (> 20 kHz).

Kỹ thuật về sóng siêu âm là một nhánh của lĩnh vực âm học, liên quan đến việc tạo và khai thác ứng dụng các sóng siêu âm. Sóng siêu âm và ứng dụng của nó thực sự được quan tâm nghiên cứu, phát triển từ sau thế chiến thứ nhất (1918), sau khi Langevin phát minh ra bộ tạo rung siêu âm sử dụng vật liệu áp điện (tinh thể thạch anh).



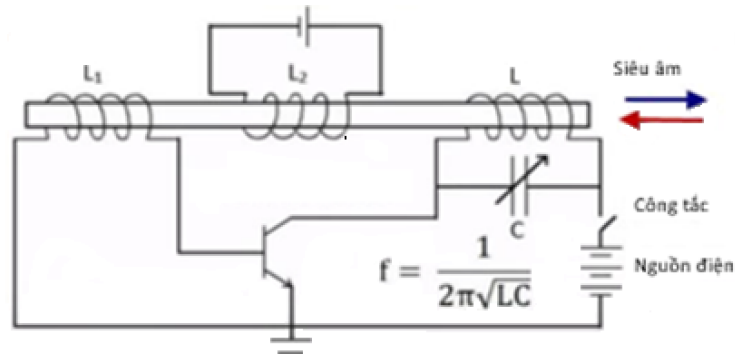
Hình 1.4. Các ngưỡng tần số rung động [12]

1.2.1. Các phương pháp tạo sóng siêu âm

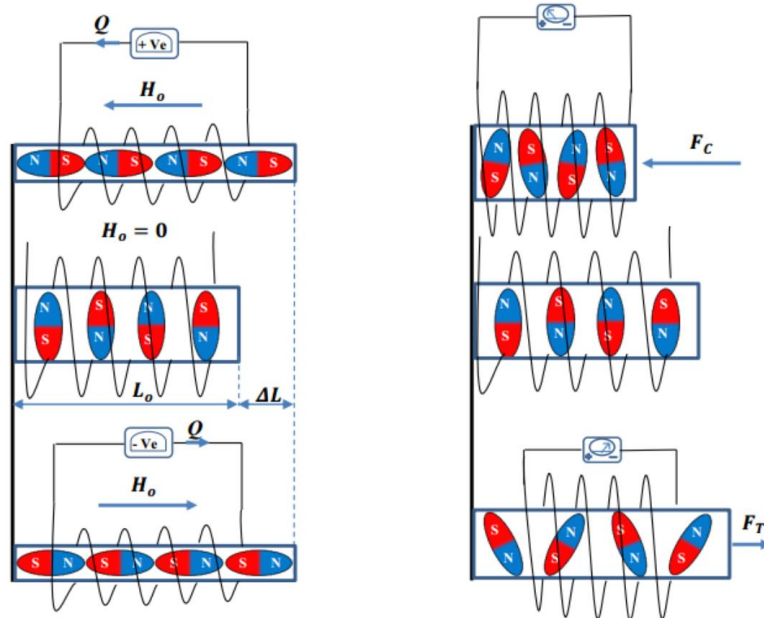
Có hai phương pháp tạo rung siêu âm thường dùng dựa trên hai hiện tượng vật lý là hiện tượng từ giảo (magnetostrictive) và hiện tượng áp điện (piezoelectric).

Phương pháp từ giảo tạo rung động siêu âm bằng cách chuyển đổi năng lượng biến thiên từ trường thành động năng cơ học. Một bộ phát rung bằng từ giảo có cấu tạo gồm một lõi phát rung đặt trong lòng một ống dây. Lõi phát rung làm bằng vật liệu kim loại từ tính, chẳng hạn như sắt từ, cobalt, niken... Điện áp có tần số siêu âm được đặt lên ống dây. Sơ đồ mạch tạo rung động siêu âm bằng phương pháp từ giảo được mô tả như Hình 1.5. Khi nằm trong vùng chịu từ trường, các vật liệu từ tính chứa các hạt mang điện tích trái dấu sẽ bị định hướng dưới tác dụng của lực từ trường theo chiều đường sức từ. Việc thay đổi hướng của từ trường do điện áp ống dây thay đổi sẽ gây nên sự thay đổi biến dạng giữa hai trạng thái dẫn và nén của tấm vật liệu, minh họa như Hình 1.6. Hiện tượng này được nhà khoa học Joule khám phá ra năm 1822 [5]. Các thiết bị sử dụng phương pháp từ giảo phù hợp với dải tần rộng (17-23kHz) và cho phép việc thiết kế đầu công tác siêu âm đa dạng, trong đó đầu công tác có thể được

thiết kế lại nhiều lần mà không có sai số nhiều về biên độ [13, 14]. Tuy nhiên, các đầu rung hoạt động bằng phương pháp từ giao chịu hao tổn điện cao và hiệu suất năng lượng thấp (<55%) [15]. Hao tổn này xuất hiện dưới dạng nhiệt năng, do đó, thiết bị phải được làm mát bằng không khí hoặc nước, kéo theo kích thước thiết bị lớn.



Hình 1.5. Mạch từ giao tạo rung siêu âm [5]

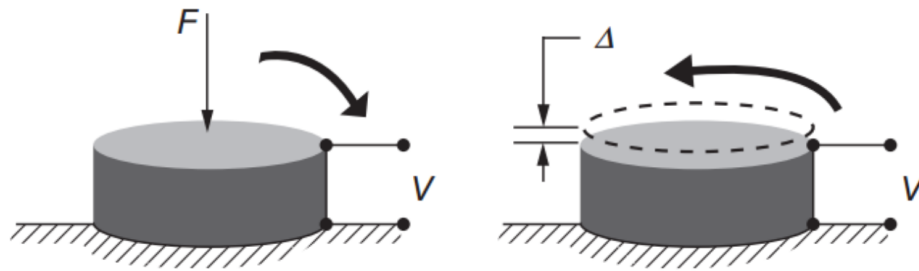


Hình 1.6. Ảnh hưởng của từ trường biến đổi đến cấu trúc vật liệu mang từ tính tạo ra dao động cơ học [5]

Xét về phương diện năng lượng rung động, các đầu rung từ giao không thể tạo cường độ rung lớn như đầu rung hoạt động bằng phương pháp áp điện [16]. Phương pháp tạo rung siêu âm bằng hiệu ứng áp điện (piezoelectric) được sử dụng phổ biến hơn so với phương pháp từ giao do có nhiều ưu điểm: tần số làm việc không bị hạn chế và thay đổi dễ dàng, hiệu suất chuyển đổi năng lượng điện-cơ cao (khoảng 95 %) và không gây tiếng ồn khi làm việc. Trong khi đó, đầu rung từ giao có tần số làm việc bị hạn chế (< 30 kHz) và khó thay đổi, hiệu suất chuyển đổi điện-cơ thấp (< 50 %) và gây tiếng ồn lớn khi làm việc (> 85 dB).

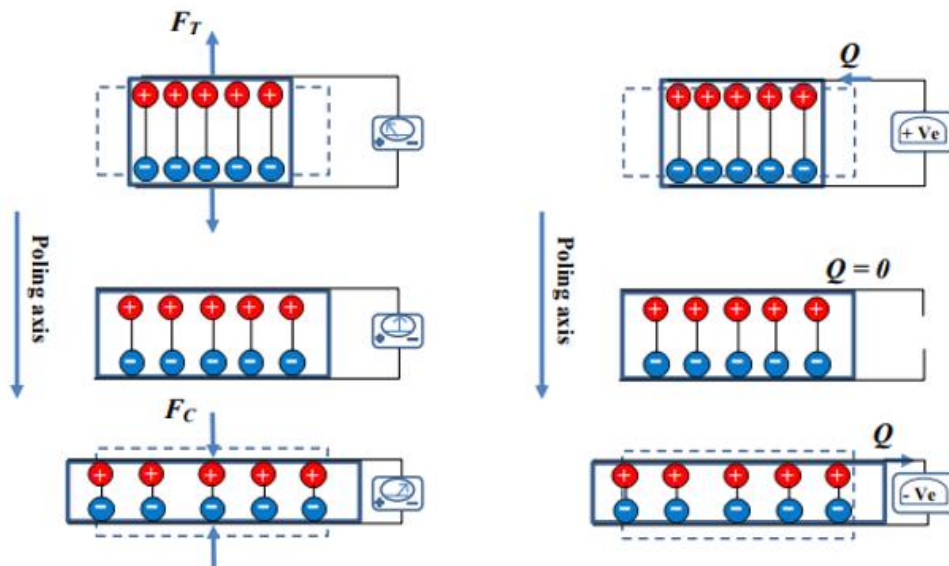
Hiệu ứng áp điện được mô tả như sau: khi tác dụng một lực lên một tấm vật liệu áp điện sẽ sinh ra một điện áp tại hai cực của tấm. Ngược lại, nếu đặt một điện áp thay

đổi lên hai mặt của tấm sẽ gây nên sự thay đổi về biến dạng. Hình 1.7 mô tả ứng xử thuận nghịch của vật liệu áp điện.



Hình 1.7. Hiệu ứng áp điện [17]

Cụ thể như trong Hình 1.8, khi một lực nén cơ học, F_C hoặc F_T , tác dụng lên một vật liệu áp điện, cấu trúc tinh thể tạo ra sự khác biệt năng lượng, và do đó một điện tích Q được tạo ra tỷ lệ thuận với lực tác dụng. Hành vi này được gọi là hiệu ứng áp điện trực tiếp. Ngược lại, hiệu ứng áp điện nghịch đảo xảy ra khi một điện trường được áp dụng trên vật liệu. Các phân tử phân cực sẽ tự sắp xếp phù hợp với điện trường, gây ra lưỡng cực điện trong cấu trúc phân tử hoặc tinh thể của vật liệu. Sự sắp xếp lại phân tử này gây ra sự thay đổi kích thước vật liệu. Vật liệu áp điện bao gồm các vật liệu tự nhiên như thạch anh và muối Rochelle hoặc vật liệu được sản xuất, có hiệu suất tốt hơn, như chì Zirconate Titanate (PZT) và Barium Titanate. Báo cáo đầu tiên về hiệu ứng áp điện trực tiếp vào năm 1880 bởi Curie trong khi hiệu ứng áp điện nghịch đảo có nguồn gốc toán học từ các nguyên tắc cơ bản của nguyên lý nhiệt động lực học của Lippmann vào năm 1881. Những hiệu ứng này được thể hiện trong Hình 1.8, trong đó trục poling đại diện cho hướng của hiệu ứng áp điện [18, 19].



Hình 1.8. Ảnh hưởng áp điện trực tiếp (trái) và ảnh hưởng áp điện ngược (phải) [20]

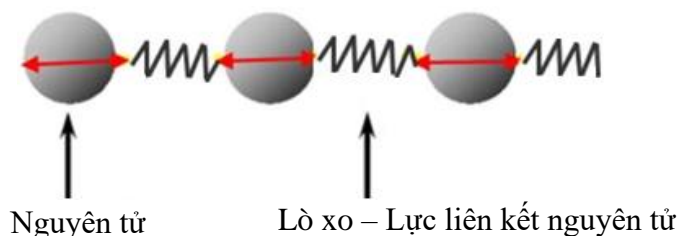
Có hai dạng kết cấu phổ biến tạo rung siêu âm bằng hiệu ứng áp điện là: kết cấu sử dụng gốm PZT dạng tấm mỏng xếp chồng (Hình 1.9a) và kết cấu sử dụng gốm PZT dạng đĩa lắp ghép theo kiểu “sandwich” (Hình 1.9b).



Hình 1.9. Kết cấu PZT: (a) dạng màng mỏng; (b) dạng Sandwich [19]

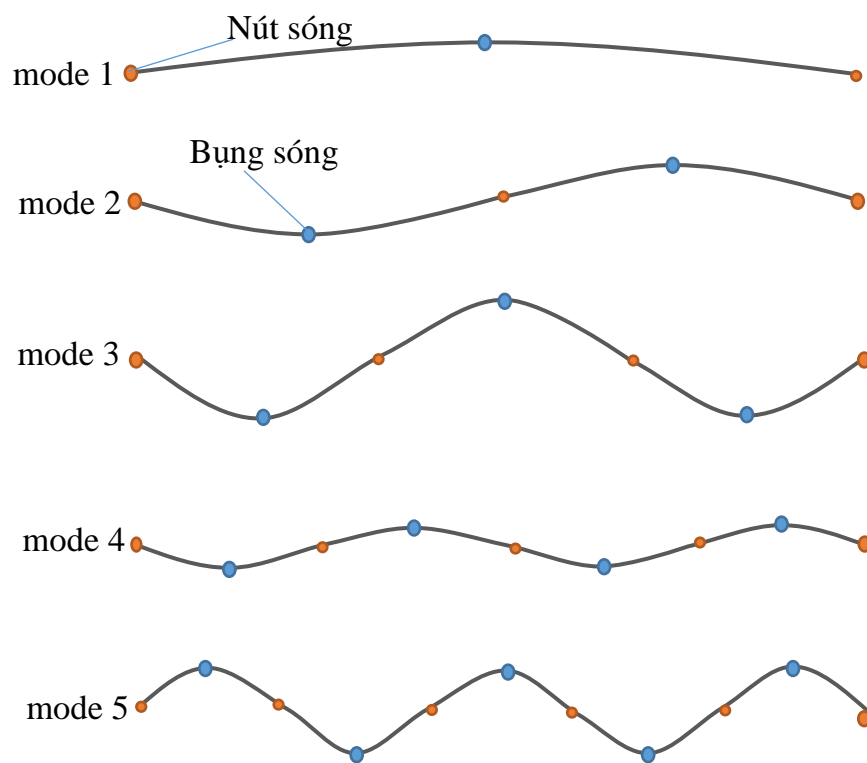
VỀ nguyên tắc truyền rung động siêu âm:

Rung động siêu âm được truyền trong môi trường dưới dạng sóng. Dạng quỹ đạo truyền sóng được xác định dựa vào khoảng thời gian biến dạng hoặc rung động trong các vật liệu mà sóng truyền qua. Trong lòng bất kỳ vật liệu nào cũng chứa các nguyên tử được liên kết với nhau. Có thể mô tả liên kết giữa các nguyên tử dưới dạng gắn móc với nhau bởi các lò xo như minh họa trên Hình 1.10. Khi năng lượng siêu âm truyền đến, năng lượng này làm xô lệch các nguyên tử khỏi vị trí cân bằng, kéo theo sự mất cân bằng của các nguyên tử lân cận. Cứ như vậy, năng lượng rung động được truyền qua vật liệu đến các vị trí khác trong lòng vật thể.



Hình 1.10. Mô hình liên kết phân tử

Trong kỹ thuật, với các hệ thống động lực, sự truyền sóng rung động thường được mô tả dưới dạng các mode rung động. Mỗi mode rung động là một hình ảnh của trạng thái sóng dừng có dạng hình sin ở một tần số đặc trưng. Mỗi hệ thống động lực có thể được kích thích dưới nhiều mode rung động. Một mode rung động được đặc trưng bởi tần số và hình dạng mode. Số lượng mode rung động của một kết cấu phụ thuộc vào tần số rung động kích thích. Hình 1.11 mô tả một số mode truyền sóng có đánh dấu các điểm nút (điểm không rung động) và các điểm bụng sóng (điểm có rung động với biên độ lớn nhất).

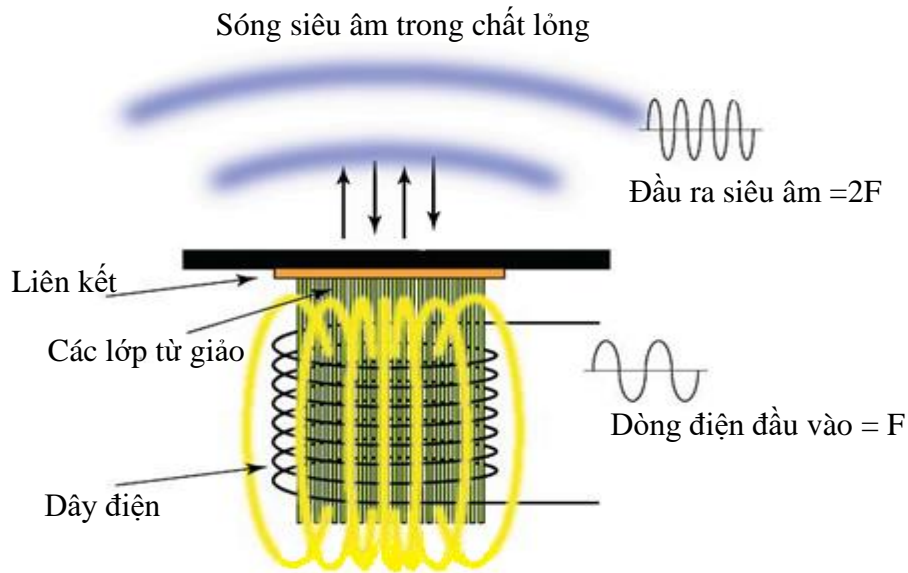


Hình 1.11. Hình dạng một số mode truyền sóng

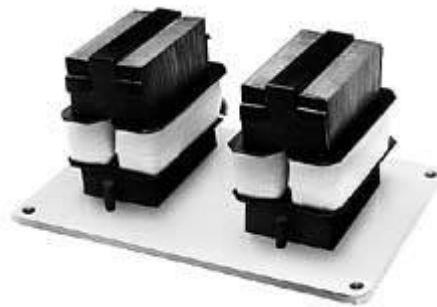
1.2.2. Đầu rung siêu âm

Trong truyền năng lượng siêu âm, hiệu ứng từ tính và hiệu ứng áp điện gián tiếp được sử dụng để chuyển đổi năng lượng dòng điện xoay chiều thành năng lượng sóng âm ở tần số cao. Do đó, đầu rung siêu âm có thể là từ giảo hoặc áp điện.

Một dạng đơn giản của đầu rung từ giảo bao gồm lõi vật liệu sắt từ được liên kết bằng dây dẫn. Khi một dòng điện được truyền vào dây ở một tần số nhất định, một từ trường được tạo ra và gây ra sự định hướng lại các miền của lõi tự căn chỉnh dọc theo hướng của trường ứng dụng. Một cuộn dây điện tạo ra một từ trường rung động làm cho các lớp sắt từ tính rung động ở tần số cộng hưởng của chúng. Tần số rung động sẽ gấp đôi tần số của tần số xung tác dụng.

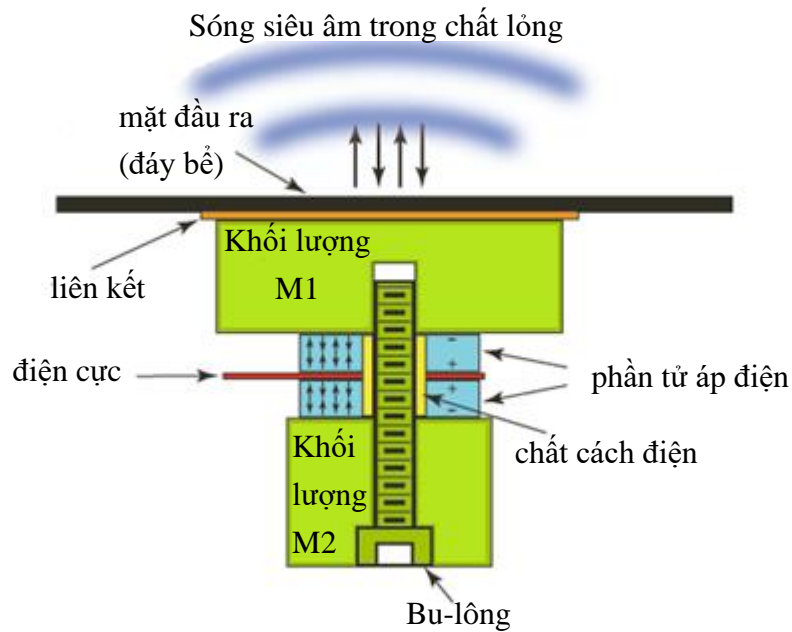


Hình 1.12. Sơ đồ một đầu rung siêu âm từ tính điện hình

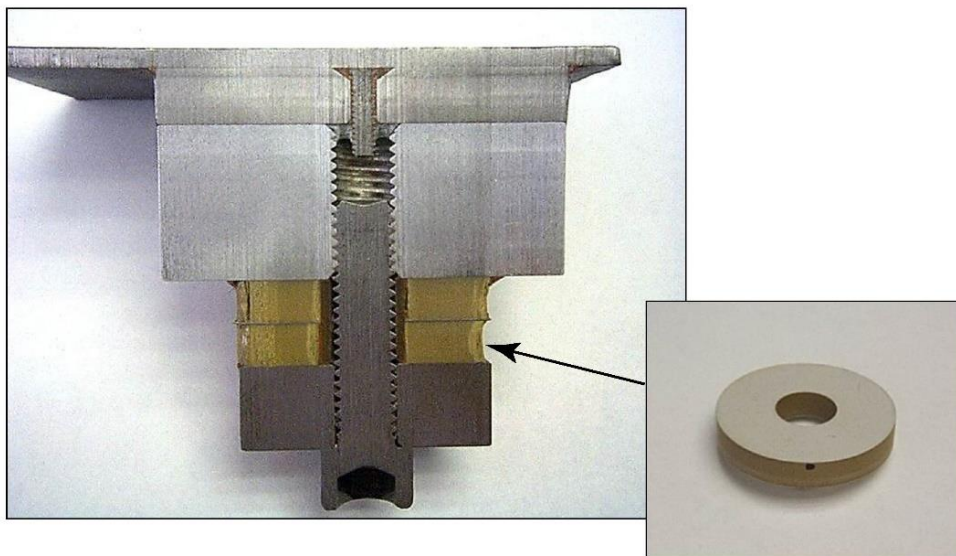


Hình 1.13. Minh họa một đầu rung siêu âm từ giảo.

Loại đầu rung áp điện phổ biến nhất, được gọi là đầu rung Langevin và đôi khi được gọi là vòng sandwich hoặc đầu rung xếp chồng, bao gồm các phần tử áp điện được kẹp giữa các điện cực và được ứng suất trước bởi khối lượng trước và sau các lớp như trong Hình 1.14. Các phần tử áp điện tạo ra sóng âm ở cả hướng trước và sau, tuy nhiên chức năng của khối phía sau là khuyến khích sự lan truyền sóng theo hướng thuận. Điều này đạt được bằng cách sử dụng khối sau có trở kháng sóng âm cao hơn khối phía trước, truyền năng lượng sóng âm đến tải.



Hình 1.14. Sơ đồ một bộ chuyển đổi siêu âm Langevin điển hình [20]



Hình 1.15. Hình ảnh mặt cắt ngang của một đầu rung siêu âm áp điện điển hình.

(Hình nhỏ minh họa cho vòng gốm áp điện được "kẹp" giữa hai khối)[20]

Tương tự như một đầu rung từ giảo, các đầu rung áp điện bị kích thích bởi một dòng điện được truyền đến các phần tử áp điện thông qua các điện cực làm cho các phần tử rung ở cùng tần số với các xung kích thích. Tuy nhiên, các ứng dụng thực tiễn đã chứng minh rằng các đầu rung áp điện có các đặc tính tốt hơn so với các đầu rung từ giảo trong các lĩnh vực ứng dụng siêu âm khác nhau, điều này được liệt kê trong Bảng 1-1.

Bảng 1-1. So sánh giữa đầu rung từ tính và áp điện.

Đầu rung từ giảo	Đầu rung áp điện
1- Hiệu suất tổng thể của việc chuyển đổi năng lượng điện thành năng lượng cơ học thấp và trong một số trường hợp chỉ là 50-60%.	1- Các thiết bị hiệu quả trong đó phần lớn năng lượng điện được chuyển đổi thành năng lượng cơ học và hiệu suất tổng thể có thể đạt tới 90%
2- Các thiết bị kích thước lớn có thể yêu cầu các phương pháp làm mát đặc biệt để giữ các thành phần trong nhiệt độ hoạt động chấp nhận được.	2- Chúng là những thiết bị tương đối nhỏ và nhẹ, không yêu cầu làm mát đáng kể. Đáng tin cậy cho hoạt động lâu dài
3- Yêu cầu các linh kiện điện tử đắt tiền và lớn có khả năng chịu được nhiệt độ hoạt động cao.	3- Ổn định trên một phạm vi nhiệt độ rộng, nhưng có thể bị ảnh hưởng bởi việc sử dụng lâu dài ở nhiệt độ cao.
4- Bị ảnh hưởng bởi các trường điện từ xung quanh làm hạn chế việc sử dụng nó cho môi trường đó.	4- Không bị ảnh hưởng bởi trường điện từ bên ngoài.
5- Yêu cầu vỏ máy phát điện lớn có thể hạn chế tính linh hoạt của việc sử dụng cho nhiều ứng dụng.	5- Đơn giản, đáng tin cậy và rất mạnh mẽ. Có thể được sử dụng trong các lĩnh vực khác nhau của công nghiệp, y tế, and các ứng dụng không gian vũ trụ...
6- Tần số hoạt động điển hình nhỏ hơn 30kHz giới hạn việc sử dụng trong các ứng dụng tần số cao	6- Có thể được thiết kế cho một loạt các tần số dựa trên các yêu cầu của ứng dụng.

Ngoài những điểm trên, cấu hình của đầu rung dạng Langevin còn có nhiều ưu điểm khác có thể tóm tắt như sau [20, 21]:

1- Có thể áp dụng ứng suất trước cơ học cho các phần tử áp điện bằng bu lông trung tâm. Điều này sẽ làm giảm trở kháng điện của đầu rung, tăng biên độ ứng suất động tạo ra và tăng tối đa cường độ công suất. Bu lông cũng ngăn ngừa gãy các phần tử áp điện trong nửa chu kỳ mở rộng và cải thiện sự tiếp xúc cơ học giữa các bộ phận đầu rung, do đó, làm giảm tổn thất cơ học.

2- Khối lượng bổ sung (khối kim loại) sẽ làm tăng độ bền cơ học và hệ số chất lượng cơ học của đầu rung.

3- Vật liệu áp điện có khả năng chịu nhiệt kém sẽ được bù đắp bởi các khối kim loại hoạt động như tản nhiệt. Do đó, cấu hình Langevin cho phép bộ chuyển đổi được điều khiển ở tần số cao hơn, ở nơi nhiệt độ cao có thể xảy ra.

4- Các khối kim loại mang lại sự linh hoạt cho việc thiết kế các hình dạng và kích thước khác nhau.

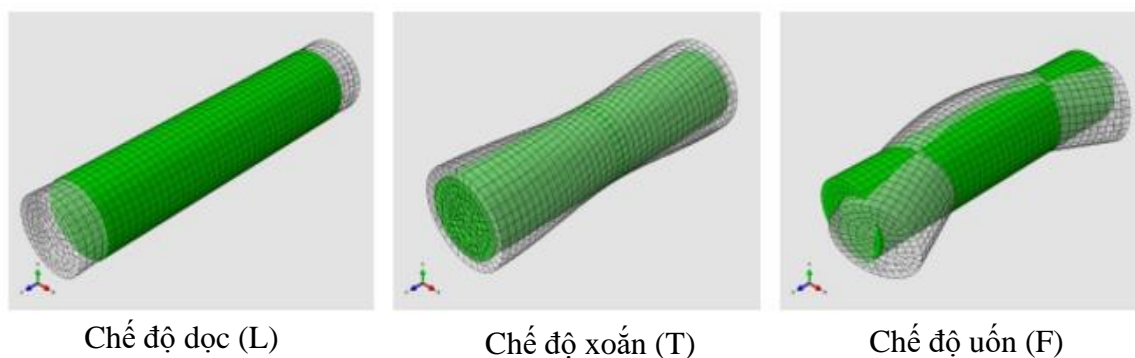
5- Các khối kim loại thay thế vật liệu áp điện đắt tiền cần thiết để đạt được bước sóng cần thiết của tần số, do đó chi phí đầu rung sẽ giảm.

6- Các khối kim loại giúp hướng dẫn phần lớn năng lượng sóng âm được tạo ra theo hướng ứng dụng thay vì nó chia đều theo cả hai hướng.

1.2.3. Các chế độ rung động siêu âm

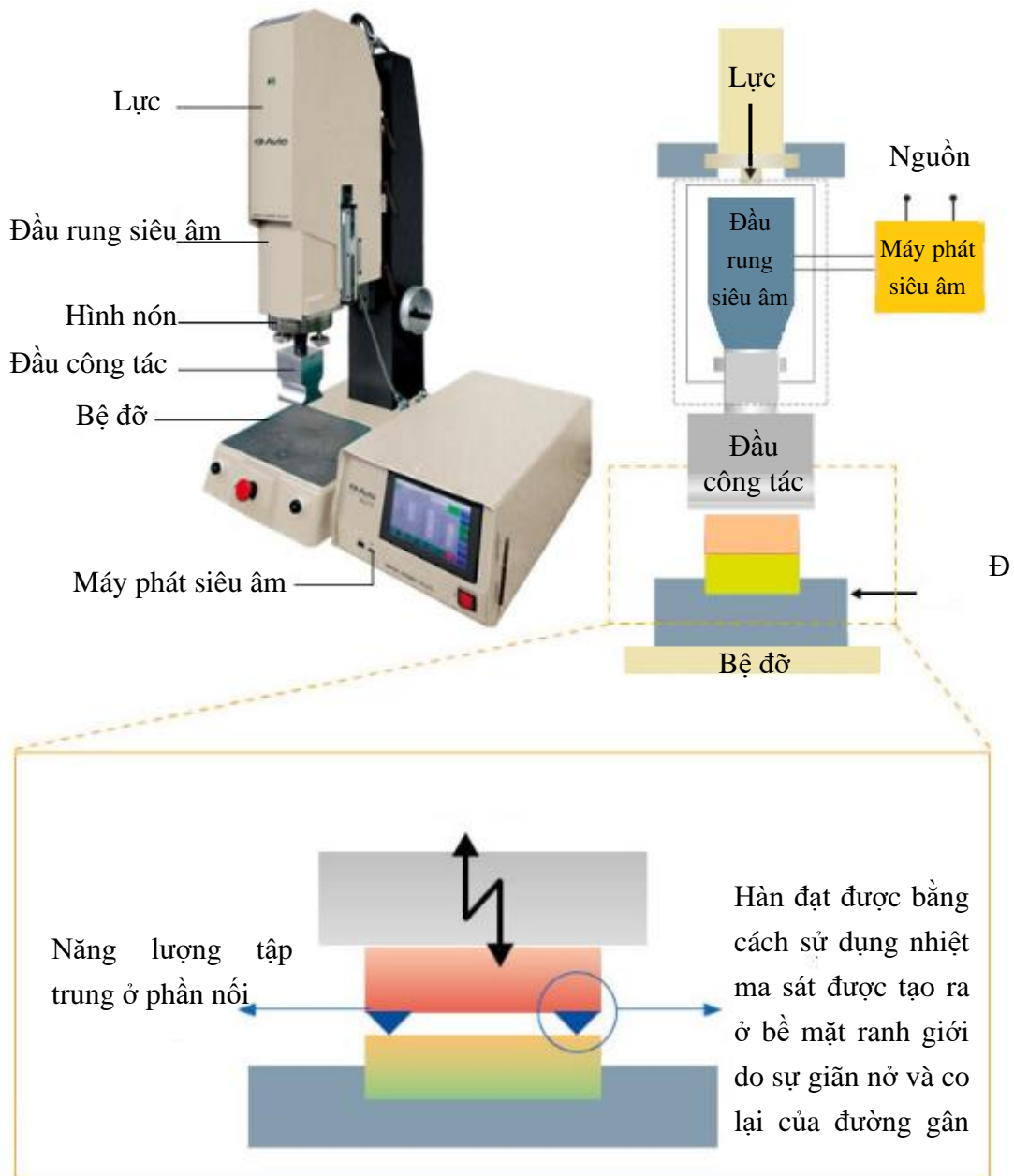
Khi một phân tử áp điện được xung điện, nó tạo ra một sóng rung có biên độ nhỏ, không đủ cho nhiều ứng dụng siêu âm. Để khắc phục hạn chế này, các đầu rung sử dụng hình dạng chế độ của hình học cấu trúc để khuếch đại biên độ này. Trong các đầu rung sandwich ứng suất trước, khối lượng phía trước và phía sau được sử dụng để sửa đổi chiều dài cộng hưởng của cấu trúc để đầu rung sẽ rung động khi cộng hưởng.

Dựa trên ứng dụng cần thiết, việc lựa chọn chế độ rung được xem xét và sau đó các thông số thiết kế khác của các bộ phận đầu rung được quyết định. Nói chung, đầu rung siêu âm sử dụng một chế độ rung có thể là chế độ dọc (L), chế độ xoắn (T) hoặc chế độ uốn (F) như trong Hình 1.16. Tuy nhiên, cũng có thể kết hợp các chế độ rung này để tạo ra một hình dạng chuyển động mới. Các kết hợp có thể có là các chế độ rung dọc-xoắn (LT), dọc-uốn (LF) và xoắn-uốn (TF) đã được chứng minh là hữu ích trong nhiều ứng dụng hiện đại [22].



Hình 1.16. Các chế độ rung động từ mô hình phần tử hữu hạn cho thanh [22]

Chế độ rung dọc (L) được sử dụng trong nhiều ứng dụng siêu âm như cắt siêu âm, hàn siêu âm, các thiết bị y tế... Trong chế độ này, rung động lan truyền trong môi trường theo một chiều dọc theo hướng sóng lan truyền. Chế độ L được sử dụng thường xuyên nhất do tính chất đơn giản trong thiết kế và kích thích, cũng như hiệu quả cao trong việc chuyển đổi năng lượng điện thành năng lượng cơ học [23- 26].



Hình 1.17. Thiết bị hàn siêu âm, sử dụng chế độ rung dọc (L) [23]

1.2.4. Các phương pháp mô hình hóa

Cho đến những năm 1980, khả năng ứng dụng của các hệ thống rung động siêu âm bị hạn chế do thiếu một phương pháp hiệu quả để dự đoán chính xác hiệu suất của hệ thống. Trước thời điểm đó, các phương pháp giải tích và thử nghiệm đã tham gia vào việc phân tích đầu công tác của thiết bị siêu âm. Điều này đòi hỏi phải chế tạo một số lượng lớn các mẫu và không có giá trị sử dụng nếu việc thử nghiệm không thành công. Tuy nhiên, phương pháp này là phương pháp duy nhất có thể chấp nhận được, cung cấp một phương tiện để tìm được các horn tốt nhất cho các ứng dụng thực tế. Phương pháp này cũng tạo ra một tập hợp dữ liệu có thể được sử dụng để phát triển một phương pháp tính toán các hệ thống đầu rung Langevin [23].

Ngày nay, mô hình toán học, bao gồm các phương pháp giải tích và phương pháp số, kết hợp với các phương pháp nghiên cứu thực nghiệm được sử dụng để thiết kế, phát triển và kiểm tra hiệu suất của các hệ thống rung động siêu âm. Các phương pháp giải tích, liên quan đến việc sử dụng phương trình sóng và các mối quan hệ mô tả sự lan truyền sóng trong môi trường đàn hồi được sử dụng để thu được các biểu thức quan hệ. Tuy nhiên, nhiều hệ thống phức tạp khiến cho việc theo dõi hành vi của chúng bằng cách sử dụng các công thức này gặp rất nhiều khó khăn. Khi đó, các phương pháp số được sử dụng thay thế để mô phỏng và phân tích các hệ thống này. Mỗi phương pháp đều đi kèm với những ưu điểm và hạn chế.

a. Phương pháp giải tích

Phương pháp giải tích là một biểu diễn toán học của hệ thống, trong đó hành vi và thay đổi của hệ thống có thể được mô tả thông qua một tập hợp các phương trình. Trong rung động siêu âm, phương trình sóng được sử dụng để nghiên cứu chuyển động là mô hình sóng dọc. Vào đầu những năm 1940, phương trình sóng một chiều trong môi trường rắn đàn hồi đã được sử dụng rộng rãi để thiết kế và cải tiến đầu công tác của thiết bị siêu âm [27, 28]. Tuy nhiên, người ta thấy rằng nghiệm giải tích của phương trình sóng trong vật liệu áp điện rất khó rút ra được thông qua các phương pháp tìm nghiệm trực tiếp [29].

Năm 1948, Mason đã chứng minh rằng trong phân tích một chiều về vật liệu áp điện, hầu hết những khó khăn trong việc dẫn ra nghiệm có thể được khắc phục bằng cách mượn ý tưởng từ lý thuyết mạch điện. Phương pháp mạch tương đương của Mason đã được sử dụng rộng rãi và các phương pháp tiếp cận tương đương khác cũng được rút ra dựa trên các nguyên tắc tương tự. Một số ví dụ về mô hình một chiều của đầu rung áp điện có thể được tìm thấy trong tài liệu [30-34].

Phương trình sóng nhiều chiều cũng được sử dụng trong mô hình hóa vật liệu áp điện. Mô hình hai chiều đầu tiên được đề xuất vào năm 1985 bởi Hutchens [35]. Tuy nhiên, các mô hình như vậy thường tốn kém về thời gian để tìm nghiệm và cũng thường không thực tế cho mục đích mô hình hóa ứng xử động lực của hệ thống rung siêu âm. Hầu hết các mô hình nhiều chiều chỉ xử lý vật liệu áp điện và không có lợi cho mô hình đầu rung nhiều lớp [36].

Đối với trường hợp của đầu rung Langevin, Shuyu đã sử dụng phương pháp tiếp cận mạch tương đương để mô hình hóa khớp nối giữa các mô hình tiếp cận [37] và sự thoái hóa của mô hình ở chế độ rung dọc [38] trong đầu rung sandwich. Nghiệm tổng quát là sự chồng chất của các phương trình sóng một chiều cho các rung động dọc và xoắn trong đó hai nhánh của mạch tương đương Mason được sử dụng để giải các phương trình chuyển động sóng cho các mô hình.

Kết quả nhận được từ phương pháp giải tích thường không chính xác khi so sánh với thực tế do sự đơn giản hóa mô hình thực. Phương pháp giải tích có thể áp dụng cho một hệ thống hình học tương đối đơn giản, trong khi có những khó khăn trong việc tìm nghiệm cho các mô hình phức tạp. Phương pháp cũng gây khó khăn khi tìm nghiệm cho mô hình nhiều vật liệu, cũng như các điều kiện tải và điều kiện biên phức tạp. Phương pháp giải tích đòi hỏi người nghiên cứu phải có kiến thức chi tiết về hệ thống và thành thực các kỹ thuật tìm nghiệm của các dạng phương trình đạo hàm riêng. Các nghiệm tìm được thường đáp ứng cho việc xác định các mối quan hệ của các tham số mô hình. Tuy nhiên, phương pháp giải tích không tốn kém về thời gian cần thiết chạy chương trình tính để tìm nghiệm và có thể cung cấp một mô tả sơ bộ về hệ thống, khám phá các khía cạnh khác nhau của hệ thống mà có thể không thực hiện được thông qua các phương pháp mô hình hóa khác.

b. Phương pháp số

Các phương pháp số, chẳng hạn như phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), cũng là một phương pháp toán học sử dụng quy trình bước thời gian bằng số để tìm nghiệm gần đúng cho các phương trình chi phối hành vi ứng xử của hệ thống. Quá trình tạo và xử lý phương pháp số dựa trên FEM bao gồm: lý tưởng hóa hình học hệ thống, xác định các thuộc tính vật liệu và điều kiện biên, phân tách hệ thống thành một mô hình phần tử hữu hạn và sau đó phân tích dựa trên các kết quả cần thiết. Do đó, độ chính xác của kết quả của FEM phụ thuộc rất nhiều vào độ chính xác của việc thực hiện các bước này.

FEM lần đầu tiên được áp dụng cho vật liệu áp điện bởi một số tác giả vào cuối những năm 1960 và đầu những năm 1970. Các tác giả như Allik và Hughes đã xây dựng các mô hình FE cho các phương tiện áp điện ba chiều [39]. Công thức này được phát triển và vi tính hóa để phân tích một đầu rung áp điện ba chiều phức tạp vào năm 1974 [40]. Trong những năm tiếp theo, FEM ngày càng trở nên phổ biến cho việc mô hình hóa các hệ thống áp điện. Tuy nhiên, phương pháp này đã không được sử dụng rộng rãi cho đến năm 1986 khi các phần tử áp điện được đưa vào gói phần mềm phần tử hữu hạn thương mại [41]. Với sự ra đời của máy tính và sự phát triển của các mã FE khác nhau, người ta đã có thể thực hiện các loại phân tích khác nhau như phân tích tức thời quy mô lớn cho các hệ thống áp điện.

Các phương pháp số có một số lợi thế so với các phương pháp giải tích. Các phương trình xây dựng trực quan hơn và các thủ tục cơ bản giống nhau bất kể độ phức tạp của hệ thống, do đó, các mô hình thực tế hơn, có độ phức tạp cao hơn có thể được nghiên cứu. Hạn chế chính của phương pháp số là chi phí về thời gian tính toán và yêu cầu cấu hình máy tính hỗ trợ. Những nhược điểm khác như phải có kiến thức, hiểu biết nhất định để đánh giá các tham số cần thiết khi đưa vào mô hình tính toán, phân tích.

1.3. Kết luận

Mô hình hóa đầu rung siêu âm nói riêng, hệ thống công tác rung siêu âm biên độ cao trợ giúp gia công cơ nói chung là vấn đề cốt lõi phục vụ thiết kế hệ thống cũng như các thành phần của hệ thống.

Mặc dù ứng dụng rung siêu âm đã và đang được phát triển mạnh mẽ trên thế giới, tuy nhiên, hướng nghiên cứu này vẫn còn nhiều vấn đề còn rộng mở, chẳng hạn như xây dựng mô hình rung động của đầu rung nói riêng và các thành phần trong hệ thống nói chung khi có tác động của tải trọng công tác, đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố kỹ thuật và công nghệ đến đặc tính cộng hưởng của đầu rung như độ sai lệch gia công cơ, hiện tượng rã của vật liệu gốm áp điện, nhiệt phát sinh trong dây gốm áp điện, vv. Vì vậy, việc triển khai đề tài “**Nghiên cứu động lực học phi tuyến thiết bị rung siêu âm cường độ cao**” nhằm xây dựng được mô hình rung động có tải thay đổi cho đầu rung siêu âm trong gia công có trợ giúp của rung động siêu âm vừa có tính thời sự khoa học ở tầm quốc tế, vừa mang tính khai phóng ứng dụng trong nước, đồng thời góp phần hình thành và phát triển các nhóm nghiên cứu mạnh của Trường.

Để thực hiện mục tiêu trên, đề tài đã tập trung vào những nội dung chính sau:

- 1) Xây dựng mô hình giải tích và chương trình tính phân tích đáp ứng điện trở phức của đầu rung siêu âm.
- 2) Xây dựng mô hình phân tử hữu hạn trên phần mềm ABAQUS cho đầu rung siêu âm phục vụ cho thiết kế, phân tích và đánh giá thiết kế đầu rung siêu âm.
- 3) Phát triển hệ thống thí nghiệm đo lường các đặc tính điện, cơ của đầu rung siêu âm.
- 4) Phát triển bộ nguồn rung siêu âm đa dải tần, có điều khiển, định hướng tự động xác lập điểm làm việc cho đầu rung khi tải thay đổi.
- 5) Thiết kế, chế tạo thử nghiệm đầu rung siêu âm dùng cho hàn siêu âm.

Và các chương tiếp theo sẽ trình bày tóm tắt các kết quả nghiên cứu của các nội dung chính nói trên.

CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHÂN TÍCH RUNG ĐỘNG CỦA ĐẦU RUNG SIÊU ÂM BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH

Rung động siêu âm được truyền trong môi trường dưới dạng sóng. Sóng là một dao động truyền trong không gian theo thời gian, vận chuyển hoặc biến đổi năng lượng. Sóng có thể được phân thành hai loại tùy theo chuyển động: sóng điện từ (có thể lan truyền trong chân không) và sóng cơ học (cần có môi trường truyền sóng). Trong nghiên cứu này, sóng cơ học trong môi trường chất rắn đàn hồi đẳng hướng giới hạn được xem xét.

Đối với thiết bị hàn siêu âm, chế độ rung động dọc được sử dụng. Ở chế độ này, rung động lan truyền trong môi trường theo chiều dọc cùng với hướng sóng lan truyền. Do vậy, để tìm hiểu đặc tính chuyển động của sóng trong đầu rung siêu âm, đề tài đã mô hình hóa đầu rung siêu âm như một dầm đàn hồi và xem xét bài toán rung động dọc của dầm tự do ở hai đầu và điều kiện biên giữa các phần của dầm là chuyển vị liên tục.

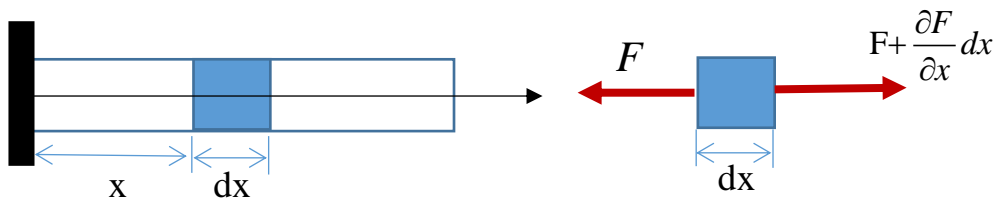
2.1. Chuyển động sóng trong vật rắn đàn hồi

Xét một thanh thẳng, đồng nhất chịu một trường ứng suất thay đổi $\sigma(x, t)$, với x là vị trí điểm dọc theo mặt cắt của thanh, t là thời gian. Các mặt phẳng song song với các mặt cắt được giả định là vẫn song song khi biến dạng. Do đó, tồn tại sự phân bố ứng suất đồng đều dọc theo mặt cắt và có thể được thể hiện như sau:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

trong đó F là tải trọng tác dụng, S là diện tích mặt cắt ngang vuông góc với phương x của thanh.

Sự dịch chuyển theo chiều dọc của mặt cắt ngang được đưa ra bởi hàm $u(x, t)$ [27, 28]. Khi đó, phương trình dao động dọc trục x có thể được đưa ra bằng cách áp dụng nguyên lý D'Alembert cho một phần tử vi phân như trong Hình 2.1:



Hình 2.1. Lực tác dụng lên phần tử vi phân của thanh đồng chất

$$\rho(x)S(x)dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -F + (F + \frac{\partial F}{\partial x} dx)$$

Suy ra:

$$\rho(x)S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (2.2)$$

Mà $F = E.S(x) \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$ nên:

$$\rho(x)S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E.S(x) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.3)$$

Khi $\rho(x)$, $S(x)$ là các hằng số, ta nhận được phương trình dao động dọc tự do của thanh thẳng đồng chất, tiết diện không đổi:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

Trong đó $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ là vận tốc truyền sóng dọc trong thanh. Phương trình sóng (2.4)

là phương trình đạo hàm riêng cấp hai để phân tích chuyển động sóng một chiều trong môi trường đàn hồi.

Để giải phương trình (2.4) bằng phương pháp D'Alembert, thực hiện phép biến đổi:

$$\begin{aligned} \xi &= x - ct \\ \eta &= x + ct \end{aligned} \quad (2.5)$$

Do:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \\ \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = c \left(-\frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} &= c^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} - 2 \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Thay vào phương trình (2.4), nhận được:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} = 0 \quad (2.7)$$

Nghiệm tổng quát của phương trình (2.7) có dạng:

$$u(\xi, \eta) = f_1(\xi) + f_2(\eta) \quad (2.8)$$

Trong đó f_1, f_2 là các hàm nào đó và được xác định từ điều kiện đầu.

Chú ý phép biến đổi (2.5), biểu thức (2.8) được viết lại

$$u(x, t) = f_1(x - ct) + f_2(x + ct) \quad (2.9)$$

Nghiệm (2.9) được gọi là nghiệm D'Alembert của phương trình sóng (2.4).

Nếu thay đổi số $(x - ct)$ của hàm f_1 bằng đổi số mới, trong đó thời gian t thay bằng $t^* = t + \tau$, vị trí x thay bằng $x^* = x + c\tau$, thì ta có:

$$f_1(x - ct) = f_1(x^* - c\tau - ct^* + c\tau) = f_1(x^* - ct^*)$$

Như thế, hàm $f_1(x - ct)$ mô tả một sóng lan truyền theo chiều x dương với vận tốc c không đổi và không làm dạng sóng thay đổi. Tương tự, $f_2(x + ct)$ mô tả sóng lan truyền theo hướng âm của trục x với vận tốc c không đổi.

Trong các cơ hệ liên tục, tuyến tính, dựa trên biến đổi Fourier, một dạng sóng tổng quát có thể được xây dựng từ thành phần sóng điều hòa, do đó chỉ cần nghiên cứu sự lan truyền của sóng điều hòa. Dạng điều hòa của hàm f_1, f_2 là:

$$\begin{aligned} f_1(x - ct) &= A.e^{i(kx - \omega t)} \\ f_2(x + ct) &= B.e^{i(kx + \omega t)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

trong đó A, B là biên độ sóng, k được gọi là số sóng

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (2.11)$$

Phương trình (2.9) được viết lại:

$$u(x, t) = A.e^{i(kx - \omega t)} + B.e^{i(kx + \omega t)} \quad (2.12)$$

Trong phương trình này, số hạng đầu tiên đại diện cho một sóng di chuyển theo hướng dương của trục x , trong khi số hạng thứ hai đại diện cho sóng di chuyển theo hướng âm của trục x . Nếu một sóng di chuyển trong môi trường theo hướng dương trong khi ban đầu không có sóng nào di chuyển theo hướng âm thì phần thứ hai của phương trình (2.12) được bỏ qua, khi đó:

$$u(x, t) = A.e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.13)$$

Suy ra

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = ikA.e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.14)$$

Theo định luật Hook, $\sigma = E\varepsilon$, ta có:

$$\sigma = ikEA.e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.15)$$

Mặt khác:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Suy ra

$$F(x,t) = \sigma S = ikEAS.e^{i(kx-\omega t)} \quad (2.16)$$

Từ (2.13), vận tốc của chất điểm

$$v(x,t) = \frac{du}{dt} = -i\omega A e^{i(kx-\omega t)} \quad (2.17)$$

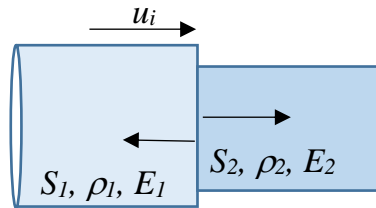
Trở kháng sóng âm Z của một điểm trên dầm là tỉ lệ giữa lực tác dụng tại một điểm $F(x,t)$ với vận tốc $v(x,t)$ tại cùng điểm đó

$$Z = \left| \frac{F(x,t)}{v(x,t)} \right| = \frac{ikEAS.e^{i(kx-\omega t)}}{i\omega A e^{i(kx-\omega t)}} = \frac{kES}{\omega} \quad (2.18)$$

Vì $k = \frac{\omega}{c}$, $c^2 = \frac{E}{\rho}$ thay vào (2.18), ta có:

$$Z = Sc\rho \quad (2.19)$$

Sự lan truyền sóng có thể gặp phải sự gián đoạn giữa ranh giới hai môi trường khác nhau. Điều này có thể tạo ra sóng phản xạ ảnh hưởng đến việc truyền năng lượng. Hai môi trường khác nhau được phân tách bằng sự gián đoạn tại $x = 0$.



Hình 2.2. Sóng phản xạ và truyền qua bề mặt ranh giới giữa hai môi trường

Xét một sóng $u_i(x,t)$ di chuyển theo hướng dương (+) trong môi trường 1, trong khi không có sóng nào di chuyển theo hướng âm (-), ta có:

$$u_i(x,t) = A_i e^{i(k_1 x - \omega t)} \quad (2.20)$$

Trong đó A_i là biên độ của sóng tới. Khi sóng tới đập vào mặt phân cách giữa hai môi trường, sóng truyền qua $u_t(x,t)$ và sóng phản xạ $u_r(x,t)$ được tạo ra. Sóng phản xạ $u_r(x,t)$ có thể được biểu diễn dưới dạng sóng di chuyển theo hướng âm của trục x , còn sóng truyền qua $u_t(x,t)$ là sóng di chuyển theo hướng dương của trục x vào môi trường 2.

$$u_r(x,t) = A_r e^{i(k_1 x + \omega t)} \quad (2.21)$$

$$u_t(x,t) = A_t e^{i(k_2 x - \omega t)} \quad (2.22)$$

trong đó A_r, A_t là biên độ sóng phản xạ và sóng truyền qua, tương ứng.

Do điều kiện biên tại mặt phân cách $x = 0$ yêu cầu vận tốc phải liên tục, lực tác dụng phải cân bằng nên ta có:

$$\begin{aligned}v_i(x,t) &= v_t(x,t) - v_r(x,t) \\ P_i(x,t) &= P_t(x,t) - P_r(x,t)\end{aligned}\tag{2.23}$$

Suy ra

$$\begin{aligned}\frac{du_i}{dt}(x,t) + \frac{du_r}{dt}(x,t) &= \frac{du_t}{dt}(x,t) \\ S_1\sigma_i(x,t) + S_1\sigma_r(x,t) &= S_2\sigma_t(x,t)\end{aligned}\tag{2.24}$$

Từ (2.24), ta có hệ phương trình:

$$\begin{aligned}(\sigma_r - \sigma_i)E_2k_2 &= -\sigma_tE_1k_1 \\ S_1(\sigma_i + \sigma_r) &= S_2\sigma_t\end{aligned}\tag{2.25}$$

Giải hệ (2.25), tìm được ứng suất của sóng phản xạ và sóng truyền qua mặt phân cách:

$$\begin{aligned}\sigma_t(x,t) &= \frac{2E_2k_2S_1}{E_1k_1S_1 + E_2k_2S_2}\sigma_i(x,t) \\ \sigma_r(x,t) &= \frac{E_2k_2S_2 - E_1k_1S_1}{E_1k_1S_1 + E_2k_2S_2}\sigma_i(x,t)\end{aligned}\tag{2.26}$$

Để mô tả sự lan truyền và phản xạ của sóng dưới dạng trở kháng sóng âm, theo (2.18), ta có thể biểu diễn ứng suất của sóng phản xạ và sóng truyền qua mặt phân cách dưới dạng:

$$\sigma_t(x,t) = \frac{2\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{1 + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}\sigma_i(x,t)\tag{2.27}$$

$$\sigma_r(x,t) = \frac{\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) - 1}{\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) + 1}\sigma_i(x,t)\tag{2.28}$$

Từ phương trình (2.28), để giảm sóng phản xạ, trở kháng của môi trường mà sóng truyền qua phải phù hợp.

Trong đầu rung siêu âm, nói chung gồm có ba phần tương ứng với ba môi trường khác nhau: khối phía trước, khối áp điện và khối phía sau. Gọi Z_c , Z_f và Z_b lần lượt là trở kháng âm của vật liệu áp điện, khối lượng phía trước và khối lượng phía sau. Để năng lượng được truyền tối ưu thì $\sigma_r(x,t) = 0$, điều này dẫn đến:

$$\frac{Z_c}{Z_b} = \frac{Z_f}{Z_c}$$

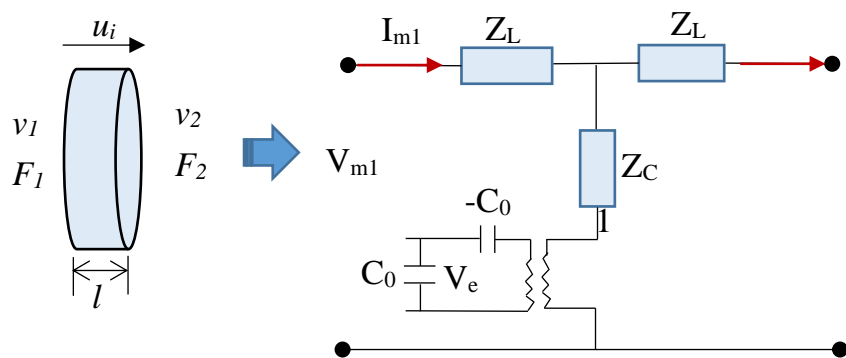
Suy ra:

$$Z_c^2 = Z_f Z_b\tag{2.29}$$

2.2. Phương pháp mạch tương đương Mason

Trong khoa học về sóng siêu âm, ứng xử của hệ thống tại điểm cộng hưởng là mục tiêu chính để giải phương trình sóng. Có một sự tương đồng trong tác động cộng hưởng giữa hệ thống cơ khí và hệ thống điện. Do đó, các đại lượng điện (điện cảm, điện dung, điện trở) tương đương với các đại lượng cơ học (quán tính, độ cứng, giảm chấn). Sự tương đồng giữa các hệ thống này có thể được định nghĩa như sau: về mặt hệ thống điện, dựa trên định luật dòng điện của Kirchhoff, tổng đại số của các dòng điện gặp nhau tại một điểm nối (nút) bằng không, tương tự, tổng của các lực tại một điểm của một hệ thống ở trạng thái cân bằng cũng bằng không. Ngoài ra, dựa trên định luật điện áp của Kirchhoff [42], sự sụt giảm điện áp xung quanh một vòng kín bằng không. Trong hệ thống cơ học, độ sụt giảm vận tốc xung quanh một vòng kín cũng bằng không. Những điểm tương đồng này có thể được sử dụng để thực hiện sự biến đổi qua lại giữa các biến trong hệ thống điện và cơ: dòng điện \leftrightarrow vận tốc, điện áp \leftrightarrow lực tác dụng.

Như mô tả trong công thức (2.18), trở kháng cơ học đại diện cho tỷ lệ lực tác dụng lên một điểm so với vận tốc được tạo ra tại cùng một điểm đó. Trở kháng điện được định nghĩa là điện áp trên một phần tử chia cho dòng điện thông qua phần tử. Bằng cách nhận thấy sự giống nhau của các định nghĩa, có thể biểu diễn trở kháng của hệ thống sóng âm bằng trở kháng của hệ thống điện. Theo mô hình mạch tương đương của Mason [43], sự truyền sóng âm trong vật liệu gốm áp điện có thể được biểu diễn bởi một mạng điện T như trong Hình 2.3.



Hình 2.3. Minh họa đĩa gốm áp điện và mô hình mạch tương đương Mason [43]

Mạng T tương đương của cấu trúc sóng âm có hai cổng sóng âm với hai trở kháng sóng âm Z_L dọc và một trở kháng sóng âm Z_C ngang và một bộ chuyển đổi điện - cơ với điện dung C_0 . Trở kháng Z_L tương ứng với bề mặt S phía trước và phía sau. Vận tốc v_1 , v_2 và các lực F_1 , F_2 trên cấu trúc sóng âm được biểu thị bằng các điện áp V_{m1} , V_{m2} và dòng điện I_{m1} , I_{m2} trên mạch tương đương, tương ứng. Theo Martin, trở kháng của mạng T được xác định theo mật độ ρ , vận tốc sóng c , diện tích mặt cắt ngang S , số sóng k và độ dài đường sóng l như sau [44]:

$$Z_L = i\rho cS \tan\left(\frac{kl}{2}\right) \quad (2.30)$$

$$Z_C = \frac{-i\rho cS}{\sin(kl)}$$

$$C_0 = \frac{n_0 \varepsilon_{33} S}{l} (1 - k_t^2) \quad (2.31)$$

trong đó n_0 là số lượng đĩa gốm áp điện, l là độ dày mỗi đĩa, ε_{33} là hằng số điện môi của vật liệu áp điện, k_t là hệ số chuyển đổi điện - cơ của vật liệu áp điện.

Dựa trên sự giống nhau giữa hệ thống điện và sóng âm, điện áp V_m và dòng điện I_e trên cổng điện có thể được chuyển đổi sang lực F_m và vận tốc v_e trên cổng sóng âm như sau:

$$F_m = N \cdot V_m \quad v_e = \frac{I_e}{N} \quad (2.32)$$

Với hệ số chuyển đổi N được tính bằng:

$$N = \frac{S d_{33}}{l s_{33}^E} \quad (2.33)$$

Trong đó d_{33} là điện tích áp điện ở chế độ độ dày tương ứng và s_{33}^E là hệ số độ đàn hồi tại điện trường không đổi.

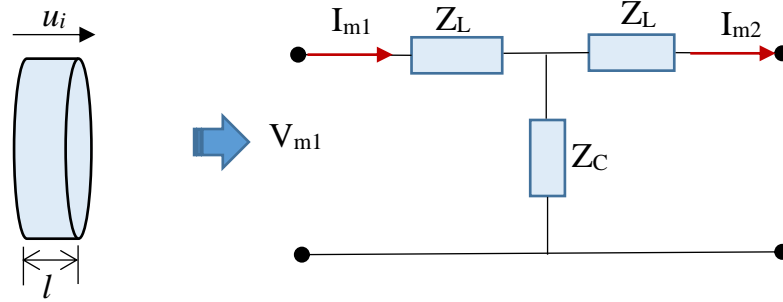
Bằng cách sử dụng định luật Ohm cho mối quan hệ giữa điện áp, dòng điện và trở kháng, sự biến đổi trở kháng giữa cổng điện Z_e và cổng sóng âm Z_m có thể được đưa ra như sau:

$$Z_m = N^2 Z_e \quad (2.34)$$

Môi trường thụ động đóng vai trò quan trọng trong việc truyền hoặc tăng cường năng lượng siêu âm về phía các vùng riêng biệt với ít tổn thất. Đối với mặt cắt ngang đồng nhất, mạch tương đương Mason cho môi trường thụ động gồm hai trở kháng sóng âm dọc (kí hiệu Z_L) và một trở kháng ngang (kí hiệu Z_C). Vì kháng trở dọc của mặt trước và mặt sau sẽ giống hệt nhau do diện tích mặt trước bằng mặt sau như Hình 2.4. Các trở kháng được tính theo phương trình:

$$\begin{aligned} Z_L &= i\rho cS \tan\left(\frac{kl}{2}\right) \\ Z_C &= \frac{-i\rho cS}{\sin(kl)} \\ c &= \sqrt{\frac{E}{\rho}} \end{aligned} \quad (2.35)$$

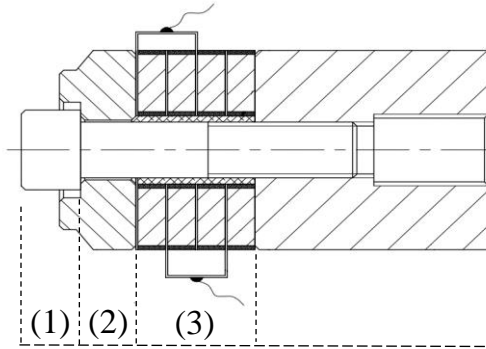
ρ , c , E và k lần lượt là mật độ khối lượng, tốc độ sóng âm, mô đun Young và số sóng của môi trường. Đối với đầu rung siêu âm, khối trước, khối sau và bu lông ứng suất trước thuộc loại môi trường này.



Hình 2.4. Môi trường với thiết diện đồng nhất và sơ đồ mạch tương đương

2.2.1. Mô hình mạch tương đương của đầu rung siêu âm

Sử dụng phương pháp mạch tương đương Mason [43] và mô hình Martin [44] để thực hiện phân tích đầu rung siêu âm hoàn chỉnh. Đối với mô hình đầu rung siêu âm trong nghiên cứu này, việc xây dựng mạch tương đương được thực hiện bằng cách chia mô hình thành các phần như trong Hình 2.6 do có sự thay đổi vật liệu, thiết diện mặt cắt ngang hoặc cả hai, trong đó: (1) bu lông ứng suất, (2) khối lượng mặt sau, (3) phần tử áp điện và (4) khối phía trước, các phần này được kết nối và đánh số tuần tự.



Hình 2.5. Cấu hình của đầu rung siêu âm

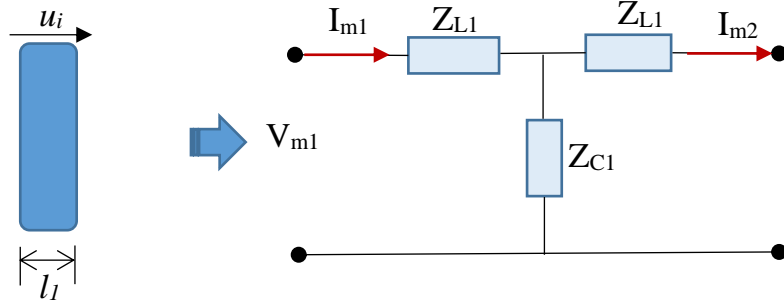
Vùng 1 là phần đầu bu lông ứng suất có diện tích mặt cắt là lục giác đều. Trở kháng sóng âm và vận tốc truyền âm được tính theo biểu thức:

$$Z_{L1} = i\rho_1 c_1 S_1 \tan\left(\frac{k_1 l_1}{2}\right) = i\rho_1 c_1 S_1 \tan\left(\frac{\pi f l_1}{c_1}\right)$$

$$Z_{C1} = \frac{-i\rho_1 c_1 S_1}{\sin(k_1 l_1)} = \frac{-i\rho_1 c_1 S_1}{\sin\left(\frac{2\pi f l_1}{c_1}\right)} \quad (2.36)$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}$$

với ρ_l , c_l , S_l , l_l và k_l , lần lượt là mật độ khối lượng, tốc độ sóng âm, diện tích, chiều dài và số sóng của bu lông.



Hình 2.6. Sơ đồ mạch tương đương vùng 1

Vùng 2 được cấu thành từ hai phần: một khối kim loại rỗng và phần bu-lông ứng suất chạy qua. Phần côn của khối kim loại khá mỏng nên coi như trục có cùng diện tích mặt cắt ngang. Để có thể biểu diễn vùng 2 dưới dạng trở kháng Hình 2.7, ta tính giá trị trung bình của mật độ vật liệu và tốc độ sóng âm:

$$\rho_{2avg} = \frac{\rho_{tr}S_{tr} + \rho_bS_b}{S_{tr} + S_b} \quad (2.37)$$

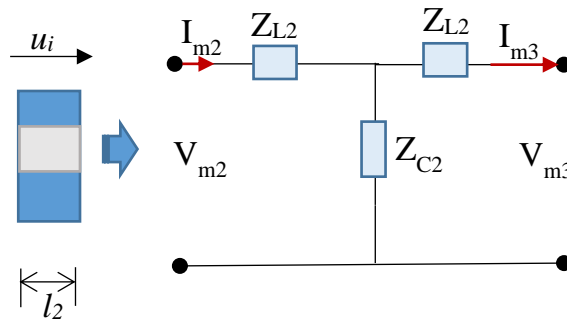
$$c_{2avg} = \frac{c_{tr}S_{tr} + c_bS_b}{S_{tr} + S_b}$$

Ta có:

$$Z_{L2} = i\rho_{2avg}c_{2avg}(S_{tr} + S_b) \tan\left(\frac{\pi l_2}{c_{2avg}} f\right)$$

$$Z_{C2} = \frac{-i\rho_{2avg}c_{2avg}(S_{tr} + S_b)}{\sin\left(\frac{2\pi l_2}{c_{2avg}} f\right)} \quad (2.38)$$

Với ρ_{tr} , ρ_b , c_{tr} , c_b , S_{tr} và S_b lần lượt là mật độ khối lượng, tốc độ sóng âm, diện tích mặt cắt ngang của bu lông và khối kim loại.



Hình 2.7. Sơ đồ mạch tương đương vùng 2

Vùng 3 là một cấu trúc có các vòng áp điện, các điện cực và một phần bu-lông ứng suất trước. Do các điện cực thường được làm từ các tấm mỏng nên trở kháng cơ học của chúng được bỏ qua. Các vòng gốm áp điện gồm có cả trở kháng điện và trở kháng cơ học. Sơ đồ mạch của vùng 3 được chỉ ra trên Hình 2.8, phần trở kháng điện ứng với điện dung C_0 được tính như sau:

$$Z_{C_0} = \frac{1}{i2\pi fC_0} \quad (2.39)$$

$$C_0 = \frac{n_0 \varepsilon_{33} S_p}{l} (1 - k_t^2)$$

trong đó n_0 là số lượng đĩa gốm áp điện, l là độ dày mỗi đĩa, ε_{33} là hằng số điện môi của vật liệu áp điện, S_p là diện tích mặt cắt ngang của vòng gốm áp điện, k_t là hệ số khớp nối cơ điện của vật liệu áp điện.

Còn phần trở kháng cơ học được tính tương tự như vùng 2, với:

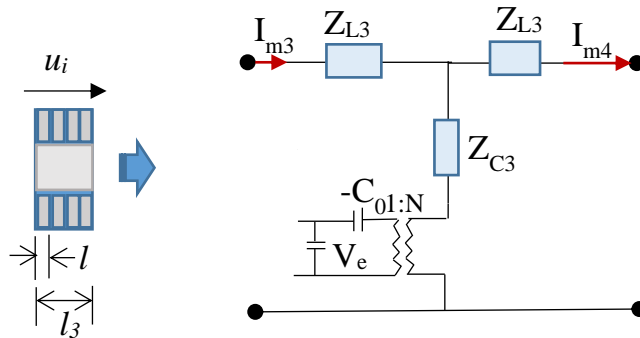
$$\rho_{3avg} = \frac{\rho_{tr} S_{tr} + \rho_p S_p}{S_{tr} + S_p} \quad (2.40)$$

$$c_{3avg} = \frac{c_{tr} S_{tr} + c_p S_p}{S_{tr} + S_p}$$

$$Z_{L3} = i\rho_{3avg} c_{3avg} (S_{tr} + S_p) \tan\left(\frac{\pi l_3}{c_{3avg}} f\right)$$

$$Z_{C3} = \frac{-i\rho_{3avg} c_{3avg} (S_{tr} + S_p)}{\sin\left(\frac{2\pi l_3}{c_{3avg}} f\right)} \quad (2.41)$$

với ρ_p , c_p , và S_p lần lượt là mật độ khối lượng, tốc độ sóng âm, diện tích mặt cắt ngang của đĩa gốm áp điện.



Hình 2.8. Sơ đồ mạch tương đương vùng 3

Mối quan hệ giữa phần điện và sóng âm được xác định bởi hệ số chuyển đổi cơ điện lý tưởng N , được tính bằng:

$$N = \frac{S_p}{l} \frac{d_{33}}{s_{33}^E} \quad (2.42)$$

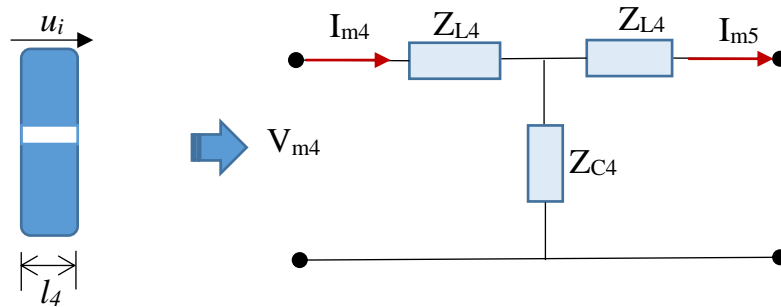
Vùng 4 đại diện cho mặt cắt ngang không đổi của khối phía trước, mạch điện tương đương được chỉ ra trên Hình 2.9 với trở kháng sóng âm được tính theo biểu thức:

$$Z_{L4} = i\rho_4 c_4 S_4 \tan\left(\frac{\pi f l_4}{c_4}\right)$$

$$Z_{C4} = \frac{-i\rho_4 c_4 S_4}{\sin\left(\frac{2\pi f l_4}{c_4}\right)} \quad (2.43)$$

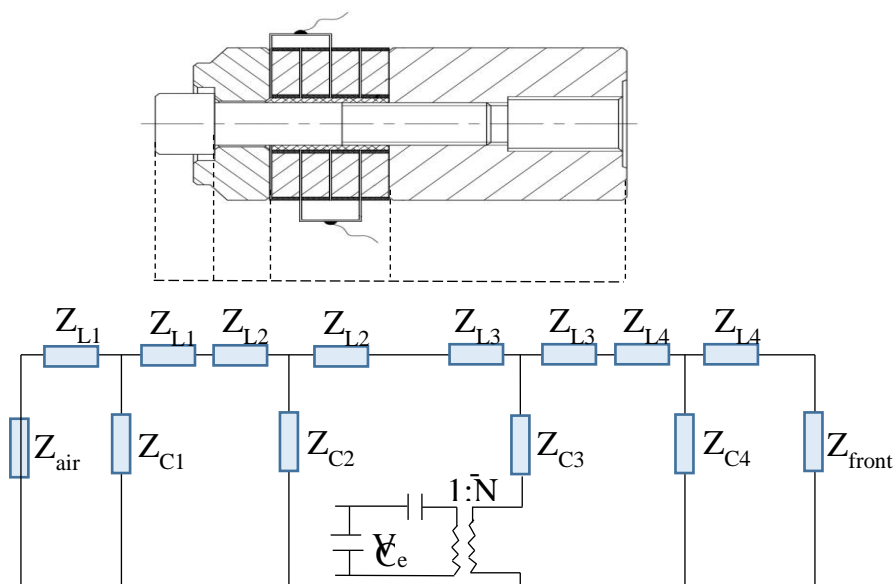
$$c_4 = \sqrt{\frac{E_4}{\rho_4}}$$

với ρ_4 , c_4 , S_4 , l_4 và k_4 , lần lượt là mật độ khối lượng, tốc độ sóng âm, diện tích, chiều dài và số sóng của khối phía trước.



Hình 2.9. Sơ đồ mạch tương đương vùng 4

Mạch tương đương Mason của đầu rung hoàn chỉnh được thể hiện trong Hình 2.10, hai trở kháng sóng âm được thêm vào ở mỗi đầu mạch để đại diện cho tải bên ngoài Z_{air} và Z_{front} . Các trở kháng này sẽ được bỏ qua khi đầu rung được thử nghiệm trong điều kiện chạy không tải vì trở kháng của môi trường xung quanh không đáng kể.



Hình 2.10. Mạch tương đương hoàn chỉnh của đầu rung dựa trên mô hình Mason

Tham số đầu vào cho mạch này là điện áp kích thích V_e và đầu ra có thể là phổ trở kháng điện và sơ đồ pha. Các đầu ra có thể được sử dụng để trích xuất một số đại lượng như: tần số cộng hưởng và phản cộng hưởng theo độ dày, tổng dòng điện đầu vào, công suất đầu rung, hệ số khớp nối cơ điện (k_t), vận tốc cơ học tại ranh giới các vùng và biên độ rung động ở bề mặt đầu rung ứng với các mức kích thích khác nhau.

Bài toán mạch điện được giải dựa trên định luật của Kirchhoff về dòng điện và điện áp, trong đó các biểu thức trở kháng mới được đưa ra để đơn giản hóa trở kháng của các bộ phận mắc song song hoặc nối tiếp. Trở kháng sóng âm tổng thể Z_m được tính toán, sau đó được chuyển đến nhánh điện, sau đó được quy đổi để tính toán trở kháng điện tổng thể của đầu rung Z_T .

Tổng dòng điện đầu vào I_T được tính từ điện áp kích thích V_e , sau đó điện áp trên trở kháng sóng âm được tính toán và truyền trở lại nhánh cơ học để biểu diễn lực F_m tại phần gôm áp điện. Các nguyên lý Kirchhoff cũng được sử dụng trong các nhánh để tính toán lực và vận tốc của từng vùng.

Các vòng lặp dòng điện được sử dụng để tính dòng điện nhánh I_i tương ứng với vận tốc v_i tại ranh giới từng vùng.

Cụ thể, đối với phần (1) và phần (2) ta có:

$$((Z_{air} \text{ nối tiếp với } Z_{L1}) \text{ và song song với } Z_{C1}) = Z_{td1}$$

$$\frac{1}{Z_{td1}} = \frac{1}{Z_{air} + Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{C1}} \Rightarrow Z_{td1} = \frac{Z_{C1}(Z_{L1} + Z_{air})}{Z_{C1} + Z_{L1} + Z_{air}} \quad (2.44)$$

((Z_{td1} nối tiếp với Z_{L1}) và nối tiếp Z_{L2}) và song song với Z_{C2}) = Z_{td2}

$$\frac{1}{Z_{td2}} = \frac{1}{Z_{td1} + Z_{L1} + Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{C2}} \Rightarrow Z_{td2} = \frac{Z_{C2}(Z_{td1} + Z_{L1} + Z_{L2})}{Z_{td1} + Z_{C2} + Z_{L1} + Z_{L2}} \quad (2.45)$$

((Z_{td2} nối tiếp với Z_{L2}) và nối tiếp Z_{L3}) = Z_{td3}

$$Z_{td3} = Z_{td2} + Z_{L2} + Z_{L3} \quad (2.46)$$

Tương tự, đối với phần (4) của đầu rung, ta có:

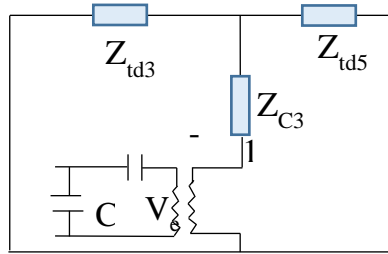
((Z_{front} nối tiếp với Z_{L4}) và song song với Z_{C4}) = Z_{td4}

$$\frac{1}{Z_{td4}} = \frac{1}{Z_{front} + Z_{L4}} + \frac{1}{Z_{C4}} \Rightarrow Z_{td4} = \frac{Z_{C4}(Z_{L4} + Z_{front})}{Z_{C4} + Z_{L4} + Z_{front}} \quad (2.47)$$

((Z_{td4} nối tiếp với Z_{L4}) và nối tiếp Z_{L3}) = Z_{td5}

$$Z_{td5} = Z_{td4} + Z_{L4} + Z_{L3} \quad (2.48)$$

Hình thức đơn giản của mạch tương đương trong Hình 2.10 có dạng như Hình 2.11:



Hình 2.11 Mô hình mạch tương đương được đơn giản hóa

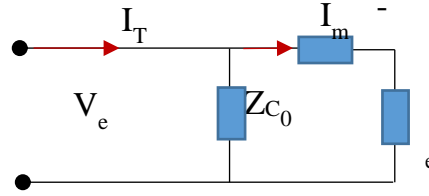
Vì ((Z_{td3} song song Z_{td5}) và nối tiếp Z_{C3}) = Z_m nên tổng trở kháng sóng âm của transducer được tính bằng:

$$Z_m = Z_{C3} + \frac{Z_{td3} \cdot Z_{td5}}{Z_{td3} + Z_{td5}} = \frac{Z_{C3} Z_{td3} + Z_{C3} Z_{td5} + Z_{td3} \cdot Z_{td5}}{Z_{td3} + Z_{td5}} \quad (2.49)$$

Trở kháng Z_m được chuyển đổi đến công điện, theo công thức (2.34) ta có:

$$Z_e = \frac{Z_m}{N^2} \quad (2.50)$$

Với N tính theo công thức (2.42). Cuối cùng, ta có mạch điện như Hình 2.12, với Z_{C0} tính theo công thức (2.39).



Hình 2.12. Sự chuyển đổi trở kháng sóng âm sang trở kháng điện

Vì $((Z_e$ nối tiếp $- Z_{C0})$ và song song $Z_{C0}) = Z_T$ nên tổng trở kháng của đầu rung Z_T được tính bằng công thức:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_e - Z_{C0}} + \frac{1}{Z_{C0}} \Rightarrow Z_T = \frac{Z_{C0}(Z_e - Z_{C0})}{Z_e} \quad (2.51)$$

Z_T có phần thực và phần ảo, $Z_T = R + iX$, trong đó R là điện trở (Resistance), X là điện kháng (Reactance), do đó góc pha θ được tính:

$$\tan(\theta) = \frac{X}{R} \quad (2.52)$$

Trở kháng đầu vào của đầu rung Z_T sau đó được phân tích bằng cách cho thay đổi tần số f để tìm các tần số cộng hưởng (f_r) và tần số phản cộng hưởng (f_a) nơi mà độ lớn của Z_T đạt giá trị nhỏ nhất và lớn nhất, tương ứng.

Hệ số khớp nối cơ điện k_t của một đầu rung đo hiệu ứng áp điện khi chuyển đổi năng lượng cơ - điện ở chế độ dọc (theo độ dày). Trong thực tế, các yếu tố khác nhau như tổn thất năng lượng, ảnh hưởng của tải hoặc dải tần số, ... có thể ảnh hưởng đến giá trị mong muốn của k_t . Để phân tích hiệu suất chính xác hơn, hệ số khớp nối cơ điện hiệu quả k_{eff} được thay vào đó để đánh giá tính năng cộng hưởng của bộ chuyển đổi và thiết kế cơ học của nó. Dựa trên phổ trở kháng Z_T , k_{eff} được tính theo biểu thức:

$$k_{eff} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2} \quad (2.53)$$

Tổng dòng điện đầu vào được tính theo công thức:

$$I_T = \frac{V_e}{Z_T} \quad (2.54)$$

Công suất trung bình của dòng điện được tính theo công thức:

$$P_e = V_e I_T \cos \theta \quad (2.55)$$

Dòng điện trên phần gồm áp điện:

$$I_m = \left(\frac{Z_{C0}}{Z_e} \right) I_T \quad (2.56)$$

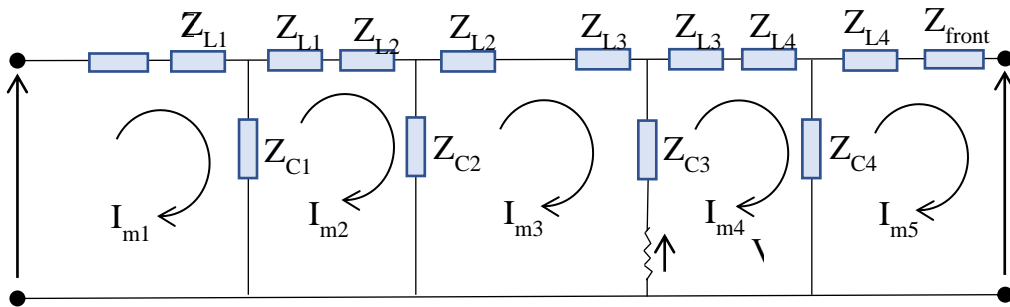
Điện áp trên phần gồm áp điện:

$$V_m = Z_e I_m = Z_{C0} I_T \quad (2.57)$$

Suy ra, lực tác dụng F_m trên phần gồm áp điện:

$$F_m = N \cdot V_m \quad (2.58)$$

Trở lại mạch tương đương của đầu rung Hình 2.13, áp dụng định luật dòng điện và điện áp Kirchhoff để tìm dòng điện chạy qua các phần của đầu rung (I_{m1} , I_{m2} , I_{m3} , I_{m4} , I_{m5}). Do $V_0 = V_4 = 0$, ta nhận được hệ phương trình:



Hình 2.13. Sơ đồ dòng điện tương đương

$$[Z] \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{m3} \\ I_{m4} \\ I_{m5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_m \\ -V_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Trong đó:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{air} + Z_{L1} + Z_{C1} & -Z_{C1} & 0 & 0 & 0 \\ -Z_{C1} & Z_{L1} + Z_{C1} + Z_{L2} + Z_{C2} & -Z_{C2} & 0 & 0 \\ 0 & -Z_{C2} & Z_{L2} + Z_{C2} + Z_{L3} + Z_{C3} & -Z_{C3} & 0 \\ 0 & 0 & -Z_{C3} & Z_{L3} + Z_{C3} + Z_{L4} + Z_{C4} & -Z_{C4} \\ 0 & 0 & 0 & -Z_{C4} & Z_{L4} + Z_{C4} + Z_{front} \end{bmatrix}$$

2.2.2. Mô hình mạch tương đương của bộ khuếch đại siêu âm

Xem xét dao động của một thanh đồng chất có thiết diện thay đổi vì đối với thiết bị rung siêu âm, bộ phận khuếch đại thuộc môi trường này. Theo (2.3), phương trình rung động dọc của thanh có dạng:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{S(x)} \frac{\partial}{\partial x} \left(S(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.60)$$

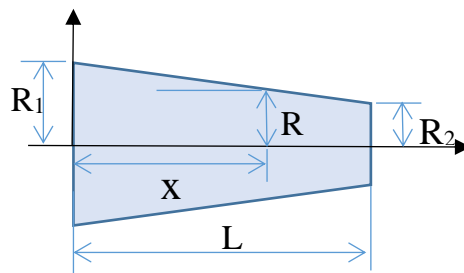
trên đoạn $L1 < x < L2$, trong đó $u(x,t)$ là chuyển dịch của mặt cắt ngang tại vị trí x và thời gian t . E , $S(x)$, ρ lần lượt là modul đàn hồi, diện tích mặt cắt ngang và khối lượng riêng, tương ứng. Vì thanh tự do ở hai đầu nên ta có điều kiện biên tương ứng:

$$\begin{aligned} ES(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L_1} &= 0 \\ ES(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L_2} &= 0 \end{aligned} \quad (2.61)$$

Với điều kiện biên (2.61), nghiệm của phương trình (2.60) có thể giả thiết dưới dạng:

$$u(x,t) = X(x).T(t) \quad (2.62)$$

Bộ khuếch đại có dạng hình nón cụt (dạng côn), như chỉ ra trên Hình 2.14.



Hình 2.14. Mô hình bộ khuếch đại

Diện tích mặt cắt ngang của bộ khuếch đại tại x là:

$$S(x) = \pi R^2 = \pi R_1^2 \left(1 - \frac{(1 - \frac{R_2}{R_1})x}{L} \right)^2 \quad (2.63)$$

Thay (2.63) vào (2.60), đặt $\frac{R_1}{R_2} = M$, $\frac{M-1}{ML} = \beta$ ta nhận được phương trình:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{2\beta}{\beta x - 1} \right) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.64)$$

Từ (2.62), tìm nghiệm tổng quát của phương trình (2.64) dưới dạng:

$$u(x, t) = X(x)e^{-i(\omega t + \theta)} \quad (2.65)$$

với ω là tần số tự nhiên của rung động điều hòa.

Ta có:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 X(x)e^{i(\omega t + \theta)} = -\omega^2 u \quad (2.66)$$

Thế (2.66) vào (2.64), ta có:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{2\beta}{\beta x - 1} \right) \frac{\partial u}{\partial x} + k^2 u = 0 \quad (2.67)$$

Thế (2.65) và (2.67), ta nhận được phương trình vi phân thường:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \left(\frac{2\beta}{\beta x - 1} \right) \frac{dX}{dx} + k^2 X = 0 \quad (2.68)$$

Tìm nghiệm của phương trình (2.68) dưới dạng:

$$X(x) = \frac{1}{\beta x - 1} g(x) \quad (2.69)$$

Thực hiện các đạo hàm:

$$\frac{dX}{dx} = \frac{-\beta}{(\beta x - 1)^2} g(x) + \frac{1}{\beta x - 1} g'(x) \quad (2.70)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = \frac{2\beta^2}{(\beta x - 1)^3} g(x) - \frac{2\beta}{(\beta x - 1)^2} g'(x) + \frac{1}{\beta x - 1} g''(x) \quad (2.71)$$

Thế các biểu thức (2.69), (2.70) và (2.71) vào phương trình (2.68), nhận được:

$$\frac{1}{(\beta x - 1)} (g''(x) + k^2 g(x)) = 0 \quad (2.72)$$

Suy ra

$$g''(x) + k^2 g(x) = 0 \quad (2.73)$$

(2.73) là phương trình rung động tự do không cản, nghiệm của (2.73) có dạng:

$$g(x) = A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx) \quad (2.74)$$

trong đó A_1, A_2 là các hằng số tùy ý và được xác định từ điều kiện biên.

Như vậy, hàm $X(x)$ trong phương trình (2.68) có dạng:

$$X(x) = \frac{1}{\beta x - 1} \{ A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx) \} \quad (2.75)$$

Suy ra, nghiệm của phương trình (2.67) có dạng:

$$u(x,t) = \frac{1}{\beta x - 1} \{A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx)\} e^{-i(\omega t + \theta)} \quad (2.76)$$

Từ (2.76), xác định vận tốc của chất điểm trong môi trường:

$$v(x,t) = \frac{du}{dt} = \frac{-i\omega}{\beta x - 1} \{A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx)\} e^{-i(\omega t + \theta)} \quad (2.77)$$

Biểu thức xác định biến dạng:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \{G'(x)(A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx)) + kG(x)(-A_1 \sin(kx) + A_2 \cos(kx))\} e^{-i(\omega t + \theta)} \quad (2.78)$$

trong đó $G(x) = \frac{1}{\beta x - 1}$, $G'(x) = \frac{-\beta}{(\beta x - 1)^2}$.

Theo định luật Hook, ta nhận được ứng suất:

$$\sigma = E \{G'(x)(A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx)) + kG(x)(-A_1 \sin(kx) + A_2 \cos(kx))\} e^{-i(\omega t + \theta)} \quad (2.79)$$

Suy ra, lực tác dụng:

$$F(x,t) = \sigma S = SE \{G'(x)(A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx)) + kG(x)(-A_1 \sin(kx) + A_2 \cos(kx))\} e^{-i(\omega t + \theta)} \quad (2.80)$$

Viết lại hệ phương trình (2.77) và (2.80) dưới dạng ma trận:

$$\begin{bmatrix} v(x,t) \\ F(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\omega G(x) \cos(kx) & -i\omega G(x) \sin(kx) \\ SE(G'(x) \cos(kx) - kG(x) \sin(kx)) & SE(G'(x) \sin(kx) + kG(x) \cos(kx)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} \quad (2.81)$$

Tại $x = 0$, ta có:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_1 \\ F_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -i\omega G(0) & 0 \\ SEG'(0) & SEkG(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} = \begin{bmatrix} -i\omega G(0) & 0 \\ \frac{\omega Z_c G'(0)}{k} & \omega Z_c G(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} \\ &= \begin{bmatrix} i\omega & 0 \\ \frac{-\omega Z_c \beta}{k} & -\omega Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} = H|_{x=0} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} \end{aligned} \quad (2.82)$$

Từ (2.82), ta có:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} = H|_{x=0}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{i\omega} & 0 \\ \frac{-\beta}{i\omega k} & \frac{-1}{\omega Z_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ F_1 \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

Xét tại $x = L$:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} v_2 \\ F_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -i\omega\Delta_{11} & -i\omega\Delta_{12} \\ SE\Delta_{21} & SE\Delta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} = \begin{bmatrix} -i\omega\Delta_{11} & -i\omega\Delta_{12} \\ \frac{\omega Z_c}{M^2 k} \Delta_{21} & \frac{\omega Z_c}{M^2 k} \Delta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} \\
&= \begin{bmatrix} -i\omega\Delta_{11} & -i\omega\Delta_{12} \\ \frac{\omega Z_c}{M^2 k} \Delta_{21} & \frac{\omega Z_c}{M^2 k} \Delta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)} = H|_{x=L} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + \theta)}
\end{aligned} \tag{2.84}$$

Trong đó:

$$\Delta_{11} = G(L) \cos(kL) = \frac{\cos(kL)}{\beta L - 1} = -M \cos(kL)$$

$$\Delta_{12} = G(L) \sin(kL) = \frac{\sin(kL)}{\beta L - 1} = -M \sin(kL)$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{21} &= G'(L) \cos(kL) - kG(L) \sin(kL) = \frac{-\beta}{(\beta L - 1)^2} \cos(kL) - \frac{k}{(\beta L - 1)} \sin(kL) \\
&= -M^2 \beta \cos(kL) + Mk \sin(kL)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{22} &= G'(L) \sin(kL) + kG(L) \cos(kL) = \frac{-\beta}{(\beta L - 1)^2} \sin(kL) + \frac{k}{(\beta L - 1)} \cos(kL) \\
&= -M^2 \beta \sin(kL) + Mk \cos(kL)
\end{aligned}$$

Thế (2.84) vào (2.83), ta nhận được:

$$\begin{bmatrix} v_2 \\ F_2 \end{bmatrix} = H|_{x=L} H|_{x=0}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ F_1 \end{bmatrix} \tag{2.85}$$

Trong đó:

$$p_{11} = -\Delta_{11} + \frac{\beta}{k} \Delta_{12} = M \left\{ \cos(kL) - \frac{\beta}{k} \sin(kL) \right\}$$

$$p_{12} = \frac{i}{Z_c} \Delta_{12} = -\frac{iM}{Z_c} \sin(kL)$$

$$p_{21} = \frac{Z_c}{iM^2 k} \left(\Delta_{21} - \frac{\beta}{k} \Delta_{22} \right) = \frac{iZ_c}{M} \left\{ \frac{\beta(M+1)}{k} \cos(kL) - \left(1 + \frac{M\beta^2}{k^2}\right) \sin(kL) \right\}$$

$$p_{22} = -\frac{1}{M^2 k} \Delta_{22} = -\frac{1}{M} \cos(kL) + \frac{\beta}{k} \sin(kL)$$

Suy ra:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \tag{2.86}$$

Trong đó:

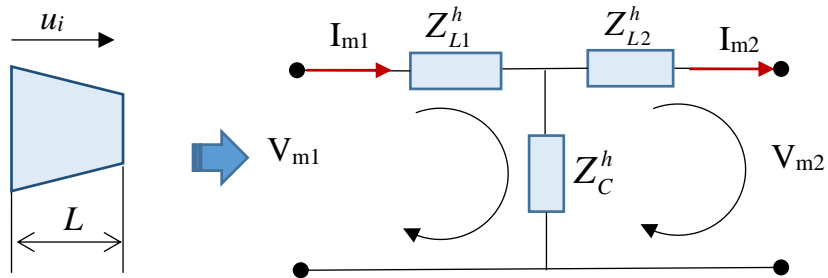
$$s_{11} = -\frac{p_{11}}{p_{12}} = \frac{-iZ_C}{\sin(kL)} \left\{ \cos(kL) - \frac{\beta}{k} \sin(kL) \right\}$$

$$s_{12} = \frac{1}{p_{12}} = \frac{iZ_C}{M \sin(kL)}$$

$$s_{21} = p_{21} - \frac{p_{22} \cdot p_{11}}{p_{12}} = \frac{-iZ_C}{M \sin(kL)}$$

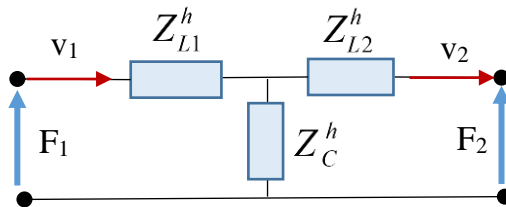
$$s_{22} = \frac{p_{22}}{p_{11}} = \frac{iZ_C}{M^2 \sin(kL)} \left\{ \cos(kL) + \frac{\beta M}{k} \sin(kL) \right\}$$

Đối với môi trường với thiết diện mặt cắt ngang thay đổi, sơ đồ mạch điện tương đương được chỉ ra trên Hình 2.15. Vì diện tích mặt trước và mặt sau khác nhau thay đổi dọc theo hướng truyền sóng nên trở kháng dọc Z_L sẽ khác nhau.



Hình 2.15. Môi trường với thiết diện không đồng nhất và sơ đồ mạch tương đương

Vì có sự biến đổi qua lại giữa các biến trong hệ thống điện và cơ: dòng điện \leftrightarrow vận tốc, điện áp \leftrightarrow lực tác dụng, nên ta có mạch:



Hình 2.16. Mạch tương đương dạng T của bộ khuếch đại

Áp dụng định luật dòng điện và điện áp Kirchhoff, ta nhận được hệ phương trình:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_{L1}^h + Z_C^h) & -Z_C^h \\ Z_C^h & -(Z_{L2}^h + Z_C^h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

Đồng nhất phương trình (2.86) và (2.87), ta nhận được các hàm trở kháng tương:

$$\begin{aligned}
Z_{L1}^h &= \frac{iZ_C}{M \sin(kL)} \left\{ 1 - M \cos(kL) + \frac{M\beta}{k} \sin(kL) \right\} \\
Z_{L2}^h &= \frac{iZ_C}{M \sin(kL)} \left\{ 1 - \frac{1}{M} \cos(kL) + \frac{M\beta}{k} \sin(kL) \right\} \\
Z_C^h &= \frac{-iZ_C}{M \sin(kL)}
\end{aligned} \tag{2.88}$$

2.3. Tổn thất đầu rung gồm áp điện

Các mô hình phân tích ban đầu của đầu rung siêu âm coi đầu rung là một thiết bị lý tưởng, nơi tất cả các loại tổn thất bị bỏ qua [31]. Sau đó, khi các hệ thống điện liên tục xuất hiện, nghiên cứu về những tổn thất này bắt đầu [45]. Sự báo cáo đầu tiên của tổn thất được đưa ra thông qua một điện trở và một phản ứng tại nhánh điện của đầu rung. Những tổn thất này chỉ có giá trị ở một tần suất cụ thể và ở mức độ kích thích thấp.

Nói chung, có ba loại tổn thất có liên quan đến đầu rung siêu âm: tổn thất điện môi (điện), tổn thất áp điện (cơ điện) và tổn thất cơ học [46]. Tổn thất điện môi và áp điện chỉ liên quan đến vật liệu áp điện, trong khi tổn thất cơ học có liên quan đến cả điện và cơ. Tổn thất điện môi phụ thuộc vào loại vật liệu áp điện và mức điện áp dẫn động được áp dụng cho đầu rung. Tổn thất áp điện có liên quan đến cả ứng suất và điện trường [46]. Tổn thất cơ học bao gồm tổn thất tiếp xúc tại các giao diện giữa các bộ phận, giảm xóc ma sát trong ren vít và giảm xóc bên trong của các bộ phận kim loại [47]. Ảnh hưởng của tổn thất tiếp xúc có thể được biểu diễn bằng các tham số điện trở gộp giữa các vùng trong mạng tương đương. Trong trường hợp phân áp điện nằm gần mặt phẳng nút biên độ, được xem xét trong thiết kế hiện tại, tổn thất tiếp xúc có ảnh hưởng không đáng kể đến tần số cộng hưởng. Điều này là hợp lý với giả định về độ phẳng và độ mịn của bề mặt bộ phận [47]. Hơn nữa, hiệu ứng giảm chấn ma sát của các ren vít, nằm gần mặt phẳng nút, cũng được cho là không đáng kể, và do đó, chỉ có giảm chấn bên trong được xem xét trong phân tích này.

Ở công suất cao, ảnh hưởng của những tổn thất trở nên phức tạp và phụ thuộc vào các yếu tố khác. Ví dụ, tổn thất điện môi trở nên phi tuyến ở công suất đầu vào lớn và tổn thất cơ học tăng nhanh khi mức kích thích tăng lên. Những tổn thất này ngày càng trở nên phức tạp khi mức tần số kích thích cao hơn [48]. Tuy nhiên, hệ thống vẫn hình thành những tổn thất này ở mức kích thích thấp, chỉ là bớt phức tạp hơn [49].

Các tổn thất được xem xét có thể được đưa vào mô hình phân tích thông qua việc sử dụng số phức để định nghĩa về các tính chất vật liệu, ở đây các phần ảo đại diện cho tổn thất hoặc các thành phần lệch pha ở dạng tuyến tính. Điều này mang lại sự đồng thuận tốt hơn với các kết quả đo bằng thực nghiệm so với khả năng chỉ sử

dụng các giá trị thực của các hằng số. Dạng phức của các tính chất vật liệu được định nghĩa như sau [33, 46]:

$$\begin{aligned}
 c_{33}^{E*} &= c_{33}^E (1 + i \tan \delta_m) \\
 s_{33}^{E*} &= s_{33}^E (1 - i \tan \delta_m) \\
 \varepsilon_{33}^{T*} &= \varepsilon_{33}^S (1 - i \tan \delta_e) \\
 d_{33}^* &= d_{33} (1 - i \tan \delta_k) \\
 k_{33}^* &= k_{33} (1 + i \tan \delta_k)
 \end{aligned} \tag{2.81}$$

Trong đó c_{33}^E là hệ số độ cứng đàn hồi của vật liệu không áp điện, s_{33}^E là hệ số thích ứng đàn hồi của vật liệu áp điện tại một điện trường không đổi và ε_{33}^T , d_{33} và k_{33} là hằng số điện môi, hằng số áp điện ở chế độ độ dày và hằng số khớp nối cơ điện cho chế độ độ dày của đĩa tương ứng. $\delta_m, \delta_e, \delta_k$ là các tiếp tuyến tổn thất yếu tố khớp nối đàn hồi, điện môi và cơ điện, chúng có thể được tìm thấy trong bảng dữ liệu của nhà sản xuất cho vật liệu áp điện hoặc có thể được tính toán từ các hệ số vật liệu như sau [39]:

$$\begin{aligned}
 \tan \delta_m &= \frac{1}{Q_m} \\
 \tan \delta_e &= \frac{1}{Q_e} \\
 \tan \delta_k &= \frac{1}{Q_k}
 \end{aligned} \tag{2.82}$$

Trong đó Q_m, Q_e và Q_k là các hệ số chất lượng (Q) của hằng số độ cứng đàn hồi, hằng số áp điện và hằng số điện môi tương ứng. Hằng số áp điện cũng có thể được tính như sau [19]:

$$d_{33} = \varepsilon_{33}^T \cdot g_{33} \tag{2.83}$$

trong đó g_{33} là hằng số điện áp của vật liệu áp điện.

2.4. Mô hình hóa tải trọng bên ngoài

Trong các thiết bị rung siêu âm công suất cao, đầu rung siêu âm bao gồm các đĩa gốm áp điện giữa một khối kim loại phía trước và phía sau. Khối phía trước thường tiếp xúc với tải trọng bên ngoài trong khi khối phía sau thường tự do. Do đó, đối với hoạt động của các đầu rung, cần xem xét tải trọng trên khối lượng phía trước, trong khi tải trọng trên mặt bức xạ phía sau của đầu rung có thể được bỏ qua. Như thể hiện trên Hình 2.10, trong mạch tương đương hoàn chỉnh của đầu rung, trở kháng tải Z_{front} đại diện cho phản ứng của tải trọng trên bề mặt đầu ra của khối lượng phía trước. Điều này thay đổi cho các ứng dụng siêu âm khác nhau và đặc biệt khó xác định trong thiết bị

siêu âm công suất cao. Tuy nhiên, một biểu thức gần đúng có thể được sử dụng để tính toán giá trị trở kháng tải và được đưa ra bởi [49]:

$$Z_{front} = i\rho_L c_L S_L \tan(k_L l) \quad (2.84)$$

trong đó ρ_L , c_L , S_L , k_L và l lần lượt là mật độ, tốc độ sóng, diện tích mặt cắt ngang của môi trường tải, số sóng và chiều dài của môi trường tải. Chiều dài của môi trường tải phụ thuộc vào ứng dụng và được coi là chiều dài của công cụ được sử dụng cho các ứng dụng khoan hoặc gia công siêu âm.

2.5. Kết quả mô hình giải tích

Phần mềm MATLAB được sử dụng để giải các phương trình trở kháng của các vùng đầu rung và để giải mạng điện tương đương. Chương trình xây dựng có sức mạnh và sự linh hoạt để mô tả các biến ở dạng phức. Một tập các lệnh được viết thể hiện ở các bước tính, cụ thể: (1) Khai báo các dữ liệu đầu vào, bao gồm: tính chất vật liệu, kích thước các bộ phận và các kích thích điện; (2) Tính toán trở kháng sóng âm của từng vùng và xây dựng mạng tương đương tổng thể; (3) Đơn giản hóa mạch nhánh sóng âm và biến đổi trở kháng sóng âm tương đương với nhánh điện; (4) Tính toán trở kháng tổng thể của mạng; (5) Vẽ phổ trở kháng và sơ đồ pha; (6) Tính toán dữ liệu cộng hưởng và phản cộng hưởng; (7) Tính toán dòng điện đầu vào và công suất cho các kích thích khác nhau.

Trong nghiên cứu này, một mô hình hồi quy phi tuyến để xác định các hằng số phức tạp của vật liệu áp điện được thiết lập. Mục đích của mô hình hồi quy là tìm ra các thông số tối ưu của các biến thiết kế tương ứng với 06 thông số của vật liệu áp điện:

$$\mathbf{X}_D = [k_t \quad \tan \delta_k \quad \tan \delta_e \quad \tan \delta_m \quad c_{33}^D \quad \epsilon_{33}^S / \epsilon_0] \quad (2.85)$$

Hàm tối ưu của thuật toán là sai số bình phương trung bình (MSE) của biên độ trở kháng (A) trong thang logarit và góc pha (ϕ):

$$MSE1 = \frac{1}{nos} \sum_{k=1}^{nos} [\log_{10}(\tilde{A}_k) - \log_{10}(A_k)]^2 \quad (2.86)$$

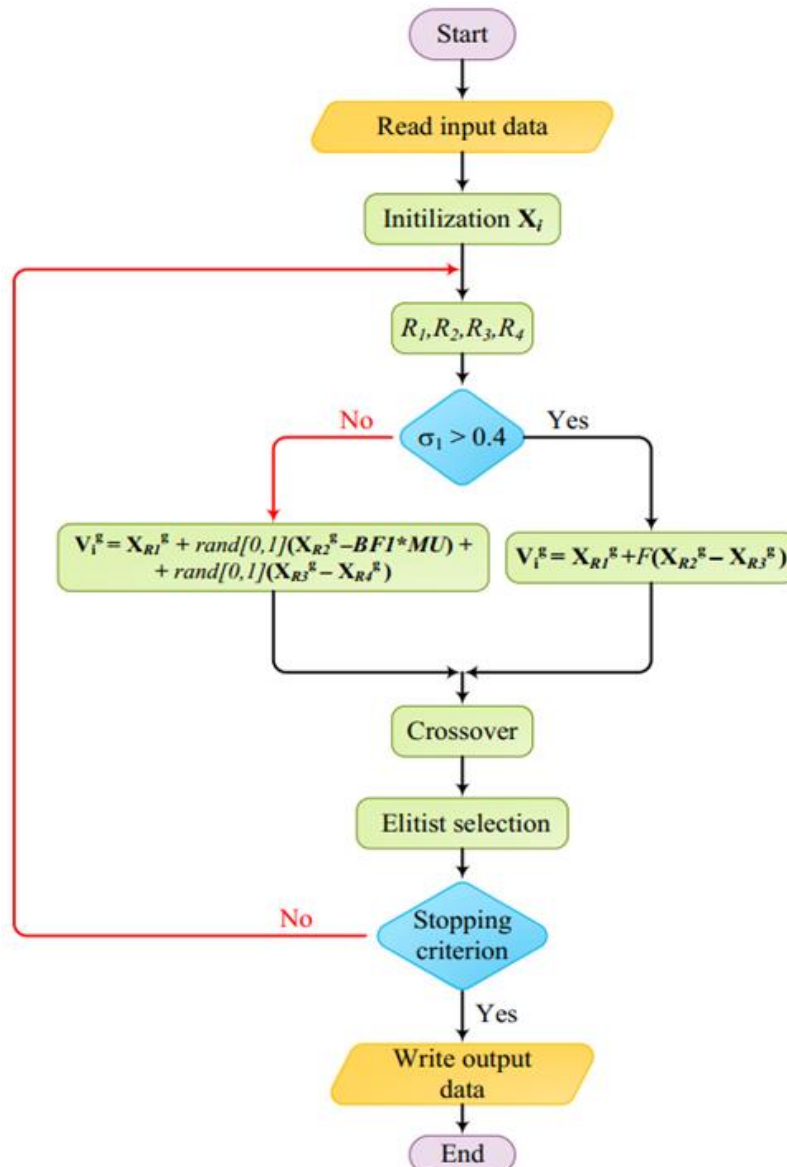
$$MSE2 = \frac{1}{nos} \sum_{k=1}^{nos} (\tilde{\phi}_k - \phi_k)^2 \quad (2.87)$$

trong đó: nos là số điểm lấy dữ liệu; \tilde{A}_k, A_k là dữ liệu đo từ thực nghiệm và kết quả mô phỏng của biên độ tại điểm thứ k; $\tilde{\phi}_k, \phi_k$ là dữ liệu đo từ thực nghiệm và kết quả mô phỏng của góc pha tại điểm thứ k, tương ứng.

Quá trình tối ưu hóa được thiết lập để tìm các tham số tối ưu bằng cách giảm tối thiểu sai số bình phương trung bình gốc (MSE):

$$\min : f(\mathbf{X}) = MSE1 + MSE2 \quad (2.88)$$

Để xử lý bài toán này, phương pháp hồi quy HDS (the hybrid differential evolution and symbiotic organism search) lần đầu tiên được phát triển cho việc tìm nghiệm tổng quát của ngăn xếp áp điện trong đầu rung siêu âm, áp dụng thành công để ước tính các thông số vật liệu của vật liệu áp điện với độ chính xác cao. Việc phát triển thuật toán hồi quy phi tuyến dựa trên HDS để tính toán các hệ số chính của vật liệu áp điện có nhiều ưu điểm vượt trội so với các phương pháp trước đây. Sơ đồ thuật toán của phương pháp HDS được thể hiện trên Hình 2.17.



Hình 2.17. Sơ đồ thuật toán của HDS

Các mã MATLAB được lập trình dựa trên các mô hình toán học của Martin [42], IEEE và Kwok [50] để tính toán quang phổ trở kháng pha của bốn mẫu vật liệu áp điện là PVDF, P (VDF-TrEE), 1-3 / PZT / Epoxy Composite và Chì Metaniobate. Dữ liệu về tính chất vật liệu và hằng số của các vật liệu này được thể hiện lần lượt trong Bảng 2.1 và Bảng 2.2.

Bảng 2.1. Bảng tính chất của vật liệu áp điện

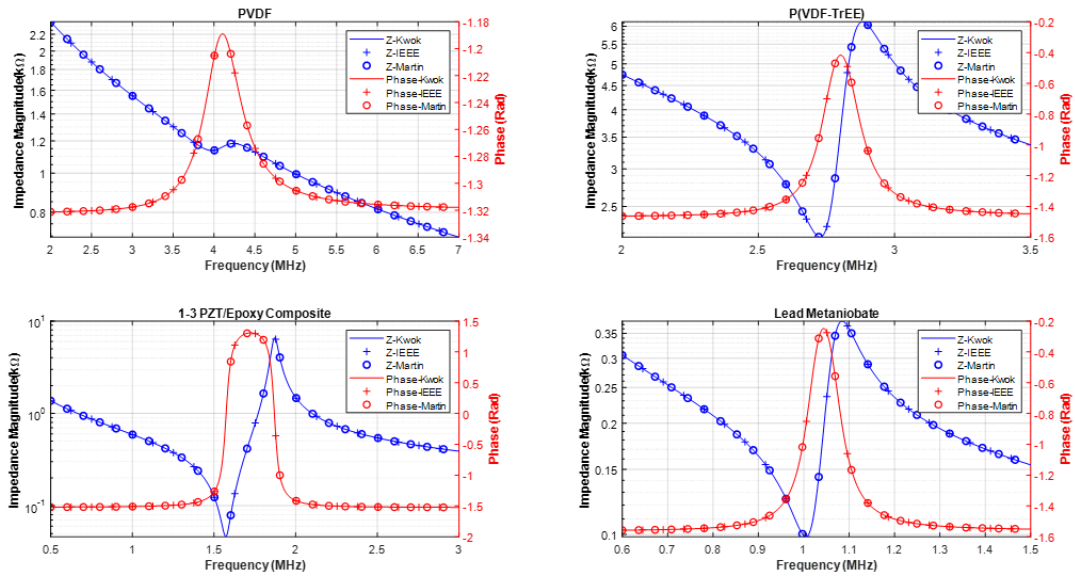
Vật liệu	Mật độ (g/m ³)	Độ dày (mm)	Bán kính (mm)
PVDF	1.78	0.27	14
P(VDF-TrEE)	1.88	0.408	14
1-3/PZT/Epoxy Composite	3.9	1.06	14
Chì Metaniobate	6	1.55	25.2

Bảng 2.2. Bảng hằng số vật liệu của vật liệu áp điện

Vật liệu	k_t	$\tan \delta_k$	$\tan \delta_e$	$\tan \delta_m$	$c_{33}^D, (N/m^2)$	$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$
PVDF	0.146	0.0362	0.265	0.133	8.7	6.3
P(VDF-TrEE)	0.262	0.0143	0.106	0.051	10.1	4.38
1-3/PZT/Epoxy Composite	0.58	-0.0074	0.042	0.0237	61.3	116
Chì Metaniobate	0.334	0.0008	0.0089	0.063	65.8	258

Trong đó ϵ_0 là hằng số điện môi của không khí và bằng 8.85×10^{-12} (F/m).

Kết quả mô phỏng được thể hiện qua các đồ thị so sánh sau:

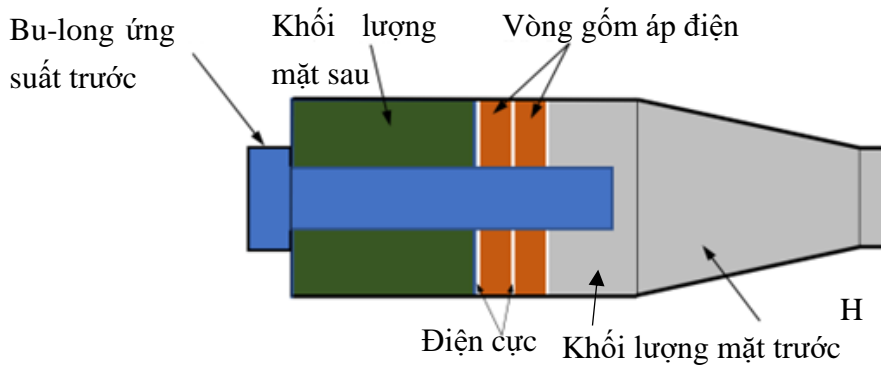


Hình 2.18. So sánh mô hình Martin với các mô hình của IEEE và Kwok

Hình 2.18 cho thấy dữ liệu mô hình hóa về cường độ trở kháng và giai đoạn trở kháng của ba mô hình với cùng một dữ liệu đầu vào từ Bảng 2.2. Kết quả nhận được cho thấy ba mô hình này cho kết quả giống nhau tương ứng. Điều này là hợp lý vì IEEE và Kwok là các mô hình cụ thể của giải pháp chung của Martin với: (i) một vòng áp điện và (ii) độ dày của vòng tương đối nhỏ. Vì lý do này, các phần sau sẽ sử dụng mô hình của Martin để tính toán các thông số vật liệu của một ngăn xếp áp điện với độ dày lớn được lắp đặt trong các đầu rung siêu âm để hàn, làm sạch và gia công siêu âm.

Dựa trên lý thuyết tính toán, ứng dụng vào đầu rung siêu âm đã được thiết kế cho nghiên cứu này (Hình 2.19). Ở chế độ làm việc với tần số 20kHz và biên độ dao

độ dày 10 μm , kích thước và các thông số vật liệu được cho trong Bảng 2-3 và Bảng 2-4, đồ thị phổ trở kháng và sơ đồ pha được thể hiện trên Hình 2.20.



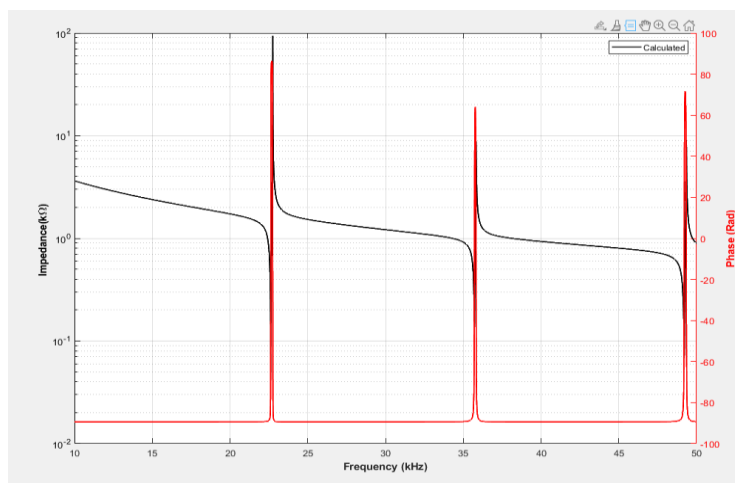
Hình 2.19. Thiết bị đầu rung siêu âm

Bảng 2-3. Kích thước các bộ phận trong đầu rung siêu âm

Thành phần	Thông số			
	Đường kính ngoài (mm)	Kích thước lỗ (mm)	Chiều dài (mm)	Vật liệu
Khối sau	38	12	36	Thép C45
Vòng Ceramic	38	16	8	PZT8
Bulong lục	12		60	Titanium
Tấm trước	38	12	15	Titanium
Đoạn côn			45	Titanium

Bảng 2-4. Thông số các loại vật liệu

Vật liệu	Các thông số vật liệu			
	Khối lượng riêng (kg.m^{-3})	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Vận tốc truyền âm (m.s^{-1})
PZT-8	7600	65	0.31	2950
Đồng	8900	115	0.31	3595
Titanium	4418	110	0.34	4816
Thép C45	7800	209	0.3	5150



Hình 2.20. Tổng trở kháng và sơ đồ pha

2.6. Kết luận

Áp dụng lý thuyết về chuyển động sóng một chiều trong chất rắn đàn hồi để tạo ra một mô hình phân tích cho đầu rung siêu âm, Chương 2 đã thực hiện được một số kết quả:

- Xây dựng được mô hình vật lý cho đầu rung siêu âm, thiết lập được các điều kiện biên, điều kiện về mối quan hệ trở kháng giữa các mặt gián đoạn.

- Xây dựng được mô hình mạch điện cho đầu rung siêu âm bằng cách tiếp cận mạch tương đương Mason một chiều.

- Ứng dụng thuật toán DHS để tính toán hồi quy các tham số phức của vật liệu PZT dựa trên dữ liệu đo từ các tấm PZT, đây là kết quả có ý nghĩa đặc biệt quan trọng khi tính toán, thiết kế đầu rung siêu âm sử dụng cá tấm PZT thương mại do các thông số kỹ thuật không thực sự được quy chuẩn bởi các nhà sản xuất khác nhau.

- Xây dựng các chương trình Matlab tính toán được phổ trở kháng phức (biên độ - pha). Đây là dữ liệu quan trọng phục vụ thiết kế đầu rung cũng như bộ nguồn và xác lập chế độ làm việc cho mạch điều khiển bộ nguồn siêu âm.

Tuy nhiên, mô hình xây dựng chỉ tính toán, phân tích cho dãy tấm gốm áp điện cùng loại. Đồng thời, mô hình xây dựng không có khả năng phân tích được trở kháng trên từng tấm vật liệu áp điện, cũng như không cho phép tính toán lực, ứng suất trên mỗi tấm. Đối với vật liệu áp điện có sự tổn thất năng lượng khi có thay đổi cấu hình cũng như điều kiện làm việc dẫn đến sinh nhiệt, gây tiếng ồn hoặc phá hủy nghiên cứu này vẫn chưa đề cập đến. Đồng thời, tương tự như các nghiên cứu đã công bố, kết quả số từ mô hình này chủ yếu mới sử dụng cho phân tích đáp ứng điện của đầu rung, mà các thông số cơ quan trọng khác như biên độ rung động, ứng suất tại các thành phần, vv, chưa được đề cập. Và các thông số đó thường cần sử dụng mô hình phần tử hữu hạn. Nội dung này sẽ được trình bày trong phần tiếp theo.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN ĐẦU RUNG SIÊU ÂM

3.1. Giới thiệu

Nhu cầu về đầu rung siêu âm đã tăng lên đáng kể trong vài thập kỷ qua khi các ứng dụng siêu âm khác nhau đã được giới thiệu hoặc phát triển. Chúng bao gồm cắt siêu âm, hàn siêu âm và khoan siêu âm. Thiết kế của đầu rung siêu âm có thể được mô tả là quá trình tìm kiếm các biến thiết kế tối ưu. Chúng bao gồm các biến xác định vật liệu và kích thước của các phần tử cơ học (sóng âm) và áp điện, giúp giảm thiểu hoặc tối ưu hóa một số mục tiêu nhất định như công suất đầu vào và biên độ đầu ra. Các mục tiêu này cũng phải tuân theo các yêu cầu cụ thể như tần số cộng hưởng, giới hạn điện áp đầu vào, ứng suất trước áp dụng và các ràng buộc hình học [21].

Đầu rung ban đầu được thiết kế thông qua việc sử dụng các mô hình phân tích một chiều và các nguyên mẫu thử nghiệm [51]. Các mô hình phân tích đơn giản hóa bộ chuyển đổi bằng cách sử dụng giải pháp của phương trình sóng để tính toán kích thước hình học. Nguyên lý truyền sóng thông qua các phương tiện khác nhau được sử dụng để chọn vật liệu thích hợp cho các bộ phận đầu rung. Đo thử nghiệm các nguyên mẫu để mô tả và xác nhận mô hình phân tích. Tuy nhiên, những cách tiếp cận này có những nhược điểm sau:

- Nghiệm của phương trình sóng trong mô hình giải tích rất phức tạp và đôi khi đòi hỏi các giả định không thực tế.
- Tiếp cận theo cách thử nghiệm rất tốn kém về số lượng nguyên mẫu chế tạo, thời gian và thiết bị cần thiết cho thử nghiệm.
- Các đặc tính tổng thể của đầu rung áp điện bị ảnh hưởng bởi các yếu tố khác nhau, bao gồm kích thước của khối lượng mặt trước và mặt sau, tính chất của vật liệu áp điện và các điều kiện biên điện và cơ học, có thể không được xem xét trong mô hình ban đầu.

Phân tích số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) lần đầu tiên được giới thiệu để mô hình hóa vật liệu áp điện bằng phương trình sóng ba chiều (3D) vào năm 1970 [52]. FEM sử dụng một quá trình phân tích số dựa trên sự phân rã một hệ thống thành các yếu tố rời rạc để giải quyết hoặc mô phỏng đối tượng, nhằm mục đích để có được một lời giải gần đúng hoặc ước tính cho các đối tượng khác nhau. Việc sử dụng FEM trong phân tích, thiết kế và tinh chỉnh sản phẩm đã phát triển song song với những tiến bộ về sức mạnh tính toán, nơi nhiều mã FEM đã được phát triển để cung cấp kết quả chính xác cho các đối tượng phức tạp.

Phân tích FEM của một hệ thống được phân loại là một kỹ thuật tìm nghiệm gần đúng vì nó xem xét các thông số hoàn hảo về tính chất vật liệu và điều kiện biên. Trong thực tế, các tham số này chứa sai sót hoặc không hoàn hảo. Tuy nhiên, mức độ sai lệch trong xấp xỉ có thể được giảm thiểu bằng cách xem xét các tham số mô phỏng hệ thống thực. FEM đòi hỏi một lượng lớn bộ nhớ tính toán và thời gian, đặc biệt là để phân tích các đối tượng 3D làm việc ở tần số cao, với sự phát triển trong xử lý máy tính, những yêu cầu này hoàn toàn có thể đạt được [53]. Trong chương này, các nguyên tắc của thiết kế đầu rung Langevin, sử dụng biên dạng của bộ khuếch đại theo dạng côn làm khối lượng phía trước, được sử dụng để xây dựng mô hình phân tử hữu hạn.

3.2. Các tham số thiết kế đầu rung siêu âm

Đầu rung siêu âm được sử dụng để chuyển năng lượng điện tần số cao thành rung động cơ học tần số cao. Thông thường, các đầu rung siêu âm công suất được thiết kế để hoạt động trong dải tần số từ 20-100kHz để có được cường độ đầu ra cao hơn. Các thông số thiết kế của đầu rung áp điện là khác nhau tùy thuộc vào ứng dụng. Tuy nhiên, có một số thông số phổ biến được chia sẻ giữa hầu hết các ứng dụng. Các thông số này, cùng với các yêu cầu đặc biệt của thiết kế được đề xuất sau đây:

3.2.1. Tần số lan truyền và bước sóng

Tần số truyền được lựa chọn dựa trên các yêu cầu của ứng dụng. Hầu hết các đầu rung siêu âm được thiết kế được điều khiển ở tần số cộng hưởng để tối ưu hóa biên độ rung. Trong trường hợp đầu rung chế độ dọc, người ta thường sử dụng tần số cộng hưởng của chế độ rung dọc đầu tiên (chế độ cơ bản) nơi có thể thu được biên độ cao nhất.

Khi thiết kế bộ cộng hưởng siêu âm, tần số cộng hưởng được sử dụng để tính bước sóng như sau:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

Trong đó c là vận tốc sóng của rung động dọc phụ thuộc vào tính chất sóng âm của bộ cộng hưởng. Đối với bộ cộng hưởng mặt cắt ngang không đồng đều, chẳng hạn như bộ cộng hưởng hàm mũ, bước sóng có thể được tính bằng [54, 55]:

$$\lambda = \frac{c}{2\pi f} \sqrt{(2\pi)^2 + (\ln n)^2} \quad (3.2)$$

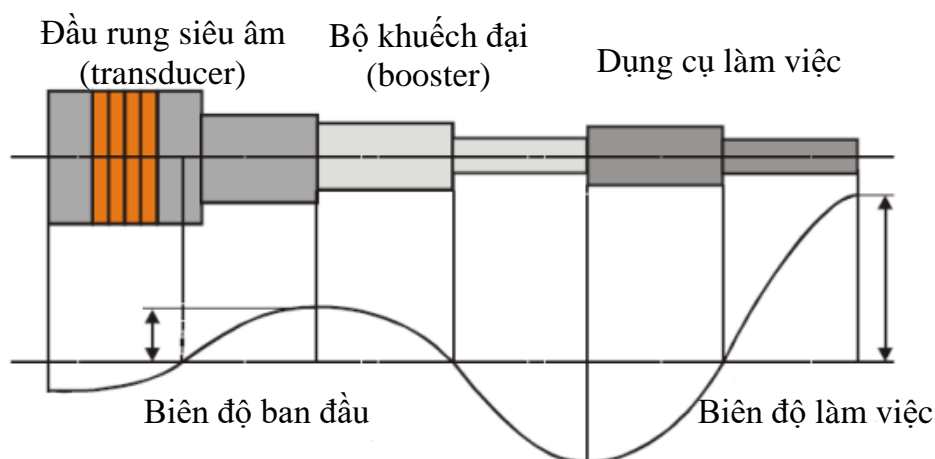
Trong đó n là tỷ số giữa bán kính đầu nhỏ với bán kính đầu lớn.

Bước sóng được sử dụng để tính toán chiều dài của bộ cộng hưởng. Nói chung, bước sóng này có thể bằng một phần tư bước sóng, nửa bước sóng hoặc một bước

sóng. Tuy nhiên, các bộ cộng hưởng nửa bước sóng được sử dụng nhiều nhất trong các ứng dụng siêu âm.

Đầu rung siêu âm là sự kết hợp của các bộ phận khác nhau với các vật liệu khác nhau. Các phương trình trên không thể được áp dụng trực tiếp để tính toán chiều dài tổng thể. Thay vào đó, mô hình đầu rung được chia thành các phần, trong đó các phương trình này có thể được áp dụng cho từng phần riêng lẻ.

Tương tự như bộ cộng hưởng siêu âm, hầu hết các đầu rung siêu âm được thiết kế với mô hình một nửa bước sóng. Điều này có ưu điểm là có thể dễ dàng kết hợp với các bộ phận nửa bước sóng khác như bộ khuếch đại và dụng cụ làm việc để tạo thành toàn bộ hệ thống siêu âm mà không thay đổi hình dạng riêng của từng bộ phận, như trong Hình 3-1. Một ưu điểm khác của tổng hợp một nửa bước sóng là không có lực tác dụng tại các giao diện giữa các bộ phận riêng lẻ (trong trường hợp lý tưởng). Do đó, các điều kiện biên của từng phần trong toàn bộ hệ thống tổng hợp giống như các điều kiện của từng phần riêng biệt, tự do ở cả hai đầu. Mỗi phần có thể được phát triển theo tần số cộng hưởng được chỉ định và sau đó các bộ phận này được tổng hợp để tạo ra toàn bộ hệ thống [21].



Hình 3.1. Nguyên lý nửa bước sóng

3.2.2. Lựa chọn các thành phần áp điện

Vật liệu áp điện được phân loại theo thành phần hóa học của chúng và các điều kiện ứng dụng cụ thể. Để thiết kế hiệu quả của một đầu rung siêu âm công suất, các tiêu chí sau được yêu cầu [56]: vật liệu áp điện có thể chịu được điện áp truyền qua cao và các tải trọng cơ học lớn; có tổn thất điện môi thấp ở mức độ lan truyền cao và hằng số điện môi cao; có hệ số khớp nối cao giữa năng lượng điện và cơ học và các đặc tính ổn định (ít phụ thuộc vào thời gian và nhiệt độ).

Kích thước của các thành phần áp điện được lựa chọn dựa trên công suất sóng âm đầu ra cần thiết, chế độ rung và loại mô hình đầu rung. Trong trường hợp đầu rung công suất chế độ dọc, độ dày của các thành phần áp điện thường nhỏ hơn một phần

mười bước sóng. Giới hạn độ dày này được sử dụng để khớp nối cao hợp lý giữa năng lượng điện và cơ học và để cải thiện khả năng xử lý điện [33].

Sự dịch chuyển của mỗi phần tử là rất nhỏ, do đó một số thành phần được kết nối cơ học theo chuỗi để sự dịch chuyển của toàn bộ cụm ngăn xếp bằng tổng của các dịch chuyển riêng lẻ [20]. Tuy nhiên, việc tăng số lượng phần tử trong ngăn xếp dẫn đến sự gia tăng tổn thất cơ học do sự gia tăng kích thước của ranh giới giữa các thành phần này. Kích thước chiều ngang của các thành phần thường nhỏ hơn một phần tư bước sóng để tránh khớp nối giữa chế độ dọc và ngang. Ngoài ra, điều này ngăn chặn sự kích thích có thể của các chế độ không mong muốn. Hình dạng hình học của thành phần được lựa chọn dựa trên hình dạng của thiết kế đầu rung được đề xuất và phương pháp áp dụng ứng suất trước trên các thành phần áp điện. Đối với bộ chuyển đổi Langevin, với bu lông ứng suất trước trung tâm, một thành phần hình vòng thường được chọn [57].

3.2.3. Lựa chọn phần kim loại

Như đã trình bày trong chương 2, để truyền năng lượng sóng âm hiệu quả giữa các khối của đầu rung siêu âm, vật liệu các khối cần thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng sóng âm (2.29). Trong đó Z_c , Z_f và Z_b lần lượt là trở kháng sóng âm của vật liệu áp điện và khối lượng mặt trước và mặt sau.

Một điều kiện khác để sử dụng hiệu quả năng lượng sóng âm là dẫn hướng hầu hết các rung động được tạo ra trong vật liệu áp điện về phía khối lượng phía trước thay vì khối lượng phía sau nơi năng lượng không được yêu cầu và do đó thể hiện sự mất năng lượng. Trong một bộ chuyển đổi chế độ dọc, năng lượng sóng âm được tạo ra trong vật liệu áp điện truyền đến cả khối lượng trước và sau. Do đó, để giảm thiểu tổn thất năng lượng, khối lượng phía sau phải có trở kháng sóng âm cao hơn khối lượng phía trước, do đó phần lớn năng lượng sẽ được dẫn hướng về khối lượng phía trước. Một danh sách các vật liệu được đề nghị cho các ứng dụng siêu âm có thể đáp ứng hai điều kiện này được hiển thị trong Bảng 3-1. Vận tốc sóng và trở kháng sóng âm đặc trưng được trình bày cho từng vật liệu.

Bảng 3-1. Tính chất của một số vật liệu đề xuất [58].

STT	Vật liệu	Vận tốc sóng (m/s)	Đặc tính trở kháng sóng âm ($N.s/m^3$)
1	Hợp kim Grade 5 Titanium (Ti-6Al-4V)	4900	39.2×10^6
2	Hợp kim nhôm (AlCuMGPb 2011)	5000	14.25×10^6
3	Hợp kim nhôm (AlCuMg2 2024)	5100	14.28×10^6
4	Thép	5250	41.2×10^6

3.3. Xây dựng mô hình phần tử hữu hạn đầu rung siêu âm

Rung động siêu âm ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong thực tế kỹ thuật. Các thành phần chính trong hệ thống siêu âm thường là thiết bị thương mại. Việc sử dụng các thiết bị có sẵn sẽ giúp tiết kiệm thời gian thiết kế. Tuy nhiên, việc sử dụng các thiết bị có sẵn này nhiều khi không phù hợp với yêu cầu như biên độ rung của bộ chuyển đổi và kích thước của hệ thống rung. Do vậy, cần phải thiết kế lại một số bộ phận như bộ khuếch đại cho phù hợp với yêu cầu sử dụng. Trong nghiên cứu, để phân tích và thiết kế đầu rung siêu âm, FEM đã và đang được sử dụng nhưng các kết quả công bố còn nhiều vấn đề chưa rõ, chưa đề cập hoặc chưa công bố. Phân tích phần tử hữu hạn là một bước rất quan trọng trong quá trình thiết kế sản phẩm. Nó đã được áp dụng rộng rãi trong phân tích thiết bị siêu âm. Hassan Al-Budairi và cộng sự [59] đã sử dụng phân tích phần tử hữu hạn để tối ưu hóa cấu trúc cơ học của đầu rung siêu âm xoắn dọc. Mohamed Y. Baraya [60] đã sử dụng FEM để hỗ trợ thiết kế đầu rung Langevin dùng trong hệ thống đo lường cơ điện với sai số giữa phân tích phần tử hữu hạn và thực nghiệm nhỏ hơn 8%. Trong quá trình thực hiện phân tích phần tử hữu hạn, việc lựa chọn kích thước mắt lưới và loại phần tử là rất quan trọng [61] vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của kết quả và thời gian tính toán của mô hình. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu đã công bố liên quan đến thiết bị siêu âm chỉ sử dụng một loại phần tử duy nhất cho các thành phần có tính chất điện và cơ khác nhau [62-64] hoặc công bố không được trình bày chi tiết [65-69]. Điều này dẫn đến nhu cầu sử dụng các phần tử riêng biệt khi phân tích và thiết kế. Hơn nữa, không có kết quả điểm chuẩn nào cho phần tử áp điện, trong mô hình phần tử hữu hạn, đã được tìm thấy trong tài liệu. Mặt khác, độ chính xác của các kết quả mô phỏng số, trong các kết quả đã công bố, thường không được cung cấp đủ độ chính xác. Do đó, rất cần thiết phải sử dụng các phương pháp chia lưới khác nhau và chọn các loại phần tử khác nhau cho các thành phần khác nhau.

Để cải thiện độ chính xác của quá trình mô phỏng số, một số phương pháp đã được đề xuất. Dựa trên đặc tính đối xứng trục của phân tích phần tử hữu hạn, Chen và cộng sự [70] đề xuất nghiên cứu hiệu suất sóng âm của đầu rung siêu âm chỉ với một mô hình 1/18 của đối tượng thực tế. Để nghiên cứu tác động của các điện cực và kết nối điện của áp điện đối với các đặc tính động của chúng, Wang [71] đã sử dụng mô hình phần tử hữu hạn 3D của một phần mười hai cho đầu rung hình trụ áp điện đa lớp phân cực hướng tâm. Với sai số nhỏ hơn 6% so với tần số cộng hưởng lý thuyết, mô hình phân tích không chỉ nâng cao hiệu quả tính toán mà còn đảm bảo độ chính xác của mô phỏng.

Không có gì ngạc nhiên khi nói rằng độ chính xác và hiệu quả của giải pháp FEM phụ thuộc vào chất lượng của lưới, được xác định bởi việc lựa chọn kích thước

phần tử và phân phối lưới. Không có quy tắc chung để chọn các tham số này vì các lựa chọn tốt nhất phụ thuộc vào vấn đề cụ thể đang được giải quyết. Thay vào đó, việc lựa chọn các tham số này thường đòi hỏi một quá trình thử và sai lặp đi lặp lại và kinh nghiệm của người lập mô hình. Tuy nhiên, bằng cách chú ý cẩn thận đến lưới và điều chỉnh kích thước phần tử và phân phối lưới khi cần thiết, FEM có thể cung cấp các giải pháp có độ chính xác cao cho các vấn đề phức tạp trong các lĩnh vực khác nhau. Do đó, trong phần này, một mô hình phần tử hữu hạn đầy đủ ở dạng 2D và 3D sử dụng các loại phần tử khác nhau và phân phối lưới hiệu quả sẽ được đề xuất. Tiếp theo, mô hình đã được xác minh được mở rộng để nghiên cứu ảnh hưởng của lực hàn.

3.3.1. Cơ sở lý thuyết

Đầu rung siêu âm là thiết bị có chức năng biến đổi điện năng thành cơ năng nên các thông số đầu vào cho mô hình phần tử hữu hạn phải được tính toán chính xác đặc biệt là các thông số của vật liệu PZT. Đây là một trong những thông số rất quan trọng, có ảnh hưởng lớn nhất đến kết quả mô phỏng số.

3.3.1.1. Phương trình của các phần tử hữu hạn áp điện

Thông qua các ký hiệu của Tiêu chuẩn IEEE về áp điện, các phương trình cấu thành 3D của vật liệu áp điện tuyến tính được đưa ra bởi:

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{32} \\ c_{13}^E & c_{23}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & 0 & -e_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^E & 0 & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{22}^S & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Trong đó E_i và D_i là các thành phần của vectơ điện trường và vectơ dịch chuyển điện trường, còn T_i và S_i là các thành phần của vectơ ứng suất và biến dạng. Phương trình (3.5) có thể viết lại ở dạng ma trận:

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e^T E \\ D &= e S + \varepsilon^S E \end{aligned} \quad (3.4)$$

Một cách biểu diễn thay thế và tương đương được sử dụng rộng rãi bao gồm việc viết các phương trình cấu thành ở dạng sau:

$$\begin{aligned} S &= s^E T + d^T E \\ D &= d T + \varepsilon^T E \end{aligned} \quad (3.5)$$

Trong đó c^E , ε^S lần lượt là ma trận độ cứng và ma trận hằng số, các chỉ số E là viết tắt của điện trường và S biểu thị cho biến dạng cơ học liên tục; và chúng có quan hệ tương ứng như sau:

$$\begin{aligned} [s^E] &= [c^E]^{-1} \\ [e] &= [d][c^E] \\ [\varepsilon^S] &= [\varepsilon^T] - [d][e]^T \end{aligned} \quad (3.6)$$

Các hệ số áp điện được chứa trong ma trận $[d]$ có cấu trúc đặc trưng cho từng loại vật liệu áp điện. Cấu trúc điển hình của vật liệu gốm áp điện (PZT) phân cực z là:

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Biết rằng PZT thông thường có tính đẳng hướng trong mặt phẳng vuông góc với hướng đánh bóng ($d_{31} = d_{32}$, $d_{15} = d_{24}$)

Các phương trình cấu thành cho đáp ứng biến dạng phẳng ($S_2, S_4, S_6 = 0$) của gốm áp điện có trục phân cực thẳng hàng với trục 03 có đối xứng lục giác đối với trục 3 có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 2c_{44}^E & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 2e_{15} & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_3 \\ S_5 \\ E_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Điện trường E liên hệ với điện thế ϕ bằng:

$$E = -grad \phi \quad (3.9)$$

Trong phân tích phần tử hữu hạn cho PZT cần xác định nút biên thiên của các phần tử như bậc tự do, có vector độ dời cơ học u và vector thế điện trường $\hat{\phi}$. Để xác định các đại lượng cơ và điện liên tục này từ các giá trị nút, đề tài sử dụng các hàm nội suy đa thức N_u và N_ϕ [72]. Do đó, áp dụng biến thể của nguyên tắc FEM cho các phương trình (3.5) và (3.6), ta có thể thu được biểu thức từng phần tử PZT của lưới như sau:

$$m\ddot{u} + d_{uu}\dot{u} + k_{uu}u + k_{u\phi}\hat{\phi} = f \quad (3.10)$$

$$k_{u\phi}^t u + k_{\phi\phi}\hat{\phi} = \hat{Q} \quad (3.11)$$

Trong đó: \ddot{u}, \dot{u} là vector gia tốc và vector vận tốc nút của các phần tử; k_{uu} là ma trận phần tử độ cứng; d_{uu} là ma trận giảm chấn; $k_{u\phi}$ là ma trận ghép áp điện; $k_{\phi\phi}$ là ma

trận độ cứng điện môi; m là ma trận khối lượng; f, Q lần lượt là vectơ lực cơ học và điện tích, bao gồm các đại lượng phân bố vật thể, bề mặt và điểm.

Ma trận giảm chấn

$$d_{uu} = \alpha^{(e)} \iiint_{V_e} \rho N_u^t N_u dV + \beta^{(e)} \iiint_{V_e} B_u^t c^E B_u dV = \alpha^{(e)} m + \beta^{(e)} k_{uu} \quad (3.12)$$

Biểu diễn hành vi giảm chấn cơ học của phần tử, trong đó α và β lần lượt là các hệ số Rayleigh cho ma trận khối lượng và độ cứng. Tùy thuộc vào giá trị của các hệ số α và β , có bốn trường hợp tắt dần:

$\alpha = 0, \beta = 0$ là trường hợp không suy giảm

$\alpha = 0, \beta > 0$ là giảm chấn nhớt hoặc giảm chấn tỷ lệ với độ cứng

$\alpha > 0, \beta = 0$ là giảm chấn tỷ lệ khối lượng

$\alpha > 0, \beta > 0$ là giảm chấn Rayleigh

Các hệ số Rayleigh được xác định từ hai tỷ số tắt dần đã cho tương ứng với hai tần số không bằng nhau ω_i và tỷ lệ tắt dần ζ_i của rung động tương ứng [73]:

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\omega_i \zeta_i \quad (3.13)$$

Tuy nhiên, trong các bài toán mô phỏng, tính toán số trong thiết kế, thường không có trước các tần số dao động và tỷ lệ giảm chấn như vậy. Cùng với đó, nhiều kết cấu hoặc vật liệu là trường hợp giảm chấn nhớt ($\alpha = 0$). Vì vậy, hằng số β có thể được xác định bằng biểu thức (3.15) đối với vật liệu đẳng hướng [74] và biểu thức sau đối với vật liệu áp điện:

$$\beta = 1/\omega_r Q_m \quad (3.14)$$

Trong đó ω_r là tần số góc cộng hưởng của chế độ rung được phân tích và Q_m là hệ số chất lượng cơ học. Hệ số chất lượng cơ học được công bố bởi nhà sản xuất [75] hoặc có thể được xác định bằng thiết bị phân tích trở kháng điện thông qua tần số cộng hưởng f_r và f_1, f_2 lần lượt là các tần số mà biên độ trở kháng nhỏ hơn 3dB so với giá trị cộng hưởng:

$$Q_m = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (3.15)$$

Hằng số giảm chấn β cho gồm áp điện (3.16) có thể được định nghĩa trong ANSYS. Trong Abaqus [76], người dùng có thể chọn mô hình ma trận giảm chấn nhớt, bằng cách sử dụng các đặc tính giảm chấn của vật liệu. Ma trận giảm chấn tỷ lệ với độ nhớt, khối lượng và/hoặc độ cứng sẽ bao gồm các hệ số giảm chấn Rayleigh vật liệu. Ma trận giảm chấn nhớt tổng thể của vật liệu có thể được viết là:

$$D_{viscous} = \sum_{el=1}^{nel} \int_{V_e} \alpha_R^e N_u^t N_u \rho dV + \sum_{el=1}^{nel} \int_{V_e} \beta_R^e B_u^t c^E B_u dV \quad (3.16)$$

Lưới phần tử hữu hạn hoàn chỉnh của môi trường PZT được mô tả bằng một hệ phương trình vi phân tuyến tính với các vectơ U và ϕ là các biến toàn cục tại các nút của lưới, được biểu thị như sau:

$$M\ddot{U} + D_{uu}\dot{U} + K_{uu}U + K_{u\phi}\phi = F \quad (3.17)$$

$$K_{u\phi}^t U + K_{\phi\phi}\phi = Q \quad (3.18)$$

Trong đó:

$$M = \sum_{el=1}^{nel} \int_{V_e} N_u^t N_u \rho dV \quad - \text{ ma trận độ cứng tổng thể} \quad (3.19)$$

$$K_{uu} = \sum_{el=1}^{nel} \int_{V_e} (\nabla N_u)^t c^E (\nabla N_u) dV \quad - \text{ ma trận độ cứng cơ tổng thể} \quad (3.20)$$

$$K_{u\phi} = \sum_{el=1}^{nel} \int_{V_e} (\nabla N_u)^t e^t (\nabla N_\phi) dV \quad - \text{ ma trận liên kết áp điện tổng thể} \quad (3.21)$$

$$K_{\phi\phi} = \sum_{el=1}^{nel} \int_{V_e} (\nabla N_\phi)^t \varepsilon^S (\nabla N_\phi) dV \quad - \text{ ma trận độ cứng điện môi tổng thể} \quad (3.22)$$

F và Q lần lượt là lực tổng thể và vectơ điện tích. Hệ phương trình (3.17, 3.18) là hệ phương trình phần tử hữu hạn nửa rời rạc, trong đó không gian đã rời rạc còn thời gian thì liên tục.

3.3.1.2. Các vòng PZT của mô hình đầu rung siêu âm trong phần mềm Abaqus

Đối tượng trong nghiên cứu này bao gồm cả vòng PZT hay đầu rung siêu âm nói chung. Đây là một cấu trúc đẳng hướng dọc trục, do đó mô hình FEM có thể được chọn là mô hình đối xứng trục hoặc mô hình 3D với bậc tự do dọc trục (DoF) là chủ yếu và DoF xuyên tâm được xem xét. Có 2 hệ tọa độ khác nhau của các mô hình trong ABAQUS. Khi áp dụng mô hình đối xứng trục, hướng 1 là hướng tâm, hướng 2 là hướng trục và hướng 3. Vì vậy, tính chất của PZT áp dụng cho mô hình là phức tạp nhất, tuy nhiên, hiệu quả của mô hình hữu hạn hứa hẹn tốt hơn nhiều so với mô hình 3D. Vì vậy, trong công việc này, chúng tôi sẽ tập trung để hiển thị một mô hình hiệu ứng bằng cách so sánh tất cả các mô hình.

Để mô hình hóa đầu rung siêu âm nói chung, điều quan trọng đầu tiên là xác định 3 nhóm tham số vật liệu PZT, đó là hằng số đàn hồi, áp điện và điện môi. Các vòng PZT được sử dụng trong đầu rung siêu âm có tính đối xứng trong mặt phẳng XY và được phân cực trên trục Z. Các vòng PZT là trục hướng hoặc đẳng hướng trong mặt phẳng vuông góc với hướng phân cực ($d_{31} = d_{32}$, $d_{15} = d_{24}$) và điều kiện cơ học của chúng là biến dạng phẳng ($S_2, S_4, S_6 = 0$) trong mô hình 3D hoặc ứng suất phẳng ($T_2,$

$T_4, T_6 = 0$) trong mô hình đối xứng trục. Do hướng vật liệu của PZT khác với hướng được sử dụng trong ABAQUS, do đó cần phải chuyển đổi các hằng số vật liệu sang hệ tọa độ khác.

Có 2 hệ tọa độ khác nhau của mô hình 3D và mô hình đối xứng trục trong ABAQUS, hướng 1 là hướng tâm, hướng 2 là hướng trục và hướng 3. Vì vậy, ba giá trị trong ma trận điện môi cho hành vi trục hướng D_{11}, D_{22}, D_{33} , được xác định từ dữ liệu của nhà sản xuất đến đầu vào dữ liệu Abaqus như bên dưới:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{33}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{22}^S \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Trong đó, ma trận điện môi $[D]$ trong phương trình (3.25) được sử dụng tương ứng cho mô hình 3D và trong phương trình (3.27) cho mô hình đối xứng trục.

Các đặc tính vật liệu áp điện cho vòng PZT được xác định bằng cách đưa ra 18 hệ số biến dạng, d_{mkl} hoặc e_{mkl} . Chỉ số đầu tiên đề cập đến thành phần dịch chuyển điện và cặp cuối cùng đề cập đến thành phần biến dạng cơ học. Ở đây ta tổ hợp các cặp chỉ số như sau: (0)11 \rightarrow (0)1, (0)22 \rightarrow (0)2, (0)33 \rightarrow (0)3, (0)23 \rightarrow (0)4, (0)13 \rightarrow (0)5, ()12 \rightarrow ()6. Tuy nhiên, như đã đề cập ở trên, đối với PZT được tạo cực theo hướng 3 chiều hoặc hướng z, chúng ta cần xác định 5 hệ số biến dạng và việc chuyển đổi từ dữ liệu nhà sản xuất sang đầu vào dữ liệu Abaqus trong mô hình phần tử 3D và mô hình phần tử đối xứng trục như sau:

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{33} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{33} & e_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Trong đó, ma trận thuộc tính vật liệu áp điện $[d]$ trong công thức (3.27) và (3.28) được sử dụng tương ứng cho biến dạng phẳng trong mô hình 3D và mô hình đối xứng trục, nhưng ma trận $[e]$ được sử dụng cho ứng suất phẳng trong mô hình đối xứng trục.

Đối với vật liệu áp điện, mô đun đàn hồi c_{ij} và độ tuân thủ đàn hồi s_{ij} có thể được cung cấp dưới sự dịch chuyển điện không đổi c_{ij}^D, s_{ij}^D (ngắn mạch) hoặc điện trường không đổi c_{ij}^E, s_{ij}^E (hở mạch). Abaqus sử dụng mô đun đàn hồi trong điện trường không đổi, và nó được định nghĩa ở dạng tensor, cụ thể là D như sau:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ & \text{symmetric} & & & D_{1313} & 0 \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Trong đó các tham số D_{ijkl} được tính bằng cách nghịch đảo ma trận của các hằng số s_{ij}^E ,

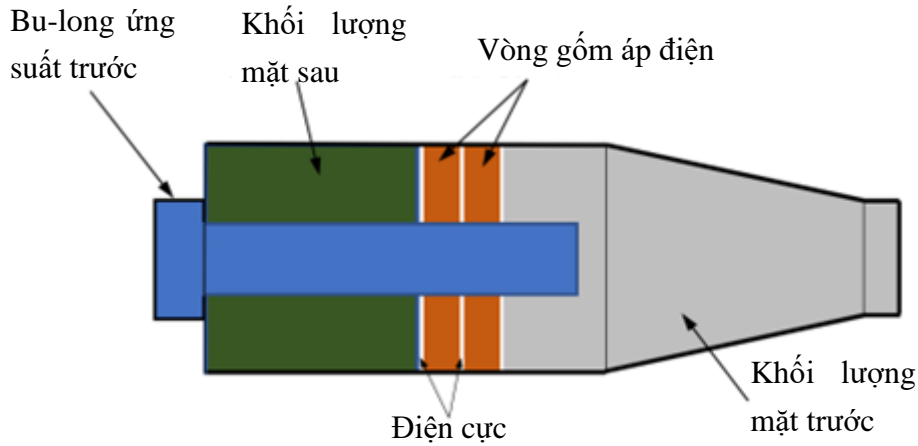
Chia lưới liên quan đến độ phân giải của giải pháp. Đối với các bài toán truyền sóng nói chung hay phân tích phương thức lan truyền và tức thời của đầu rung trong nghiên cứu này nói riêng, độ rời rạc phải phù hợp với bước sóng ngắn nhất của đầu rung. Dựa trên định lý lấy mẫu và tỷ lệ Nyquist, kích thước phần tử phải nhỏ hơn $\frac{1}{2}$ bước sóng. Tuy nhiên, trong mô hình hóa phần tử hữu hạn, việc chia lưới phải đảm bảo mỗi vùng phải được chia bởi một số nguyên phần tử và kết quả chắc chắn có tính hội tụ. Kích thước phần tử hay lưới ban đầu thường được chọn tối thiểu từ $1/10 - 1/20$ bước sóng.

3.3.2. Kết quả và thảo luận

3.3.2.1. Áp dụng cho mô hình thiết bị rung siêu âm đơn giản

Dựa trên lý thuyết tính toán [77] và kết quả của các nghiên cứu đã công bố [78-80], đề tài đã chọn đầu rung siêu âm được thiết kế trong Hình 3.2 làm đối tượng nghiên cứu. Ở chế độ làm việc với tần số 20kHz và biên độ dao động dọc 10 μm , kích thước và các thông số vật liệu được cho trong Bảng 3-2 và Bảng 3-3.

Như đã trình bày ở trên, vật liệu PZT bao gồm rất nhiều thông số có đặc tính cơ và điện. Tuy nhiên dữ liệu của nhà sản xuất đưa ra thường được cung cấp dưới dạng ứng suất không đổi. Vì vậy, các thông số đầu vào cho mô hình số phải được tính toán dựa trên các thông số này thông qua một chương trình MATLAB mà nhóm nghiên cứu đã thực hiện. Bảng 3-4 cho thấy giá trị của các thông số áp điện sau khi tính toán cho vật liệu PZT-8.



Hình 3.2. Các thành phần của đầu rung siêu âm

Bảng 3-2. Kích thước các bộ phận trong đầu rung siêu âm

Thành phần		Thông số			
		Đường kính ngoài (mm)	Kích thước lỗ (mm)	Chiều dài (mm)	Vật liệu
Tấm sau		38	12	36	Thép C45
Vòng Ceramic		38	16	8	PZT8
Bulong lục		12		60	Titanium
Điện cực		38	16	0.5	Đồng
Tấm trước	Đoạn trụ 1	38	12	15	Titanium
	Đoạn côn			45	Titanium
	Đoạn trụ 2	20		10	Titanium

Bảng 3-3. Thông số các loại vật liệu

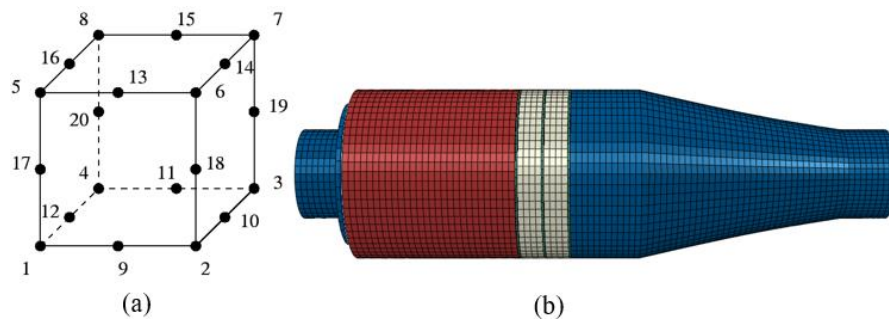
Vật liệu	Parameter			
	Khối lượng riêng (kg.m ⁻³)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Vận tốc truyền âm (m.s ⁻¹)
PZT-8	7600	65	0.31	2950
Đồng	8900	115	0.31	3595
Titanium	4418	110	0.34	4816
Thép C45	7800	209	0.3	5150

Phần tử bậc hai áp điện C3D20RE 20 nút được sử dụng cho vật liệu PZT và phần tử bậc hai C3D20R 20 nút sử dụng cho các phần còn lại của mô hình. Mô hình phần tử hữu hạn của đầu rung siêu âm được chia lưới bởi 53931 phần tử rắn C3D20R và C3D20RE với 64065 nút (Hình 3.3b). Một mô phỏng số (*Abaqus/Frequency*) được

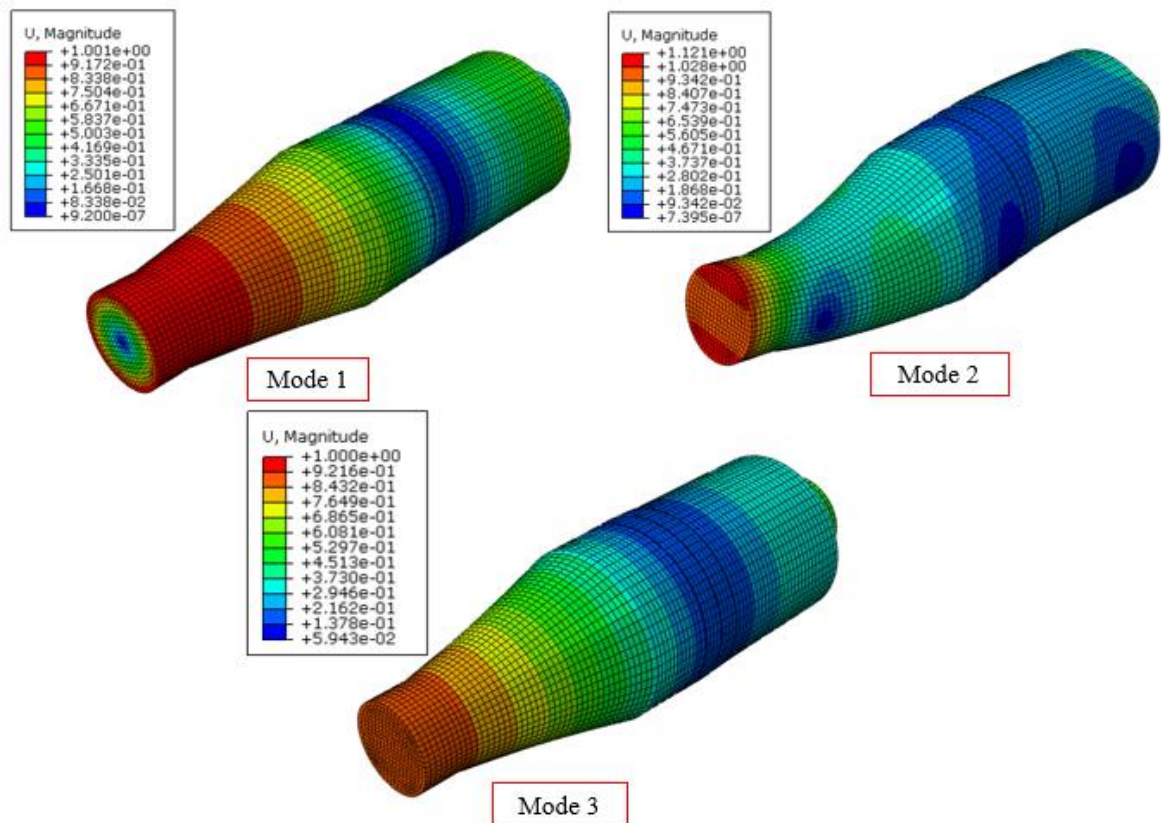
thực hiện để xác định tần số tự nhiên và chế độ rung của đầu rung siêu âm. Kết quả được thể hiện trong Bảng 3-5 và Hình 3.4.

Bảng 3-4. Thông số vật liệu PZT-8

[D] (N/m ²)		[d] (C/N)		[e] (C/N)	
D ₁₁₁₁	9.22E+10	d _{1 11}	0.00E+00	e _{1 11}	0.00E+00
D ₁₁₂₂	-6.75E+09	d _{1 22}	0.00E+00	e _{1 22}	0.00E+00
D ₁₁₃₃	2.58E+10	d _{1 33}	0.00E+00	e _{1 33}	0.00E+00
D ₂₂₃₃	2.58E+10	d _{1 12}	0.00E+00	e _{1 12}	0.00E+00
D ₃₃₃₃	8.59E+10	d _{1 13}	0.00E+00	e _{1 13}	0.00E+00
D ₁₂₁₂	4.65E+10	d _{1 23}	3.65E-10	e _{1 23}	1.67E+01
D ₁₃₁₃	4.65E+10	d _{2 11}	0.00E+00	e _{2 11}	0.00E+00
D ₂₃₂₃	4.65E+10	d _{2 22}	0.00E+00	e _{2 22}	0.00E+00
D ₂₂₂₂	9.34E+10	d _{2 33}	0.00E+00	e _{2 33}	0.00E+00
		d _{2 12}	0.00E+00	e _{2 12}	0.00E+00
		d _{2 13}	3.65E-10	e _{2 13}	1.67E+01
		d _{2 23}	0.00E+00	e _{2 23}	0.00E+00
		d _{3 11}	-9.5E-11	e _{3 11}	-1.97E+00
		d _{3 22}	-9.5E-11	e _{3 22}	-1.97E+00
		d _{3 33}	2.35E-10	e _{3 33}	1.570E+01
		d _{3 12}	0.00E+00	e _{3 12}	0.00E+00
		d _{3 13}	0.00E+00	e _{3 13}	0.00E+00
		d _{3 23}	0.00E+00	e _{3 23}	0.00E+00



Hình 3.3. Mô hình phân tử hữu hạn

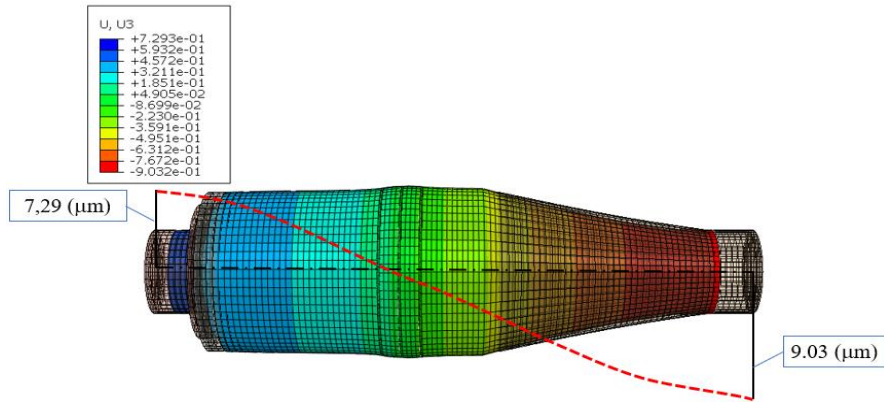


Hình 3.4. Phân tích modal của đầu rung siêu âm

Bảng 3-5. Modal và tần số tự nhiên của đầu rung

Mo dal	Tần số tự nhiên (Hz)	Chế độ rung
1	16862	Rung xoắn
2	18388	Rung uốn
3	20142	Rung dọc trục

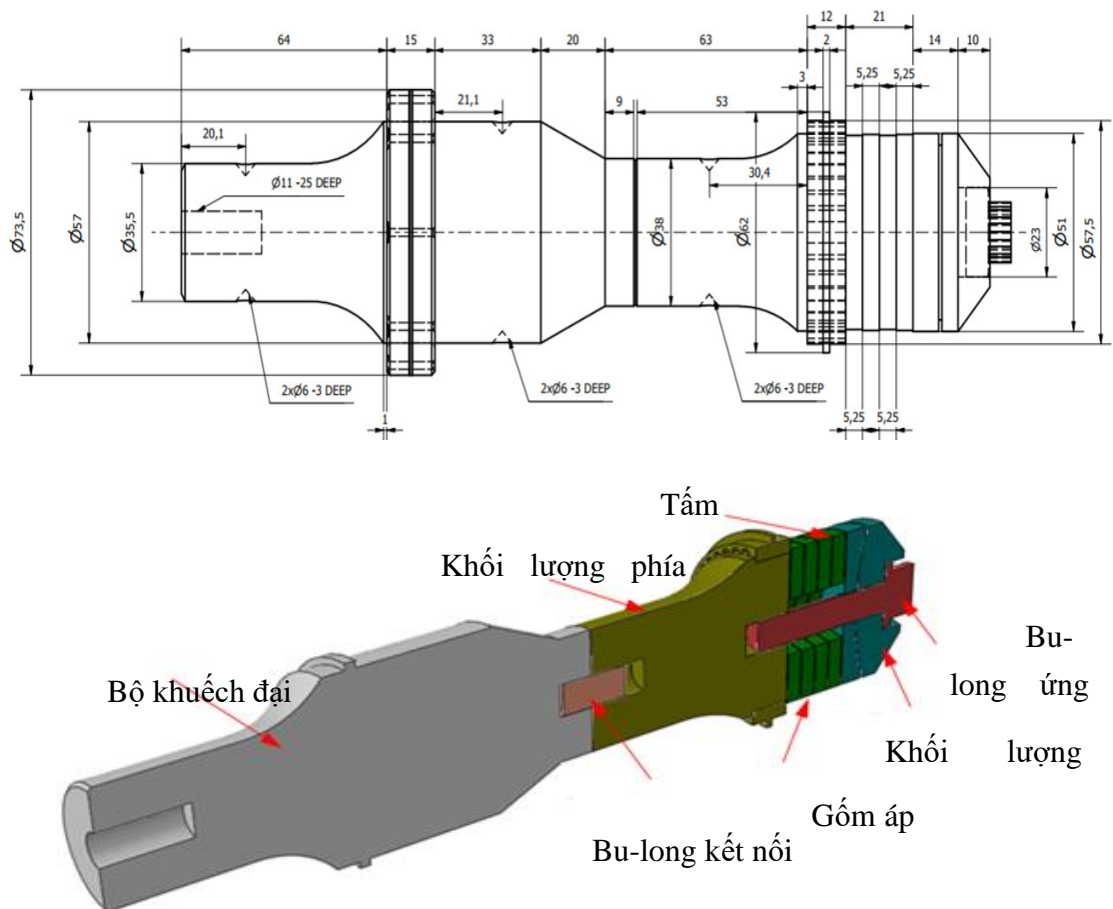
Kết quả thu được cho thấy đầu rung ở chế độ rung xoắn 1 (mode 1), rung uốn 2 (mode 2) và rung dọc 3 (mode 3). Ở chế độ thứ ba, tần số cộng hưởng của đầu rung siêu âm là 20142 Hz. So với giá trị thiết kế lý thuyết là 20000 Hz và sai số của nó là khoảng 0,71%. Điều này chứng tỏ rằng phương pháp tiếp cận mô hình số này đáp ứng rất tốt so với những cách tiếp cận khác. Một cách khác, để đánh giá toàn bộ thiết kế cho đầu rung siêu âm, cần phân tích xem biên độ dịch chuyển dọc của mặt trước của khối phía trước, trong điều kiện cộng hưởng, có thể đáp ứng yêu cầu thiết kế hay không. Để làm được điều này, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích biên độ dao động dọc. Từ Hình 3.5, mặt trước của đầu rung là bề mặt dịch chuyển tối đa và biên độ dao động dọc có thể đạt khoảng 9,03 μm (giá trị thiết kế lý thuyết là 10 μm) khi tần số cộng hưởng là 20142 Hz. Điều này cho thấy biên độ dao động dọc phù hợp với yêu cầu đặt ra.



Hình 3.5. Biên độ dao động của đầu rung siêu âm

3.3.2.2. Áp dụng cho thiết bị rung siêu âm phức tạp

Trong phần này, một hệ thống rung siêu âm phức tạp hơn bao gồm tất cả các thành phần như đầu rung và bộ khuếch đại siêu âm, đã được chọn làm đối tượng nghiên cứu. Một đầu rung siêu âm thương mại Herrmann Ultrasonic-Ultraschall, có tần số cộng hưởng 20 kHz, kết hợp với bộ khuếch đại, đã được sử dụng. Kích thước chi tiết của thiết bị được thể hiện trong Hình 3.6. Các thông số của thiết bị được thể hiện trong Bảng 3-6 và Bảng 3-7.



Hình 3.6. Đầu rung và bộ khuếch đại siêu âm

Bảng 3-6. Các thông số của đầu rung siêu âm

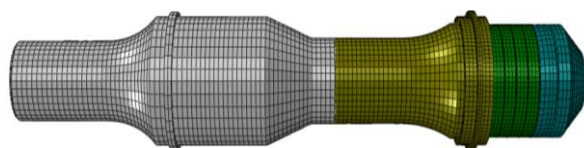
Thành phần	Đơn vị	Giá trị
Tần số	kHz	20
Công suất	W	4000
Đường kính vòng Ceramic	mm	50
Vòng Ceramic	-	4
Biên độ	μm	10

Bảng 3-7. Đặc tính vật liệu của bộ khuếch đại

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Mô đun đàn hồi	GPa	200
Khối lượng riêng	Kg/m ³	7850
Hệ số Poisson	-	0.3
Hệ số khuếch đại	-	2

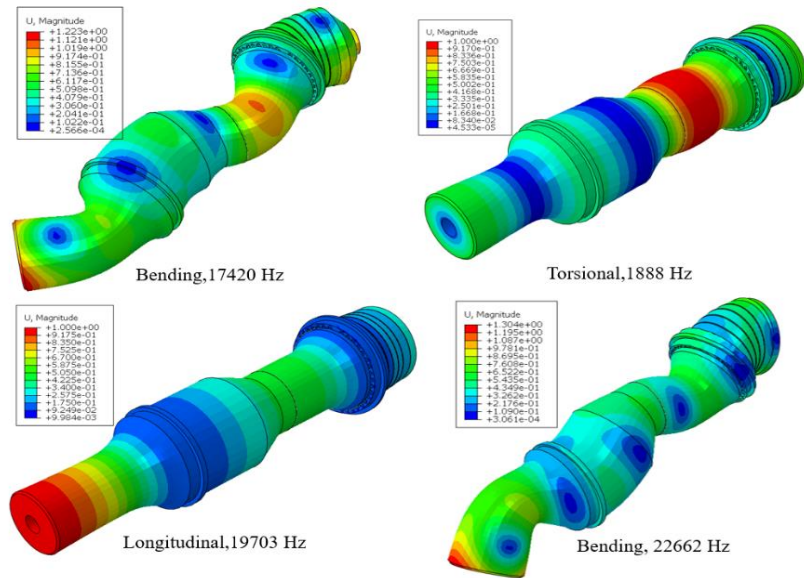
a. Với mô hình 3D

Như đã đề cập ở trên, việc lựa chọn phần tử phù hợp cho mô hình phần tử hữu hạn là rất cần thiết. Phần tử 8 nút C3D8 (C3D8E) và phần tử 20 nút C3D20R (C3D20RE) sẽ được sử dụng trong phần này. Do đó, hai loại phần tử C3D8E và C3D20RE, với đặc tính cơ điện, cho phần tử áp điện sẽ lần lượt được sử dụng. Các phần tử C3D8 và C3D20R cho các phần khác của mô hình. Bên cạnh đó, chúng tôi sẽ tiến hành khảo sát mô hình với các mắt lưới mịn dần và so sánh kết quả (*kích thước mắt lưới dùng khảo sát 1, 2, 3 và 4 mm*). Mô hình 3D phần tử hữu hạn của thiết bị siêu âm thử nghiệm được phát triển để dự đoán chính xác phản hồi của thiết bị như trong Hình 3.7. Mô phỏng được thực hiện trên máy tính có cấu hình: Bộ xử lý Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2689 0 @ 2.60GHz 2,60 GHz, RAM 32,0 GB.

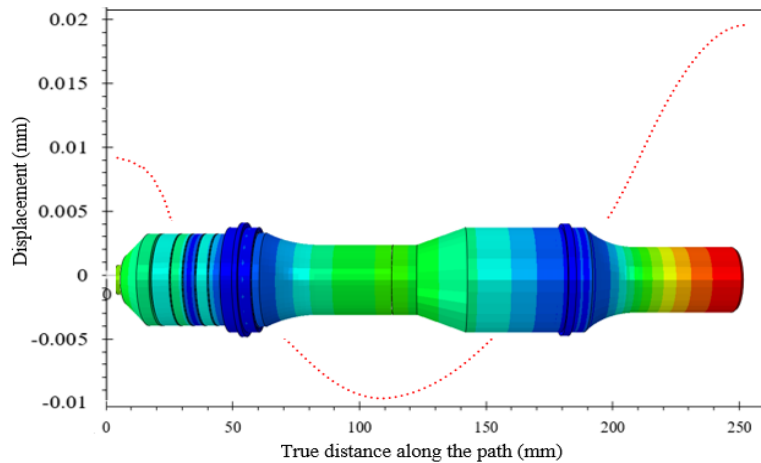


Hình 3.7. Mô hình 3D phần tử hữu hạn của thiết bị rung siêu âm

Đối với mô hình bao gồm phần tử C3D8 và C3D8E, một mô phỏng số được thực hiện để xác định tần số tự nhiên và chế độ rung. Kết quả thu được cho thấy đầu rung có chế độ rung uốn ở 17420 Hz và 22662 Hz, rung xoắn ở 1888 Hz và rung dọc ở 19703 Hz (Hình 3.8). Phân tích sóng hài số cũng được sử dụng để đánh giá biên độ dao động và tần số cộng hưởng khi vận hành thiết bị. Kết quả phân tích sóng hài như trong Hình 3.9. Theo đó, biên độ dao động ở cuối bộ khuếch đại là 19,1 μm , tương ứng với tần số cộng hưởng là 19703 kHz.

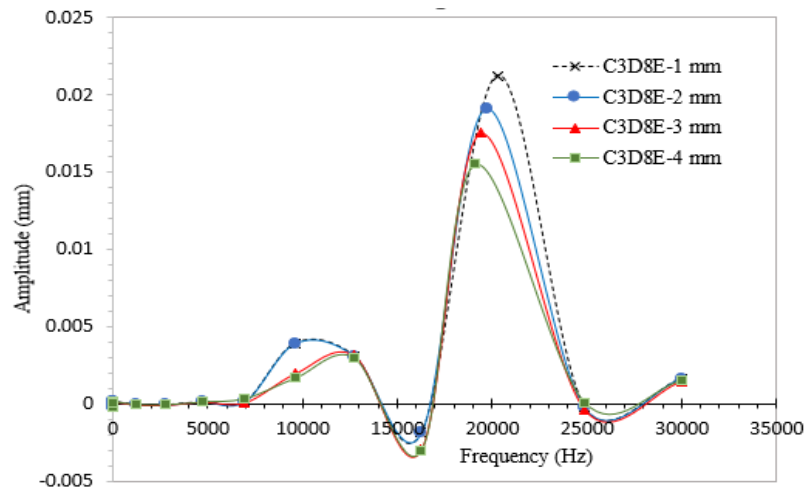


Hình 3.8. Chế độ và tần số tự nhiên của thiết bị rung siêu âm (kích thước lưới 2mm)



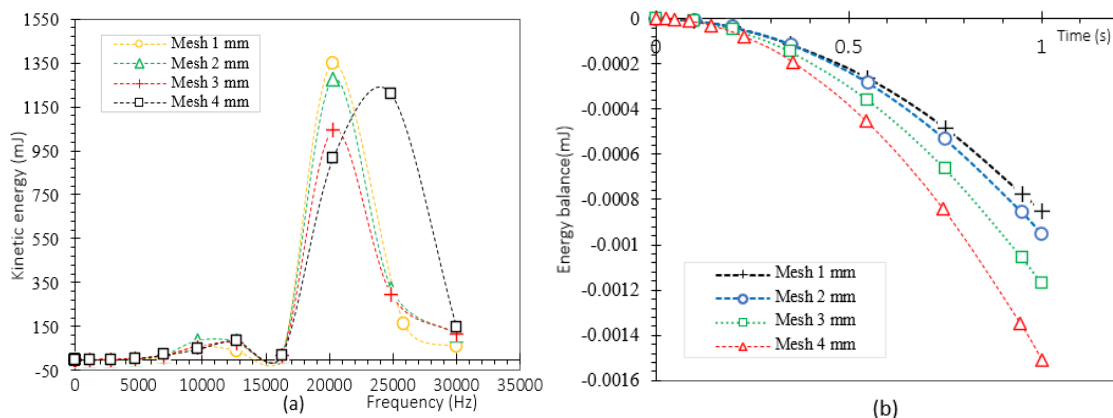
Hình 3.9. Biên độ dao động của đầu rung siêu âm (kích thước lưới 2mm)

Việc chia lưới và sử dụng loại phần tử phù hợp có ảnh hưởng lớn đến kết quả cũng như thời gian của CPU trong mô phỏng số. Một lưới nhỏ sẽ dẫn đến một giải pháp chính xác hơn. Tuy nhiên, khi lưới được làm nhỏ hơn, thời gian tính toán tăng lên và yêu cầu cấu hình máy tính lớn. Nghiên cứu này sẽ đánh giá, so sánh và xác định lưới kích thước đảm bảo độ chính xác và yêu cầu thời gian tính toán hợp lý. Vì vậy, để nghiên cứu đánh giá tần số cộng hưởng, biên độ dao động siêu âm cũng như thời gian tính toán, nghiên cứu thực hiện mô phỏng số với 4 lần tinh chỉnh lưới (kích thước mắt lưới 1, 2, 3 và 4mm). Ảnh hưởng của việc sàng lọc lưới đối với tần số và biên độ cộng hưởng được thể hiện trong Hình 3.10. Các đáp ứng tần số cộng hưởng nhận được có xu hướng giống nhau đối với bốn mắt lưới, nhưng biên độ thì khác nhau đối với các kích thước mắt lưới.



Hình 3.10. Ảnh hưởng của kích thước lưới đối với tần số và biên độ cộng hưởng

Sau khi tiến hành một loạt các mô phỏng với bốn kích thước mắt lưới khác nhau, biểu đồ năng lượng mô hình khác nhau cho bốn mắt lưới (Hình 3.11); biểu đồ động năng thay đổi theo tần số (Hình 3.11a); biểu đồ cân bằng năng lượng cho bốn mắt lưới theo thời gian (Hình 3.11b) đã được thể hiện. Dễ dàng nhận thấy rằng trong mô hình số, giá trị năng lượng xấp xỉ hằng số, với sai số nhỏ hơn 1%. Sau khi phân tích độ nhạy, đề tài đã chọn kích thước mắt lưới là 2 mm cho các tính toán liên quan trong khi vẫn giữ chi phí tính toán hợp lý.



Hình 3.11. Ảnh hưởng của kích thước lưới đến các năng lượng khác nhau của mô hình: (a) Động năng, (b) Cân bằng năng lượng

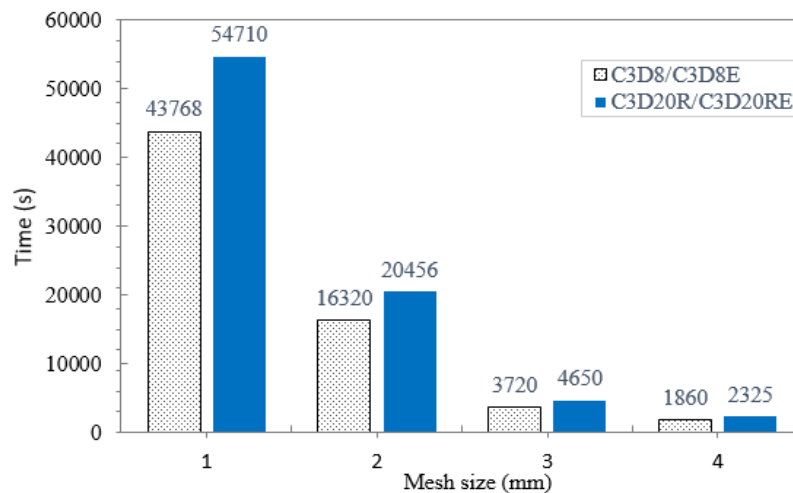
Đối với phần tử C3D20R (C3D20RE), một loạt các mô phỏng số được thực hiện tương tự như đối với phần tử C3D8 (C3D8E). So sánh kết quả giữa hai phần tử này được thể hiện trong Bảng 3-8 và Hình 3.12. Kết quả nhận được cho thấy sự thay đổi của tần số cộng hưởng, biên độ dao động cũng như thời gian tính toán, tương ứng với các kích thước mắt lưới khác nhau, đối với hai loại phần tử. Đồng thời, cũng có thể dễ dàng nhận ra thời gian tính toán khi sử dụng phần tử C3D20R (C3D20RE) lớn hơn nhiều so với khi sử dụng phần tử C3D8 (C3D8E). Sự khác biệt về thời gian tính toán là do lưới phần tử được sử dụng cho vật liệu áp điện. Cụ thể, có sự khác biệt về điện

thể tại điểm truyền động và điểm giám sát cảm biến giữa các phần tử C3D8E của lưới phần tử tuyến tính và các phần tử C3D20RE của lưới tích hợp giảm bậc hai.

Bảng 3-8. Ảnh hưởng của lưới kích thước và kiểu phần tử

Loại phần tử	Kích thước lưới (mm)	Số phần tử trong mô hình	Tần số cộng hưởng (Hz)	Biên độ (mm)	Thời gian tính toán (s)
C3D8 (C3D8E)	1	398238	20303	0.022	43768
	2	126694	19703	0.0191	16320
	3	50658	19406	0.0175	3720
	4	25320	19121	0.0155	1860
C3D20R (C3D20RE)	1	398238	20613	0.0214	54710
	2	126694	19871	0.0195	20456
	3	50658	19566	0.0185	4650
	4	25320	19281	0.0159	2325

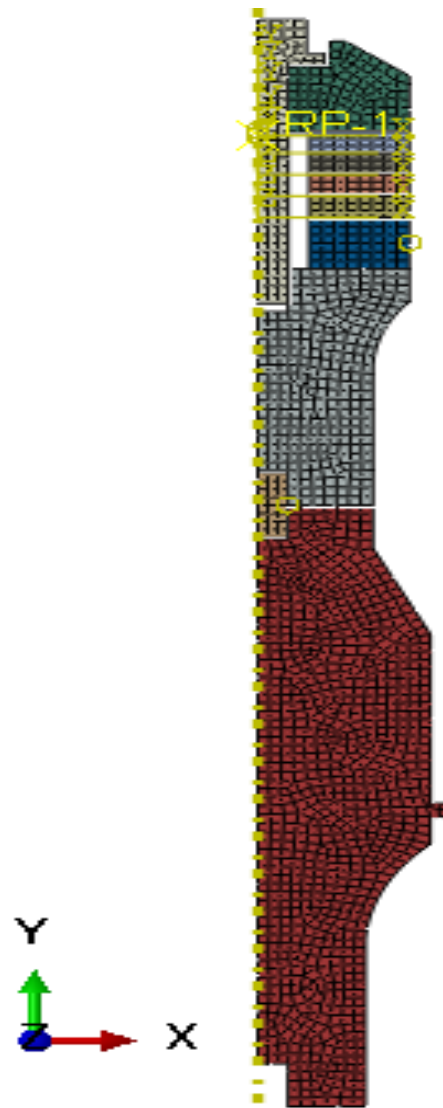
Như vậy, có thể thấy từ Bảng 3-8 và Hình 3.12, khuyến nghị chọn loại phần tử cho mô hình phần tử hữu hạn yêu cầu chọn các phần tử có thuộc tính tương tự như C3D8 và C3D8E hoặc C3D20R và C3D20RE. Sử dụng mắt lưới kích thước 2 mm, thời gian tính toán cho phần tử C3D20R (C3D20RE) gấp 1,25 lần so với phần tử C3D8 (C3D8E).



Hình 3.12. So sánh thời gian tính toán giữa hai loại phần tử

b. Đối với mô hình 2D

Mô hình 2D phần tử hữu hạn mà sử dụng mô hình đối xứng trục, sử dụng các phần tử đối xứng trục khác nhau, được thể hiện (Hình 3.13).

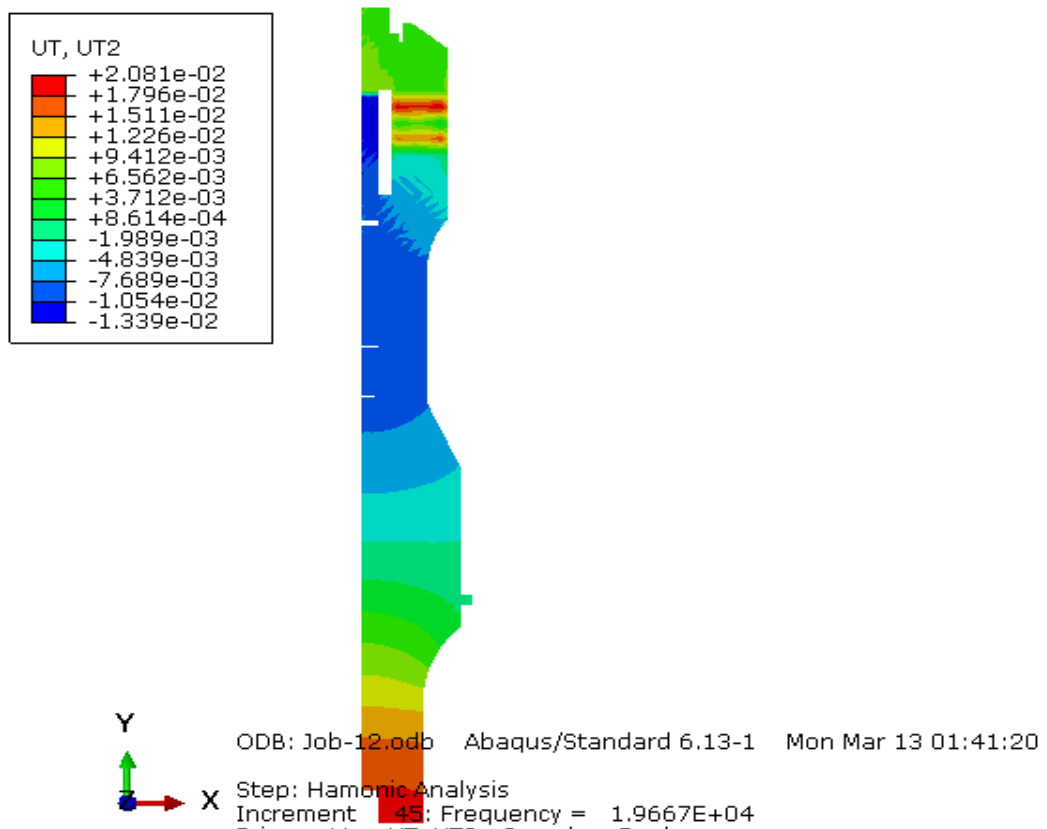


Hình 3.13. Mô hình 2D phần tử hữu hạn

Một loạt các mô phỏng số được thực hiện với các loại phần tử đối xứng trục tương ứng, và kích thước lưới 2mm cho mô hình 2D. Kết quả nhận được như trong Bảng 3.9 và Hình 3.14.

Bảng 3-9. So sánh kết quả của các loại phần tử đối xứng trục

Bậc của phần tử	Loại phần tử	Tần số cộng hưởng mô phỏng (Hz)	Tần số cộng hưởng thiết kế (Hz)	Biên độ rung mô phỏng (mm)	Biên độ rung thiết kế (mm)	Thời gian tính toán (s)
Bậc 1	CAX4R	20151	20000	0.0207	0.02	63
	CAX3	20200	20000	0.022	0.02	58
Bậc 2	CAX8R	19667	20000	0.0218	0.02	85
	CAX6M	20203	20000	0.0027	0.02	78



Hình 3.14. Kết quả mô phỏng với phần tử bậc nhất CAX4R (CAX4RE)

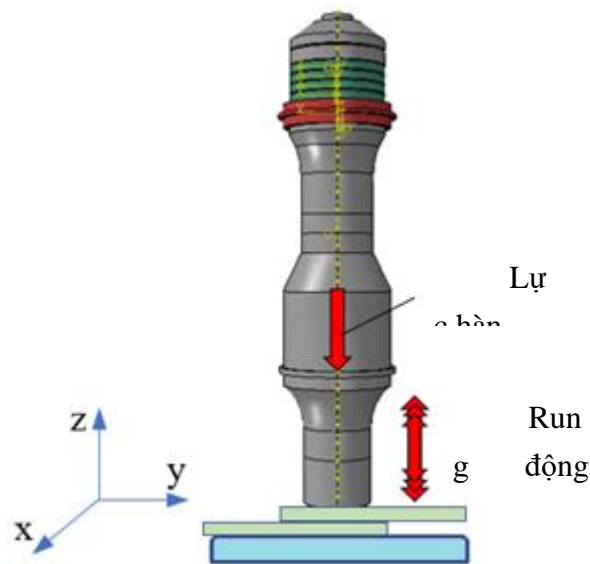
Từ Bảng 3-9 ta thấy các loại phần tử khảo sát đều cho sai số về tần số cộng hưởng và biên độ rung so với giá trị thiết kế đều nằm trong khoảng cho phép (dưới 10%). Mô hình 2D sử dụng trong trường hợp mô hình mô phỏng chỉ cần khai thác các yếu tố cơ bản nhất như biên độ rung dọc.

So sánh mô hình 3D với mô hình 2D, dễ dàng nhận thấy có ưu điểm lớn nhất của mô hình 2D là thời gian tính toán rất nhanh. Tuy nhiên để xem xét toàn diện các chế độ rung cũng như xem xét được toàn bộ ảnh hưởng của các nhân tố khác đến kết quả khảo sát thì nên sử dụng mô hình 3D.

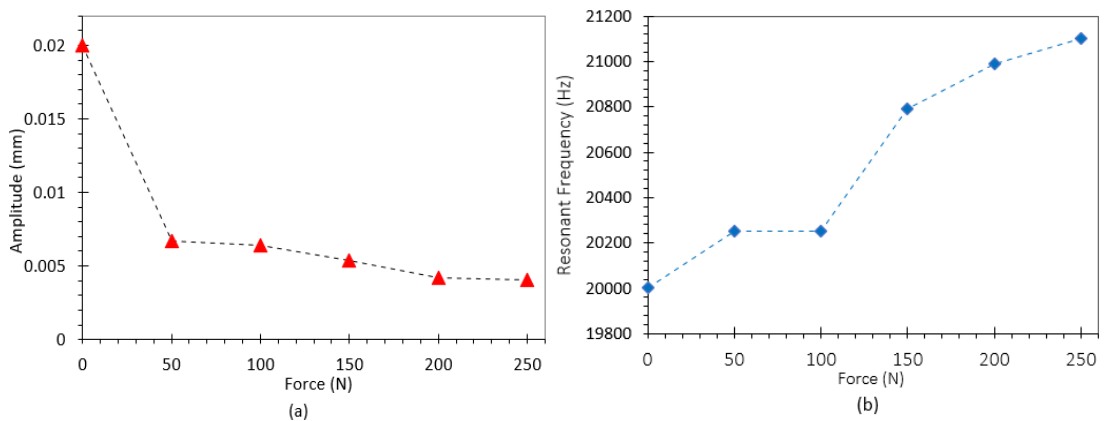
c. Mở rộng mô hình phần tử hữu hạn 3D cho bài toán khảo sát ảnh hưởng lực hàn

Trên cơ sở so sánh kết quả mô phỏng, đề tài tiếp tục nghiên cứu sự thay đổi biên độ và tần số cộng hưởng của thiết bị này khi có lực tác dụng bằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn. Mục đích của phân tích này là tìm ra quy luật biến đổi của tần số cộng hưởng và biên độ của thiết bị rung siêu âm sau khi đặt tải (Hình 3.15). Lực hàn thực tế được chia thành các giá trị khác nhau để mô phỏng sự thay đổi về tần số và biên độ cộng hưởng. Sau khi hệ thống được tải trong quá trình xử lý thực tế, tác động của các tải lực khác nhau đã được phân tích chính xác. Theo lực hàn thực tế trong quá trình làm việc, áp suất dọc trục 0–250 N được áp dụng dần cho thiết bị và thứ tự giải pháp được đặt thành 5 bước. Những thay đổi về biên độ và tần số cộng hưởng của hệ

thông được thể hiện trong Hình 3.16. Hình 3.16a cho thấy sự giảm biên độ dao động khi có lực tác dụng. Khi lực tăng, biên độ giảm. Lúc này, hiệu suất chuyển hóa điện năng thành cơ năng giảm sút, ảnh hưởng nghiêm trọng đến công suất và độ ổn định của hệ thống. Vì vậy, cần phải tính toán để bù đắp phần năng lượng mất mát này. Trong Hình 3.16b, kết quả mô phỏng cho thấy tần số cộng hưởng của thiết bị thay đổi theo hướng tăng, nhưng phạm vi thay đổi nhỏ. Do thiết bị làm việc ở pha đàn hồi nên tần số cộng hưởng thay đổi không đáng kể.



Hình 3.15. Lực tác động lên thiết bị và mẫu trong quá trình hàn



Hình 3.16. Ảnh hưởng của lực đến biên độ cộng hưởng (a) và tần số (b)

3.4. Kết luận

Mô hình phần tử hữu hạn xây dựng trong Chương 3 đã giải quyết một số vấn đề còn tồn đọng liên quan đến thiết bị rung siêu âm. Bằng cách tiếp cận mới, đề tài đã xây dựng thành công mô hình phần tử hữu hạn của thiết bị rung siêu âm với đầy đủ các tính chất của mô hình thực. Ngoài các phần tử cơ bản để tạo mô hình 3D (C3D8, C3D20R), chúng tôi đã sử dụng các phần tử áp điện C3D8E và C3D20RE cho vật liệu

PZT. Quá trình tính toán các thông số cho vật liệu áp điện cũng như việc lựa chọn kích thước lưới để tăng độ hội tụ và giảm thời gian tính toán cũng được đề cập trong phần này. Bên cạnh đó một mô hình phân tử hữu hạn 2D cũng được xây dựng nhằm so sánh đánh giá các ảnh hưởng của thông số đầu vào cho mô hình mô phỏng số. Cuối cùng, dựa trên kết quả thu được, đề tài tiếp tục nghiên cứu ảnh hưởng của lực hàn đến hiệu suất của thiết bị rung siêu âm bằng FEM dựa trên mô hình 3D đã được kiểm chứng.

Ở các kết quả đã trình bày trong 2 chương trên, các kết quả tính toán số của mô hình giải tích và mô hình phân tử hữu hạn trên các đối tượng khác nhau đều có sự so sánh, đánh giá với kết quả thí nghiệm. Các dữ liệu thí nghiệm này đều thu được từ các mô hình hệ thống thí nghiệm được xây dựng trong khuôn khổ đề tài này và sẽ được trình bày riêng trong chương tiếp theo.

Chương 4. THIẾT KẾ HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM

4.1. Các đại lượng cần đo và phương pháp xác định

4.1.1. Tần số cộng hưởng và trở kháng

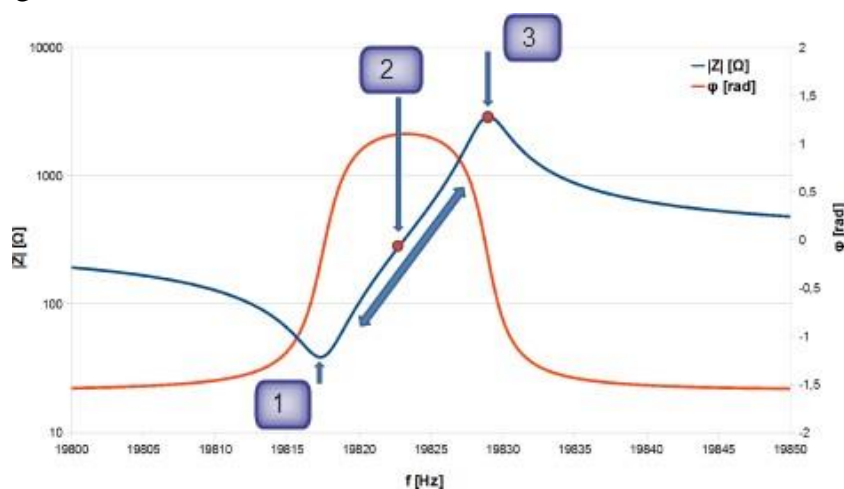
Tần số cộng hưởng là thông số quan trọng khi điều khiển và vận hành đầu rung ở chế độ làm việc. Tần số cộng hưởng thường được đánh giá thông qua giá trị tổng trở kháng (Z) của đầu rung. Bản chất của một cơ cấu rung siêu âm là một hệ điện - cơ, được mô hình hóa tương đương một mạch điện gồm có cả điện trở R , tụ điện C và điện cảm L . Tình trạng cộng hưởng xảy ra khi tổng trở kháng của mạch là nhỏ nhất. Trở kháng là đại lượng vật lý đặc trưng cho sự cản trở dòng điện của một mạch điện khi có hiệu điện thế đặt vào, là khái niệm mở rộng của điện trở cho dòng điện xoay chiều, chứa thêm thông tin về độ lệch pha và được biểu diễn dưới dạng số phức:

$$Z = R + iX \quad (4.1)$$

trong đó R là điện trở (Resistance), X là điện kháng (Reactance).

Ngoài giá trị tổng trở kháng Z , hai giá trị tần số cộng hưởng (f_r) và phản cộng hưởng (f_a) là giá trị cần quan tâm. Đầu rung siêu âm muốn hoạt động hiệu quả cần được cấp tín hiệu điện với tần số tương ứng với giá trị tần số cộng hưởng. Hình 4.1, mô tả vùng tần số phản cộng hưởng rung động siêu âm ứng dụng cho thiết bị gia công cơ. Tại vùng (1) xảy ra tần số cộng hưởng f_r công suất đầu rung sẽ đạt cực đại. Vùng lân cận điểm (3) là khu vực mà tổng kháng của đầu rung đạt giá trị lớn nhất. Tại đây sẽ xảy ra tần số phản cộng hưởng f_a , được cho là phù hợp để gia công cơ. Vùng (2) là vùng tần số vận hành của đầu rung.

Nguyên tắc xác định tần số cộng hưởng là đo tổng kháng của thiết bị. Có nhiều phương pháp để xác định giá trị tổng kháng. Mỗi phương pháp đo có ưu và nhược điểm riêng, cần xem xét để phù hợp với điều kiện thiết bị và yêu cầu về độ chính xác, khoảng đo, ngưỡng tần số...

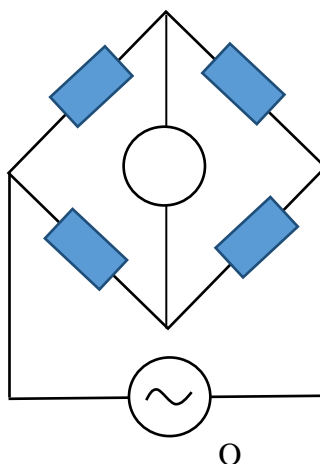


Hình 4.1. Vùng tần số làm việc của đầu rung

Để xác định giá trị tổng trở kháng Z của cơ cấu rung siêu âm có thể sử dụng các phương pháp phổ biến sau:

➤ **Phương pháp mạch cầu (Bridge methods)**

Phương pháp này sử dụng một mạch cầu với các điện trở đã biết Z_1, Z_2, Z_3 kết nối với một thiết bị dò tín hiệu dòng (điện kế D) và một máy phát tín hiệu dao động điện ($OSC_Oscillator$) hoặc một nguồn điện (pin) minh họa như Hình 4.2. Mạch ở trạng thái cân bằng không có dòng điện chạy qua điện kế D và điện thế hai đầu $U_1 = U_2, U = U_3$.



Hình 4.2. Sơ đồ mạch vòng đo tổng trở

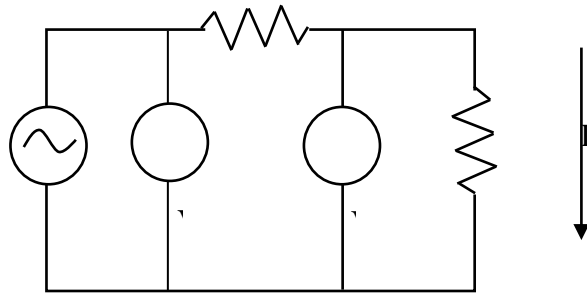
Khi này dòng điện chạy qua điện trở Z_1 bằng với dòng chạy qua thiết bị cần đo điện trở Z . Dòng điện chạy qua các điện trở Z_2, Z_3 cũng như nhau. Điện trở của cụm đầu rung siêu âm cần đo tổng trở kháng Z ($DUT - Device Under Test$) sẽ được xác định dựa vào quan hệ:

$$Z = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3 \quad (4.2)$$

Phương pháp này cho độ chính xác cao, dải tần đo được lớn (tới $300MHz$) và chi phí thấp. Điểm hạn chế của phương pháp là cần cân bằng mạch bằng phương pháp thủ công.

➤ **Sử dụng mạch đo độ lệch pha giữa điện áp với dòng điện (I-V Methods)**

Mạch đo được xây dựng bằng cách mắc nối tiếp một điện trở R_{ref} với thiết bị cần khảo sát DUT ($Divice Under Test$). Giá trị tổng trở kháng Z được xác định bằng cách đo các trị số điện áp và dòng điện trong mạch. Các vôn kế V_{A1} và V_{A2} được mắc như Hình 4.3 để xác định điện áp giữa hai đầu điện trở và thiết bị DUT .



Hình 4.3. Phương pháp I – V

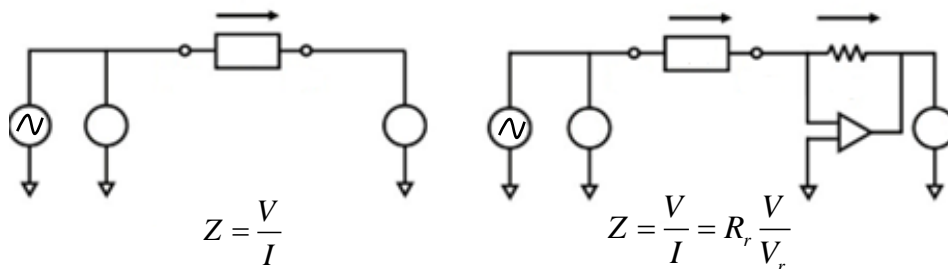
Tổng trở kháng của thiết bị cần đo được xác định theo công thức:

$$Z = \frac{V_{A2} R_{ref}}{\sqrt{V_{A1}^2 - 2V_{A1}V_{A2}\cos\theta + V_{A2}^2}} \quad (4.3)$$

Trong đó, θ là góc lệch pha của V_{A2} so với V_{A1} . Sử dụng một máy hiện sóng, có thể dễ dàng xác định các giá trị điện áp và góc lệch pha. Phương pháp này đơn giản, chi phí đầu tư thấp, dễ thực hiện trong điều kiện thiết bị hiện có. Phương pháp này phù hợp với khoảng tần số từ 10 kHz - 100 MHz.

➤ **Phương pháp cầu tự cân bằng (Auto-balancing bridge method)**

Phương pháp cầu tự cân bằng thường được sử dụng phổ biến để xác định tổng điện trở của thiết bị, với khoảng tần số vận hành khá lớn tới 120 MHz. Sơ đồ mạch đo thể hiện như Hình 4.4. Để xác định được tổng trở kháng của thiết bị, cần đo được điện áp tại 2 đầu DUT và dòng điện chạy qua nó; sử dụng một nguồn phát, vôn kế và ampe kế. Với tần số khảo sát dưới 100kHz chỉ cần sử dụng dạng mạch đo kiểu đơn giản. Khi cấp nguồn cho mạch, các giá trị dòng điện I , I_r ; điện áp V , V_r được xác định nhờ các ampe kế và vôn kế. Từ đó xác định được tổng trở kháng của DUT theo quan hệ tương ứng.

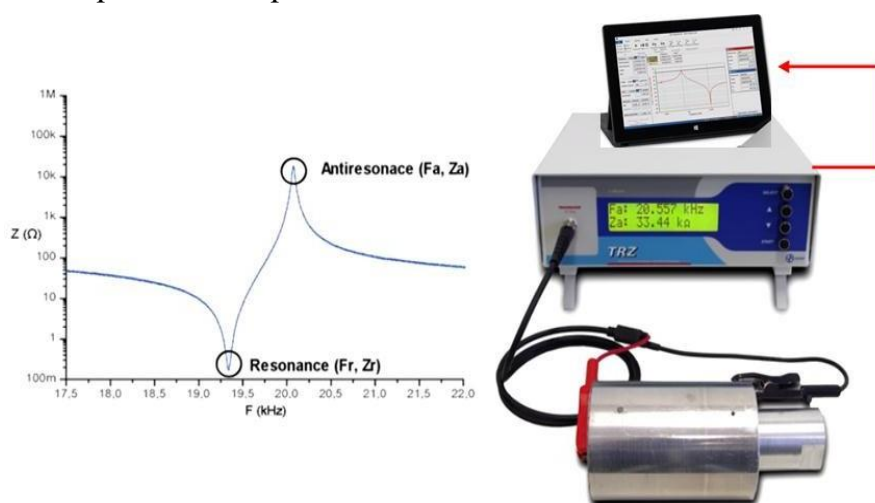


Hình 4.4. Sơ đồ mạch cầu tự cân bằng đo tổng trở

➤ **Sử dụng thiết bị phân tích trở kháng thương mại**

Thí nghiệm sử dụng thiết bị phân tích trở kháng (Impedance Analyzer) như trên Hình 4.5, là một thiết bị đo LCR cho phép đo trở kháng với độ chính xác rất cao có thể lên đến 0.01%, tần số đo có thể từ μ Hz đến GHz, giá trị trở kháng có thể nằm trong dải rất rộng từ $\mu\Omega$ đến T Ω . Thiết bị dùng cho việc quét kiểm tra, điều chỉnh và phát

triển các đầu rung siêu âm, đầu khuếch đại tín hiệu rung, và các thiết bị tương tự. Đây là sản phẩm thương mại, giá thành cao, phần mềm đi kèm thiết bị có khả năng kết nối giao diện với máy tính, cho phép quan sát và điều chỉnh so sánh đối chiếu trực quan, thuận tiện cho việc quan sát kết quả.



Hình 4.5. Thiết bị phân tích tổng trở và tần số cộng hưởng TRZ

4.1.2. Biên độ rung động

Đối với các ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp gia công, dải biên độ rung thường nằm trong khoảng từ 10 - 30 μm , tần số trong khoảng 16 kHz - 80 kHz. Bên cạnh tần số cộng hưởng, biên độ là một thông số quan trọng cần xác định để đánh giá đầu rung. Chẳng hạn, biên độ rung động khi hàn siêu âm các ống nhựa để đạt hiệu quả cao ở tần số 44 kHz chỉ khoảng 12 μm , nhưng nếu hàn các vật liệu kim loại dẻo ở tần số từ 16 - 18 kHz thì cần biên độ rung đầu hàn khoảng 100 μm . Nếu biên độ quá nhỏ, hiệu ứng tích cực của rung động sẽ giảm. Nếu giá trị biên độ vượt quá giá trị tới hạn, đầu phát rung, dụng cụ và chi tiết gia công có thể bị phá hủy. Chính vì vậy, việc xác định biên độ rung động siêu âm là rất quan trọng, đặc biệt là rung động tại đầu dụng cụ cắt. Cho đến nay, để xác định biên độ rung có nhiều phương pháp khác nhau. Tuy nhiên, các phương pháp truyền thống dùng để đo biên độ rung động có tần số thấp (từ vài chục tới vài trăm Hz) khó áp dụng cho việc xác định biên độ rung động ở tần số siêu âm. Do tần số siêu âm là rất lớn, các dụng cụ hiển thị thông thường hay quan sát trực tiếp sẽ không phát hiện ra rung động. Để ghi lại tín hiệu rung, cần sử dụng các thiết bị đo có tần số đáp ứng rất nhanh, đắt tiền. Biên độ rung động rất nhỏ cũng gây khó khăn cho việc nhận biết rung động.

Để xác định biên độ, người ta thường sử dụng hai phương pháp sau:

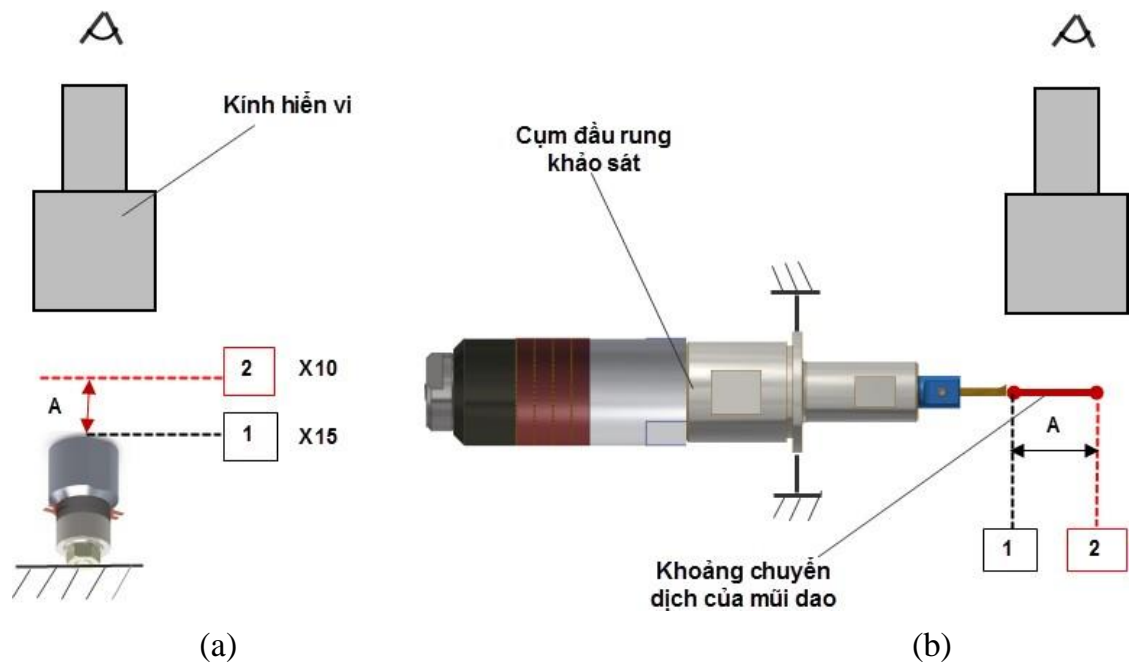
a. Phương pháp đo không tiếp xúc

➤ Phương pháp đo trực tiếp biên độ bằng kính hiển vi

Sử dụng một kính hiển vi dùng cho ngành luyện kim, với dải quan sát cỡ micromet. Với bộ chuyển đổi siêu âm, biên độ rung xác định bằng cách quan sát điểm

cuối tự do của đầu bộ chuyển đổi (được đánh dấu bằng sơn) dưới một kính hiển vi khi chưa rung và có rung, minh họa như Hình 4.6(a). Ban đầu, khi chưa cấp rung, điểm được đánh dấu trên đầu bộ phát rung được quan sát bằng mắt với mức điều chỉnh kính X15. Khi cho đầu rung hoạt động, điểm được quan sát chỉ cần mức điều chỉnh kính X10. Khoảng giữa 1-2 thể hiện biên độ rung đo được chính bằng $5 \mu\text{m}$. Hầu hết các đầu phát rung có biên độ từ $5 - 10 \mu\text{m}$. Giá trị này được tăng lên khi đi qua đầu khuếch đại (tới vài chục micromet).

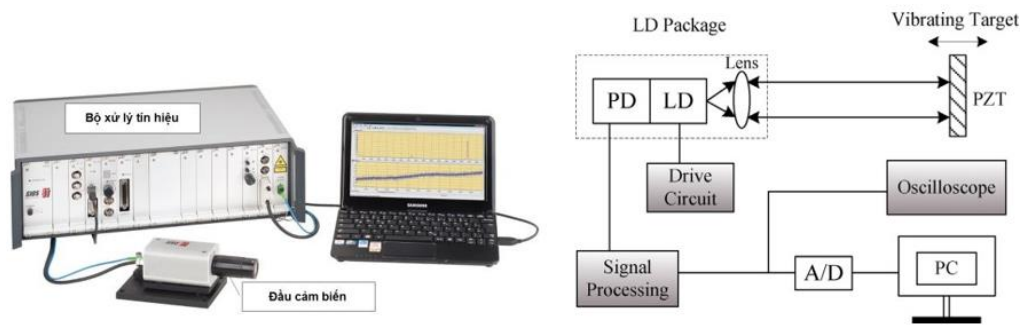
Với bộ đầu rung khi lắp các bộ khuếch đại cùng dụng cụ, kích thước dọc trục thường lớn. Hình 4.6(b) minh họa phương án đo biên độ rung tại mũi dụng cụ. Ban đầu, mũi dao tiện được đánh dấu bằng sơn. Khi cấp nguồn kích thích rung, đầu mũi dao sẽ chuyển dịch theo phương dọc trục một khoảng bằng biên độ rung, bằng chính chiều dài ảnh vệt sơn được tạo ra.



Hình 4.6. Sơ đồ nguyên lý đo biên độ bằng kính hiển vi

➤ Sử dụng Laser Vibrometer

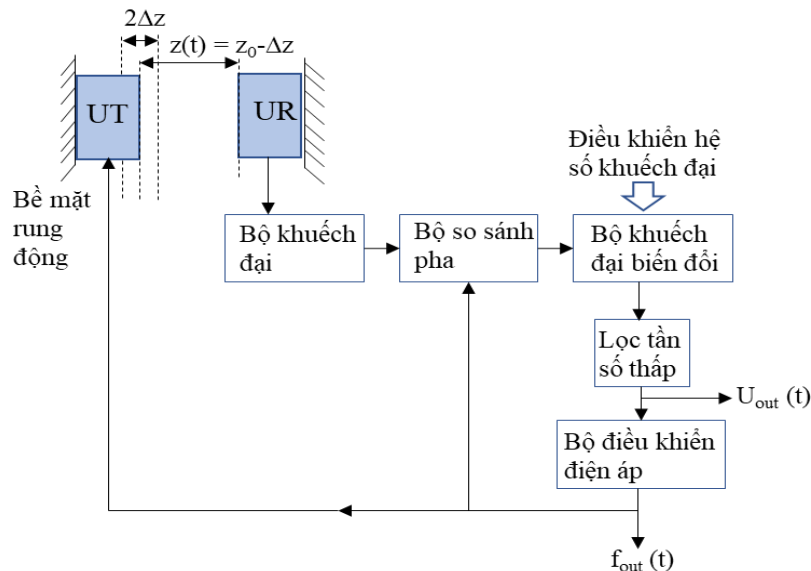
Laser Vibrometer là một thiết bị chuyên dụng để đo chuyển vị hoặc vận tốc của bề mặt vật thể. Hình 4.7 thể hiện hệ thống đo Laser vibrometer. Một nguồn phát qua đi-ốt laser (LD) sinh một chùm tia laser chiếu đến một thấu kính hội tụ hướng đến bề mặt vật thể cần đo. Tín hiệu phản hồi được bộ dò tách sóng quang (Photodetector – PD) thu và mã hóa thành tín hiệu điện tương tự. Tín hiệu này được hiển thị trên một máy hiện sóng hoặc kết nối với giao diện máy tính qua phần mềm. Khi bề mặt đối tượng đo dao động có sự chênh lệch bước sóng giữa tín hiệu laser đi và về, thuật toán tương tự sẽ cho ra kết quả đo là biên độ rung động.



Hình 4.7. Hệ thống đo Laser vibrometer

➤ *Sử dụng cảm biến khoảng cách*

Phương pháp đo tiếp xúc là phương pháp xác định thông số đo có sự tiếp xúc cơ học của thiết bị đo với bề mặt vật thể cần đo. R.Kazys đưa ra một thiết bị đo rung động với tần số siêu âm, sơ đồ nguyên lý minh họa như Hình 4.8. Nguyên tắc vận hành của loại cảm biến này dựa vào hiện tượng giao thoa của các sóng siêu âm điều hòa giữa một bề mặt rung động và một cảm biến siêu âm. Thiết bị chứa một bộ truyền và một bộ nhận tín hiệu siêu âm. Bộ truyền tín hiệu được gắn trên bề mặt rung cần đo. Rung động được truyền qua không khí đến thiết bị nhận tín hiệu (*gắn cố định với giá*). Tín hiệu nhận được qua bộ khuếch đại sau đó đến bộ so sánh pha (*phase*) dao động. Trong suốt quá trình đo, khoảng cách z giữa bề mặt đo và dụng cụ sẽ thay đổi theo tần số rung. Biên độ rung xác định được bằng cách so sánh độ lệch pha giữa tín hiệu phát và tín hiệu nhận. Qua việc calib điện áp ra so với khoảng cách dao động, có thể tìm được biên độ dao động.



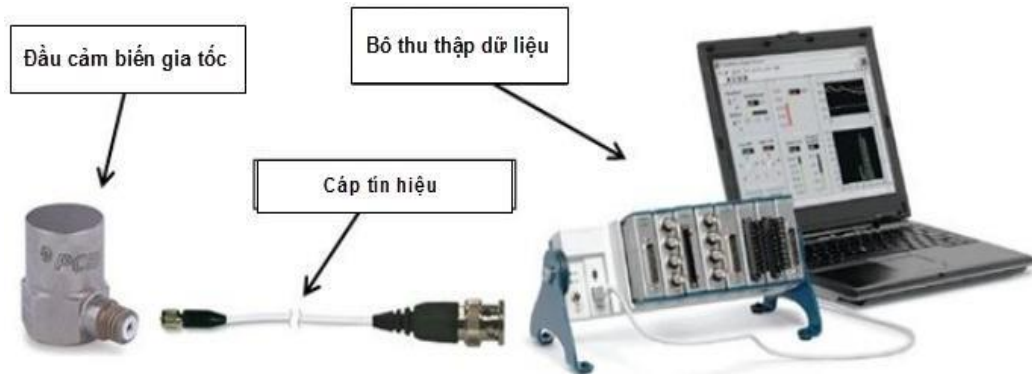
Hình 4.8. Sơ đồ cảm biến đo biên độ rung siêu âm

b. Phương pháp đo tiếp xúc

➤ *Sử dụng gia tốc kế (accelerometer)*

Gia tốc kế được sử dụng để xác định tốc độ dịch chuyển hoặc rung động của bề mặt vật thể. Bộ thiết bị gia tốc kế minh họa như Hình 4.9. Đầu cảm biến gia tốc sẽ

được gắn lên vị trí bề mặt cần khảo sát rung động. Thiết bị thu thập dữ liệu nhận tín hiệu có thể kết nối và hiển thị trên giao diện máy tính. Thông số gia tốc sau đó có thể xử lý thành giá trị vận tốc và chuyển vị của dịch chuyển theo thời gian.

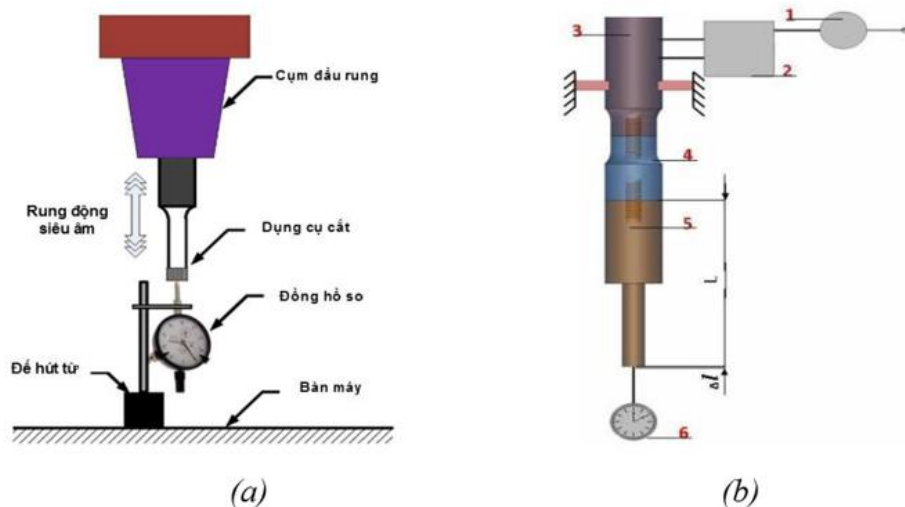


Hình 4.9. Hệ thống đo gia tốc kế

Gia tốc kế thương mại thường có khoảng đo cho phép đến 10 kHz. Những model có khoảng tần số đo đến vài chục kHz thường rất hiếm và đắt tiền. Thêm nữa, việc gắn gia tốc kế lên đầu rung là rất không khả thi vì đầu rung sẽ phát sinh nhiệt độ cao làm hỏng gia tốc kế.

➤ *Sử dụng đồng hồ số*

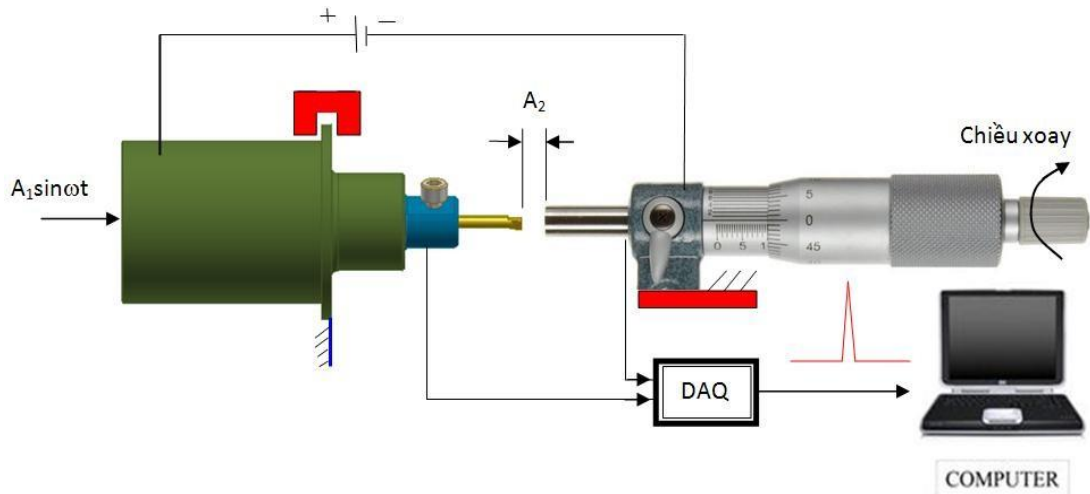
Đồng hồ số là một thiết bị đo cơ khí thông dụng, cho phép đo độ dịch chuyển của một bề mặt so với vị trí chuẩn. Cong [81] và Emmer, Kovacik [82] đề xuất mô hình đo biên độ rung động bằng đồng hồ số có độ phân giải 1 μm (Hình 4.10). Để xác định biên độ rung dọc trục của đầu dụng cụ cắt, một đồng hồ số được gắn cố định trên bàn máy. Ban đầu chỉnh cho đầu rung của đồng hồ tiếp xúc với mũi dao, điều chỉnh đồng hồ về 0. Khi cho đầu rung làm việc, đầu mũi dụng cụ sẽ rung động đẩy đầu rung của đồng hồ rung động theo. Kim đồng hồ sẽ dao động và số chỉ vạch rung động xa nhất chính là biên độ rung lớn nhất. Phương án đo này cũng yêu cầu gá đặt chắc chắn và căn chỉnh chính xác.



Hình 4.10. Sơ đồ đo biên độ rung của Cong (a) và Emmer (b)

➤ *Sử dụng panme đo ngoài*

Nguyên tắc dùng panme đo ngoài để đo biên độ rung siêu âm cũng tương tự cách sử dụng đồng hồ số nói trên. Panme đo ngoài là dụng cụ xác định kích thước chính xác. Trong nghiên cứu này, biên độ rung động thực tế được xác định bằng phép đo tiếp xúc điện. Sơ đồ đo được mô tả như Hình 4.11. Cụm đầu rung và panme được nối với một nguồn điện một chiều 6V. Khi cho đầu đo của panme chạm vào đầu mũi dao tiện sẽ làm mạch điện sẽ được đóng kín, tín hiệu điện được truyền đến bộ thu thập dữ liệu DAQ kết nối với máy tính. Để tiến hành xác định giá trị biên độ, khi chưa cấp rung, dịch chuyển đầu panme cho tiếp xúc với đầu dao. Khi tín hiệu xung điện báo thời điểm tiếp xúc, ghi nhận số đo của vạch panme. Tiếp đó, xoay núm vặn để dịch chuyển đầu panme rời xa đầu mũi dao khoảng 1-2 mm (*đảm bảo chắc chắn lớn hơn biên độ rung động cần đo*). Cấp nguồn kích thích rung cho đầu rung, xoay chậm núm vặn trên trục panme để đầu đo của panme tiến về phía đầu dao cho đến khi đầu đo chạm vào mũi dao (tín hiệu trên máy tính cho biết thời điểm này). Ghi nhận giá trị vạch chỉ của panme. Kết quả biên độ thu được sẽ bằng độ lệch của chỉ số vạch panme trước và sau khi cấp nguồn kích thích rung động.

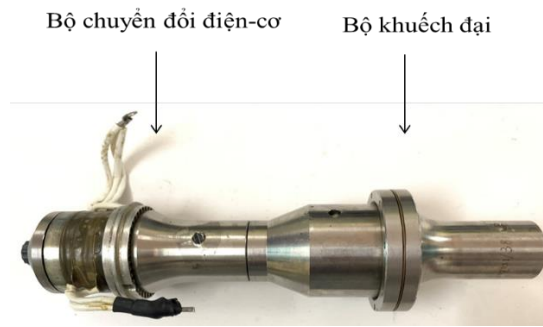


Hình 4.11. Sơ đồ mạch đo biên độ kiểu tiếp xúc dùng panme đo ngoài 1 μm

4.2. Xây dựng hệ thống thí nghiệm

4.2.1. Hệ thống thí nghiệm xác định tần số cộng hưởng và biên độ rung siêu âm bằng phương pháp đo không tiếp xúc

Đầu rung Herrmann Ultrasonic-Ultraschall 20 kHz, 20/4000 KO Converter – Transducer Schwinger Konvertern được sử dụng trong nghiên cứu này (Hình 4.12). Các thông số kỹ thuật đặc trưng của nó đưa ra trong Bảng 4.1. Một bộ phận cũng rất quan trọng là bộ khuếch đại (Booster). Bộ khuếch đại đóng một vai trò quan trọng trong việc truyền, tập trung và khuếch đại các rung động siêu âm từ đầu rung vào thiết bị công tác (Hình 4.12). Các thông số của nó được thể hiện trong Bảng 4.2.



Hình 4.12. Đầu rung siêu âm và bộ khuếch đại

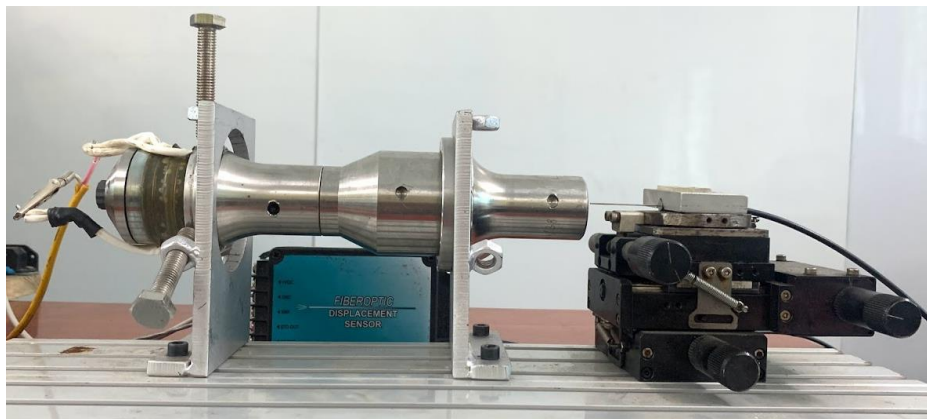
Bảng 4.1. Thông số kỹ thuật của đầu rung siêu âm

Thông số	Giá trị
Model	Herrmann Ultrasonic-Ultraschall 20/4000
Tần số (kHz)	20
Đường kính vòng Ceramic (mm)	50
Số lượng vòng Ceramic	4
Công suất (W)	4000
Biên độ dao động (μm)	10

Bảng 4.2. Đặc tính của bộ khuếch đại

Tham số	Đơn vị	Giá trị
Modun đàn hồi	GPa	200
Khối lượng riêng	Kg/m ³	7850
Hệ số Poisson	-	0.3
Hệ số khuếch đại	-	2

Để tiến hành được thí nghiệm đo, đề tài đã chế tạo bộ đồ gá như Hình 4.13. Với bộ thiết bị này việc gá đặt, kẹp chặt và điều chỉnh thiết bị rung siêu âm khi tiến hành thí nghiệm rất dễ dàng. Đặc biệt là cụm hỗ trợ việc định vị, kẹp chặt và điều chỉnh chính xác vị trí của kim đo quang học với bộ khuếch đại.



Hình 4.13. Đồ gá

Yêu cầu gá đặt:

- Bước 1: Gá đặt đảm bảo các yêu cầu:

+ Đầu rung siêu âm ngang tâm với cảm biến

+ Vị trí các cảm biến phải đảm bảo khoảng dịch chuyển x , y , θ phù hợp với mặt công tác của đầu rung.

- Bước 2: Chỉnh bộ số nhiều/tín hiệu

+ Nối mạch

+ Hiệu chỉnh cảm biến:

Theo phương x để đạt giá trị điện áp lớn nhất

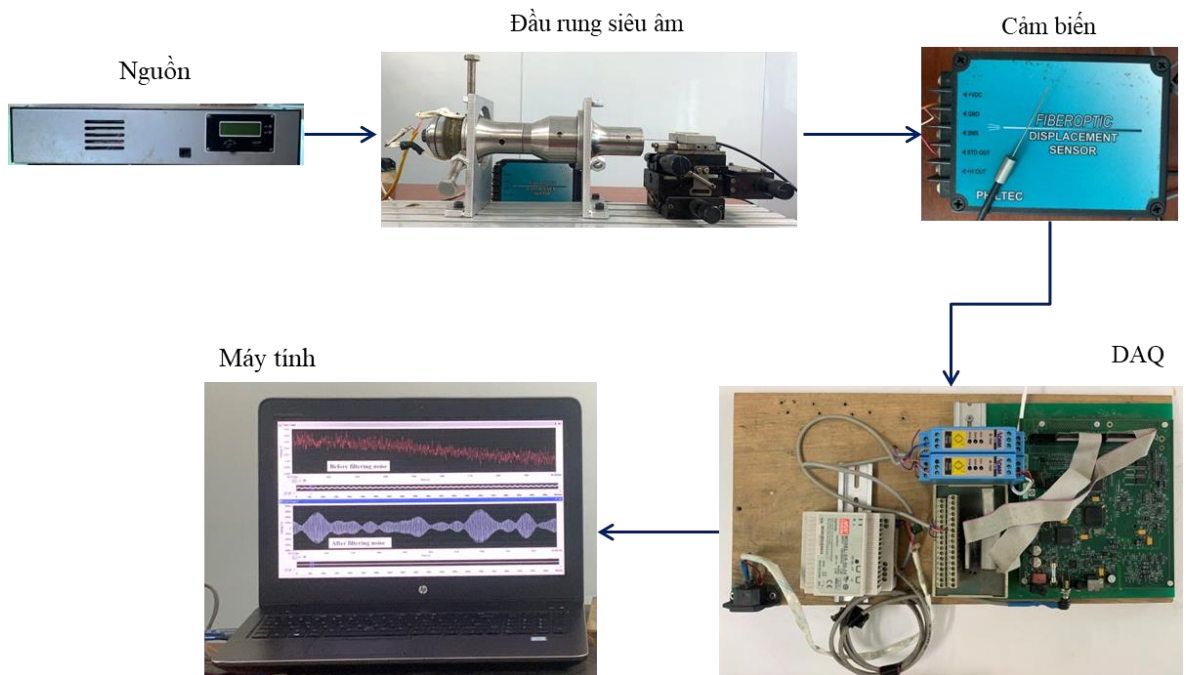
Góc xoay θ để đạt giá trị điện áp lớn nhất

$$V_{SNR} = 3.5V$$

- Bước 3: Calib xác định khoảng tuyến tính

- Bước 4: Chỉnh vị trí (gap) ban đầu

Hệ thống thí nghiệm đo biên độ của đầu rung được thiết lập như trong Hình 4.14. bao gồm một hệ thống rung siêu âm (máy phát siêu âm, đầu rung siêu âm và bộ tăng áp), thiết bị đo cảm biến dịch chuyển RC-19, bộ thu thập dữ liệu DAQ, máy tính và một số thiết bị hỗ trợ khác.



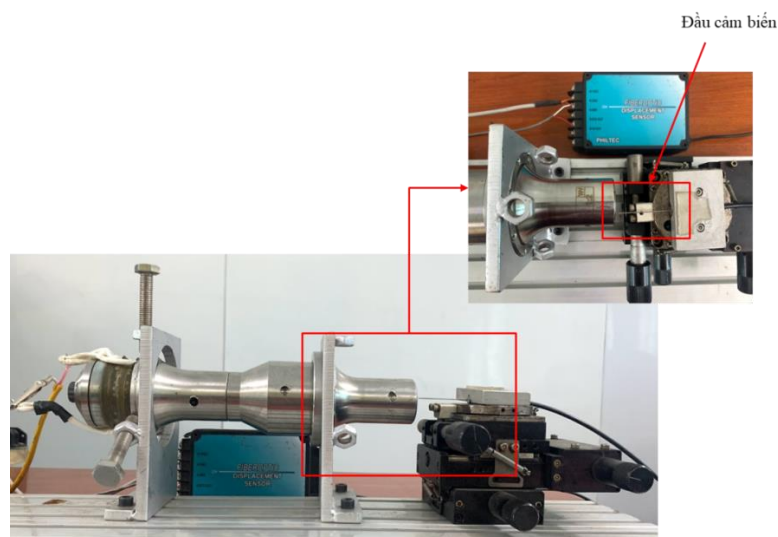
Hình 4.14. Hệ thống thí nghiệm đo biên độ của đầu rung siêu âm

Bộ rung siêu âm được gắn trên đồ gá và được kẹp ở vị trí mà biên độ rung (độ dịch chuyển) bằng không. Máy phát sóng siêu âm chuyển đổi công suất 50Hz thành đầu ra AC tần số siêu âm (kHz). Tín hiệu được đưa đến một bộ chuyển đổi áp điện bên trong rung động siêu âm để chuyển đổi tín hiệu thành rung động cơ học. Cáp quang

RC-19 và đầu cảm biến tùy chỉnh được lắp đặt như trong Hình 4.15. Điều chỉnh khoảng cách giữa cảm biến và bộ khuếch đại của bộ rung siêu âm sao cho: cảm biến vuông góc với mục tiêu và hướng tới phạm vi độ nhạy cao nhất của nó. Việc hiệu chuẩn khoảng cách cung cấp cho cảm biến phản ứng đầu ra điện áp theo khoảng cách. Trong giới hạn của dải tuyến tính, sự thay đổi của đầu ra điện áp được tính như sau:

$$\text{Khoảng cách } (\mu\text{m}) = \Delta \text{ milliVolts} \div \text{Độ nhạy} \quad (4.4)$$

Tần số quét của bộ nguồn siêu âm được điều chỉnh trong khoảng thích hợp (19 kHz - 21 kHz). Bằng cách này, có thể quét các giá trị để có được phạm vi tải siêu âm thích hợp nhất. Dữ liệu đo được ghi lại bằng phần mềm SignalExpress. Dữ liệu này được phân tích với sự trợ giúp của phần mềm OriginLab để tìm ra biên độ của hệ thống đầu rung.



Hình 4.15. Gá đặt đầu cảm biến dịch chuyển

4.2.2. Hệ thống thí nghiệm xác định tần số cộng hưởng và trở kháng của đầu rung siêu âm bằng thiết bị phân tích trở kháng

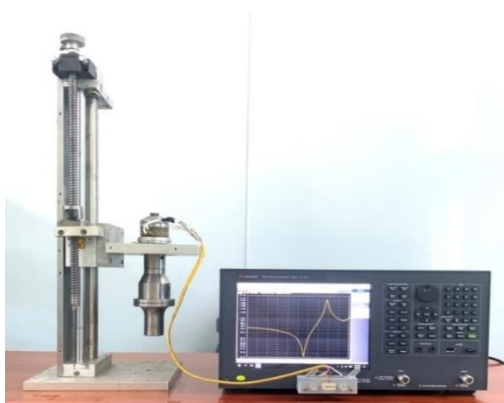
Thí nghiệm sử dụng thiết bị phân tích trở kháng phức E5061B Network Analyzer và được thiết lập như Hình 4.16, nguyên lý đo thể hiện trong Hình 4.17. Thiết bị rung siêu âm được đặt trên đồ gá (Hình 4.15) và được kết nối với máy phân tích thông qua cổng Gain-phase (Hình 4.17a). Tín hiệu quét 224mV, 50Ω được áp dụng để đo phổ trở kháng và tần số. Từ đó thu được kết quả về độ lớn của tần số cộng hưởng và phản cộng hưởng, tần số của đầu rung siêu âm. Máy phân tích đã được hiệu chuẩn trước khi thực hiện thí nghiệm. Mô hình mạch điện tương đương của đầu rung siêu âm sử dụng trong thí nghiệm được tổng quát như Hình 4.17b.

Cơ chế xác định trở kháng của E5016B là dựa trên lý thuyết mạch điện tương đương. Phương pháp mạch tương đương có thể trình bày chính xác mối quan hệ giữa tín hiệu đầu vào của năng lượng điện và đầu ra dưới dạng rung động cơ học trong các

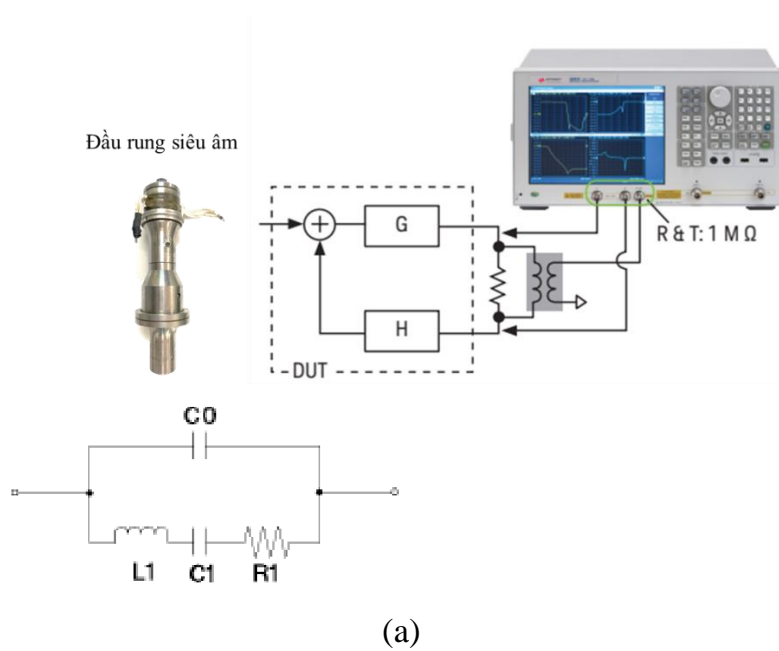
điều kiện làm việc nhất định. Các nhà nghiên cứu đã sử dụng các mô hình như mô hình KLM (Krimholtz, Leedom và Matthaei) [83-85], mô hình Redwood [83] và mô hình Mason [83, 84]. Mặc dù các mô hình trên hầu hết được mô tả ứng xử một chiều, nhưng phương pháp này có thể áp dụng cho các thiết bị rung siêu âm kiểu Langevin [86, 87]. Các mô hình điện và cơ hai chiều thường được áp dụng khi nói đến các ứng xử vật lý [88, 89]. Các nghiên cứu đã sử dụng mô hình KLM một chiều để nghiên cứu thiết bị rung siêu âm dạng màng mỏng (như phân tử thanh mảnh) [13,14]. Phương pháp này có thể phân tích các tải cơ học khác nhau, tần số cộng hưởng và sự dịch chuyển của thiết bị rung [90, 91]. Ảnh hưởng của tải âm bên ngoài lên thiết bị có thể được mô hình hóa bằng cách thêm điện trở R vào mạch điện tương đương.

Smyth đã nghiên cứu một mạch tương đương Mason phân tích để mô tả rung động siêu âm và cho phép triển khai mô hình đơn giản trên phạm vi rộng để thiết kế và tối ưu hóa đầu rung trong tương lai [92]. Je và cộng sự đã phát triển một mô hình mạch tương đương tiên tiến cho đầu rung áp điện. Mô hình này có thể được sử dụng để dự đoán ảnh hưởng của lớp áp điện đến hệ số ghép nối và hiệu suất của đầu rung vi cơ áp điện [93]. Hình 4.17 biểu diễn mạch tương đương cho đầu rung siêu âm thông qua các thành phần của mạch điện.

Ngoài cổng S-parameter, E5061B-3L5 còn có cổng gain-phase để làm việc ở tần số thấp đòi hỏi truy cập trực tiếp nguồn, máy thu và dò trở kháng cao. Cổng gain-phase dùng để đo trở kháng của các bộ khuếch đại tần số thấp và các mạch điều khiển như bộ chuyển đổi DC-DC. Cổng gain-phase hỗ trợ dải tần từ 5 Hz đến 30 MHz. Trở kháng đầu vào của máy thu R và T có thể chuyển đổi thành $1\text{ M}\Omega/30\text{ pF}$ và $50\ \Omega$. Mỗi bộ thu được tích hợp một bộ suy hao (0dB/20dB, có thể chọn thủ công), mức độ tối ưu hóa đầu vào và tăng nhiễu của bộ thu tùy thuộc vào mức đầu ra của DUT và độ suy giảm của các đầu rung kết nối với bộ thu.



Hình 4.16. Hệ thống thí nghiệm sử dụng thiết bị phân tích trở kháng

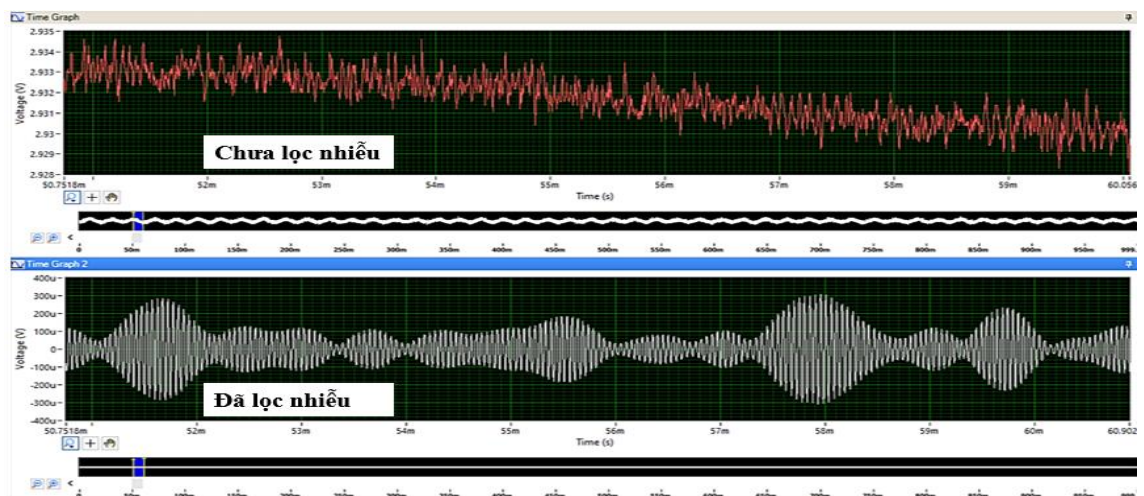


Hình 4.17. Sơ đồ mạch điện tương đương sử dụng trong thí nghiệm

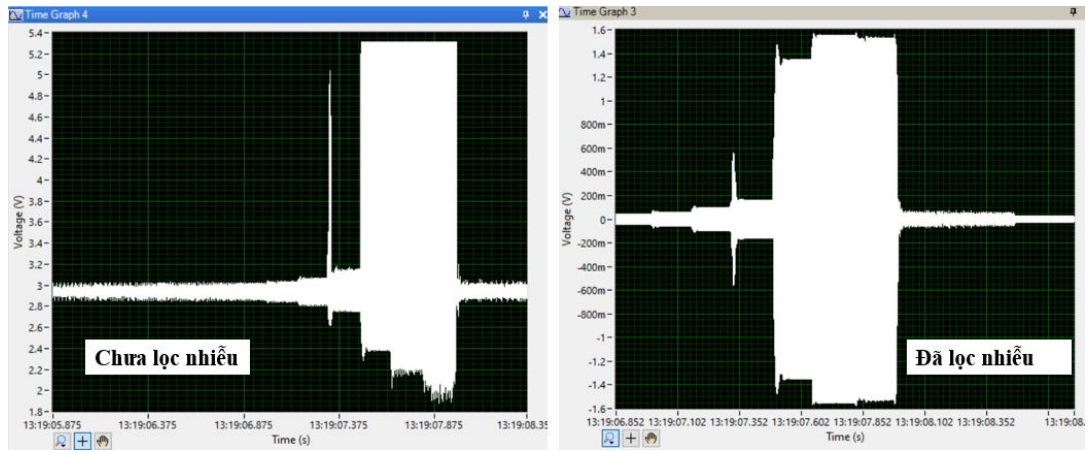
4.3. Kết quả thí nghiệm

4.3.1. Tần số cộng hưởng, biên độ rung siêu âm bằng phương pháp đo không tiếp xúc

Khi tiến hành thí nghiệm đo đã phát hiện ra sự tồn tại của một số tần số lạ gây ra hiện tượng nhiễu biên độ. Để giải quyết vấn đề này, một phương pháp lọc kỹ thuật số đã được sử dụng để loại bỏ các tần số gây nhiễu. Phương pháp này được thực hiện bằng cách kích hoạt tính năng có sẵn trong phần mềm ứng dụng cài đặt trên thiết bị đo Hình 4.18, thể hiện tín hiệu điện áp trước và sau khi sử dụng phương pháp lọc nhiễu. Hình 4.19, cho thấy rõ ảnh hưởng hiện tượng nhiễu biên độ khi tiến hành thí nghiệm đo biên dạng cho thiết bị rung siêu âm. Kết quả nhận được cho thấy, biên độ điện áp khi chưa lọc nhiễu rất lớn và phân bố không theo quy luật, sau khi sử dụng phương pháp lọc nhiễu thì biên độ thu được đã phân bố tuân theo quy luật.

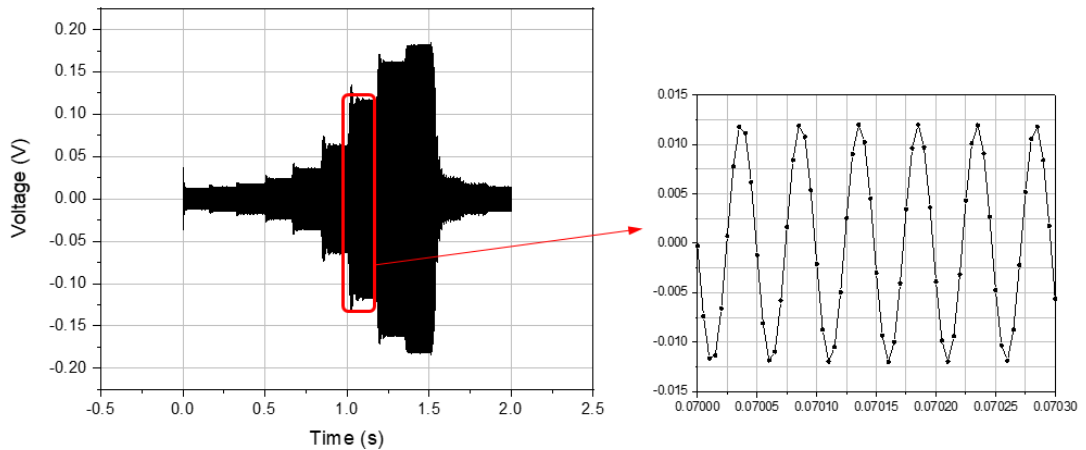


Hình 4.18. Tín hiệu điện áp trước và sau khi sử dụng phương pháp lọc nhiễu

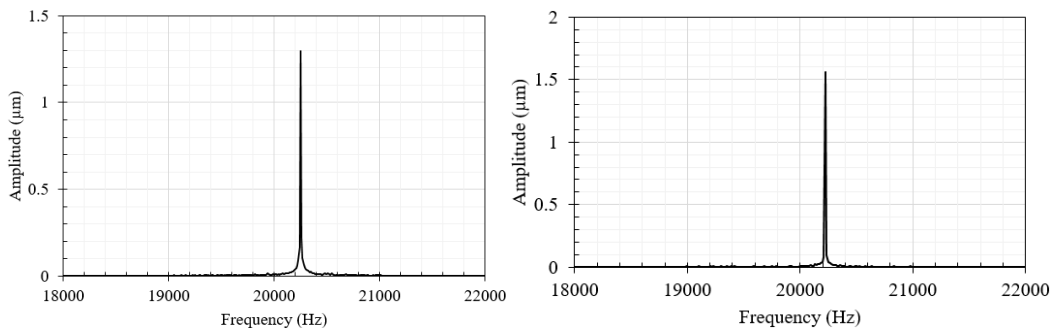


Hình 4.19. Kết quả đo trước và sau lọc nhiễu

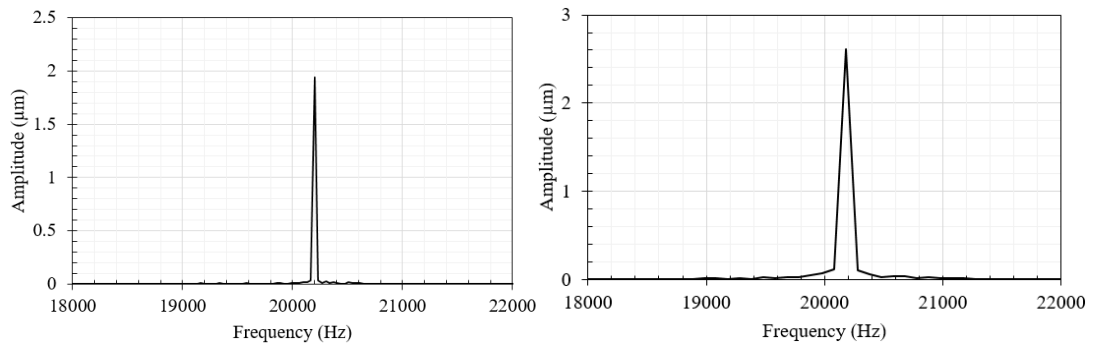
Kết quả đo thu được thể hiện bằng đồ thị (Hình 4.20) mối quan hệ giữa điện áp và thời gian trong toàn bộ quá trình đo. Dữ liệu thu được phân hóa thành các đoạn khác nhau. Để phân tích và đánh giá chi tiết kết quả thu được, đề tài đã tiến hành tách dữ liệu thành 09 đoạn riêng biệt. Sử dụng thuật toán biến đổi nhanh Fourier (FFT) trong OriginLab để xác định tần số cộng hưởng và biên độ rung động. Kết quả thu được thể hiện trong Hình 4.21-4.25 (ứng với các đoạn dữ liệu phân tích từ 1 đến 9).



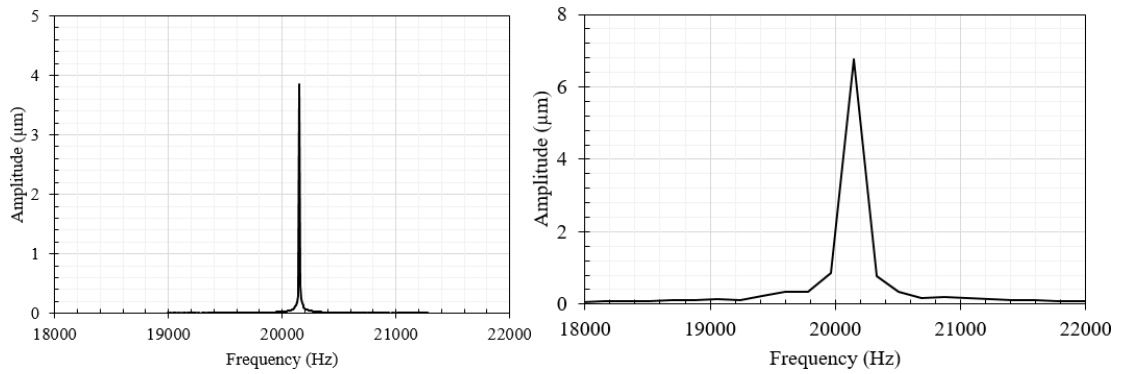
Hình 4.20. Quan hệ điện áp và thời gian



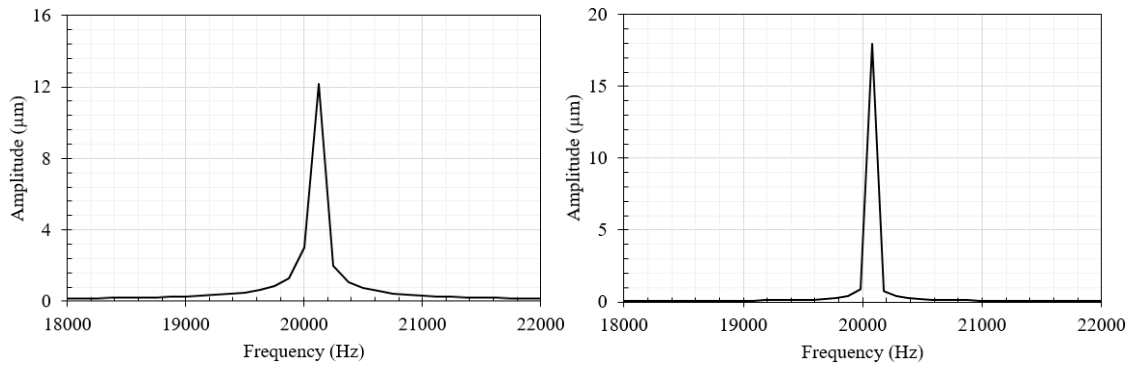
Hình 4.21. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 1-2)



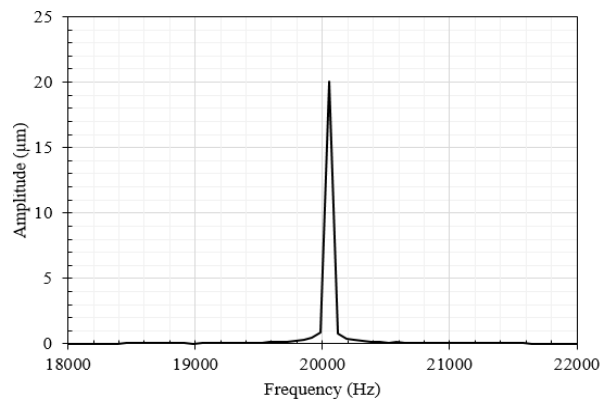
Hình 4.22. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 3-4)



Hình 4.23. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 5-6)



Hình 4.24. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 7-8)



Hình 4.25. Mối quan hệ giữa tần số cộng hưởng và biên độ (Đoạn 9)

Bảng 4.3. Tổng hợp tần số cộng hưởng và biên độ rung động

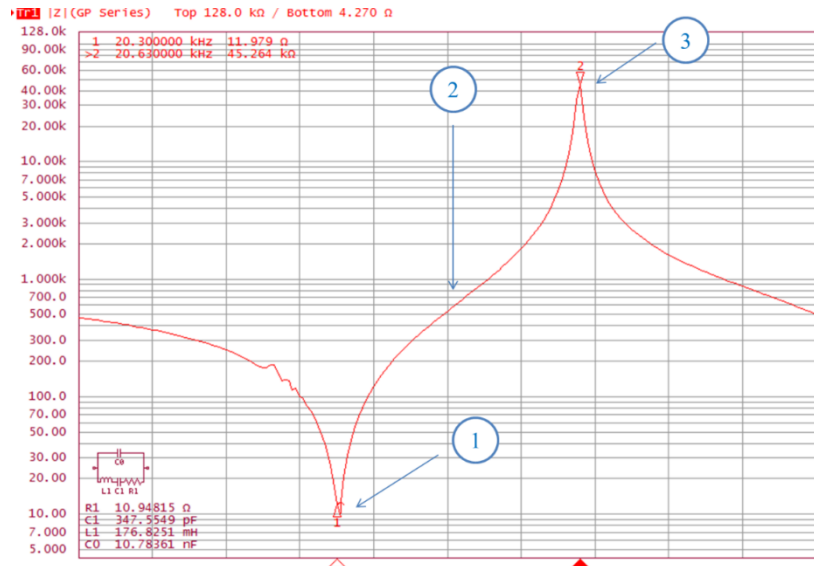
Đoạn	Tần số cộng hưởng (Hz)	Biên độ rung động (μm)
1	20248.98	1.29
2	20224.72	1.55
3	20199.93	1.93
4	20179.82	2.61
5	20151.52	3.85
6	20145.19	6.76
7	20125.00	12.18
8	20079.92	17.98
9	20053.29	20.07

Kết quả thu được được tóm tắt trong Bảng 4.3. Kết quả nhận được cho thấy tần số cộng hưởng và phản cộng hưởng lần lượt là 20053.29Hz và 20248.98Hz tương ứng với biên độ dao động 20.07 μm và 1.29 μm . So với giá trị cộng hưởng đưa ra của nhà sản xuất là 20000 Hz và 20 μm , sai số lần lượt là khoảng 0,26% và 0,35%. Điều này cho thấy quy trình và phương pháp kiểm tra đề xuất có độ chính xác ở mức chấp nhận được.

4.3.2. Tần số cộng hưởng và trở kháng của đầu rung siêu âm bằng thiết bị phân tích trở kháng

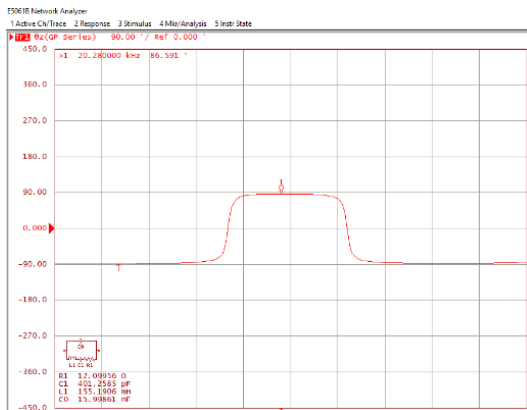
Kết quả đo thu được thể hiện bằng mối quan hệ giữa trở kháng phức và tần số như Hình 4.26. Tần số cộng hưởng, phản cộng hưởng thu được lần lượt là 20.17kHz và 20.42kHz tương ứng với độ lớn trở kháng là 12.101 Ω và 21.598k Ω . So sánh với tần số cộng hưởng của nhà sản xuất đưa ra là 20kHz, sai số là 0.85%. Điều này cho thấy quy trình và phương pháp kiểm tra được đề xuất trong nghiên cứu này là đáng tin cậy.

Như đã đề cập ở trên, hai giá trị tần số cộng hưởng (f_a) và phản cộng hưởng (f_r) là giá trị cần quan tâm. Đầu rung muốn hoạt động hiệu quả cần được cấp tín hiệu điện với tần số tương ứng với giá trị tần số cộng hưởng. Hình 4.26, mô tả vùng tần số phản cộng hưởng rung động siêu âm ứng dụng cho thiết bị gia công cơ. Tại vùng (1) xảy ra tần số cộng hưởng f_r công suất đầu rung sẽ đạt cực đại. Vùng lân cận điểm (3) là khu vực mà tổng kháng của đầu rung đạt giá trị lớn nhất. Tại đây sẽ xảy ra tần số phản cộng hưởng f_a , được cho là phù hợp để gia công cơ. Vùng (2) là vùng tần số vận hành của đầu rung.

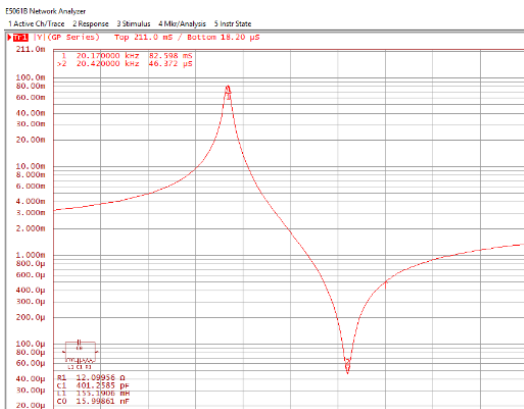


Hình 4.26. Kết quả đo sử dụng máy phân tích trở kháng E5061B

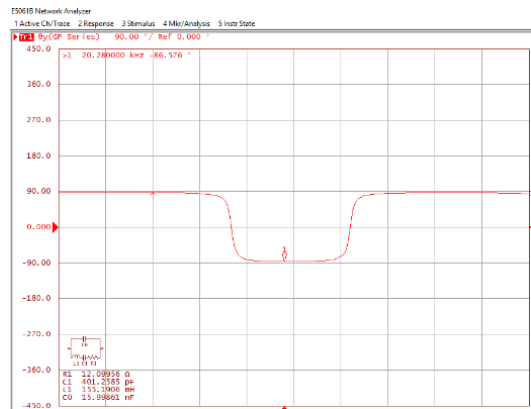
Ngoài tần số, E5061B Network Analyzer có thể đo 15 thông số khác bao gồm độ thị pha của trở kháng, giá trị điện dẫn, đồ thị pha của điện dẫn, điện dung song song, điện dung nối tiếp, điện cảm song song, điện cảm nối tiếp, điện trở song song, điện trở nối tiếp, hệ số suy hao, hệ số chất lượng, điện trở, điện kháng, độ dẫn điện, Susceptance). Hình 4.27 mô tả các thông số này.



Đồ thị pha của trở kháng
(Impedance phase)

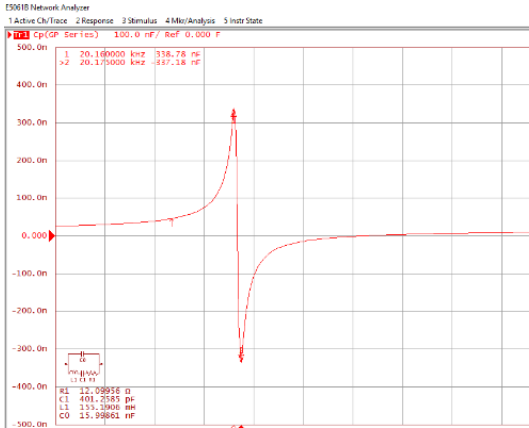


Giá trị điện dẫn



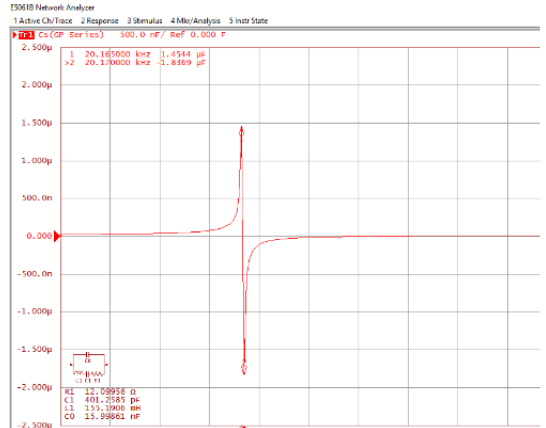
Đồ thị pha của điện dẫn

(Admittance magnitude)

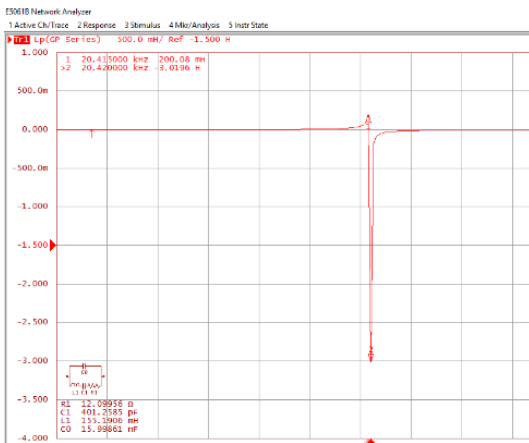


Điện dung song song
(Parallel capacitance)

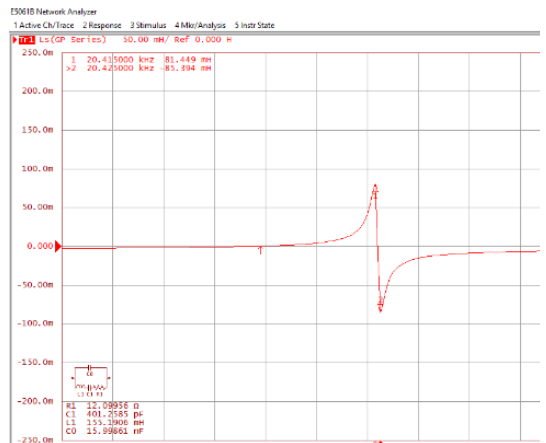
(Admittance phase)



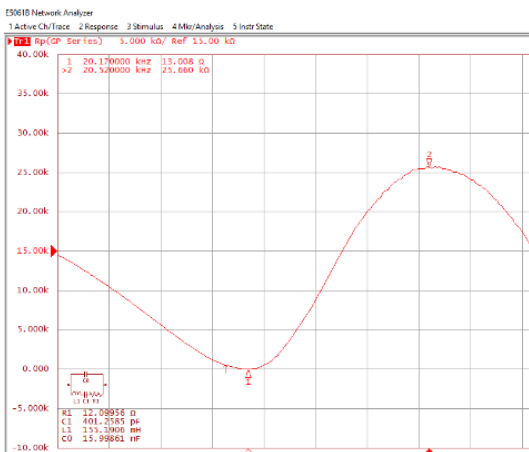
Điện dung nối tiếp
(Series capacitance)



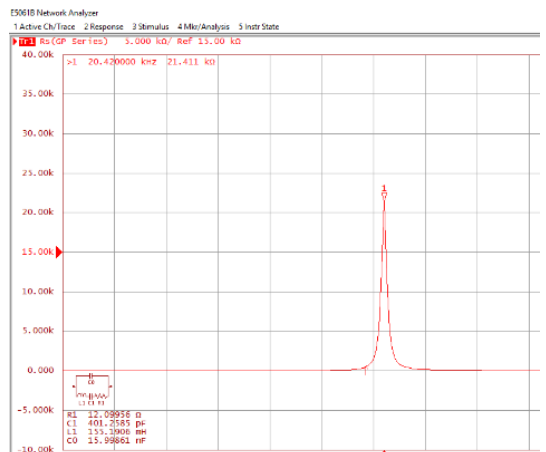
Điện cảm song song
(Parallel inductance)



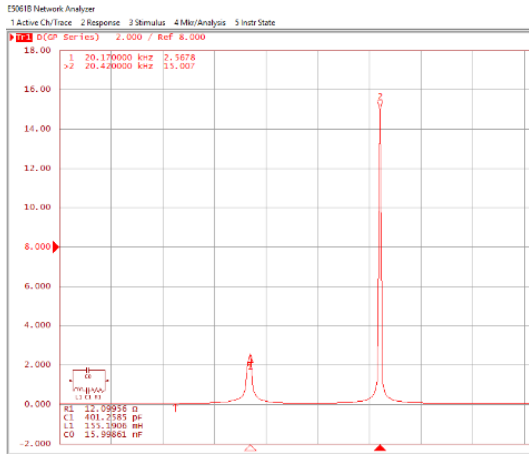
Điện cảm nối tiếp
(Series inductance)



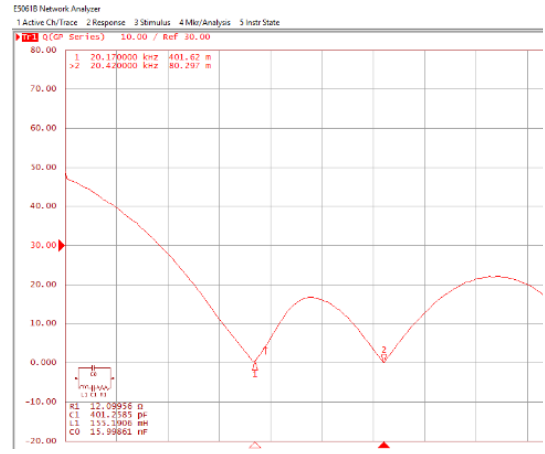
Điện trở song song
(Parallel resistance)



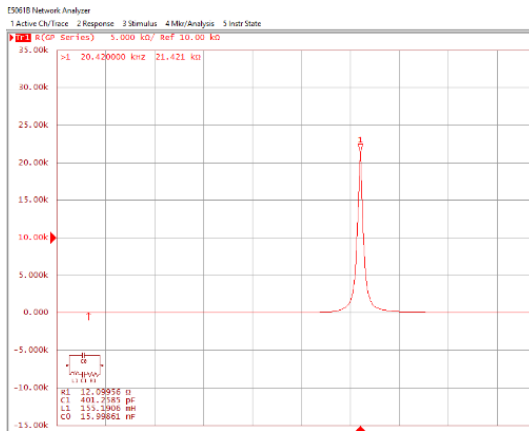
Điện trở nối tiếp
(Series resistance)



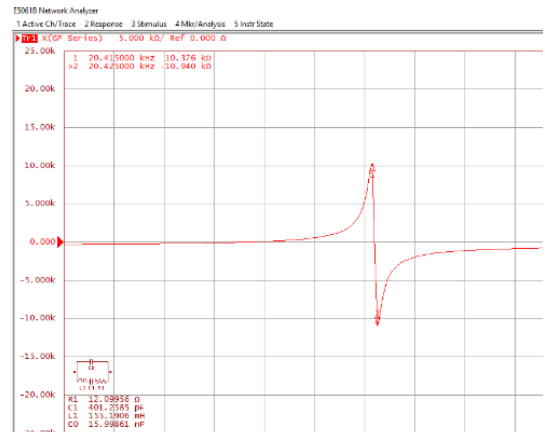
Hệ số suy hao
(Dissipation factor)



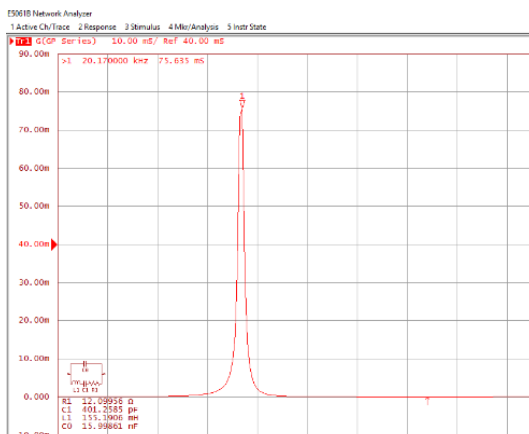
Hệ số chất lượng
(Quality factor)



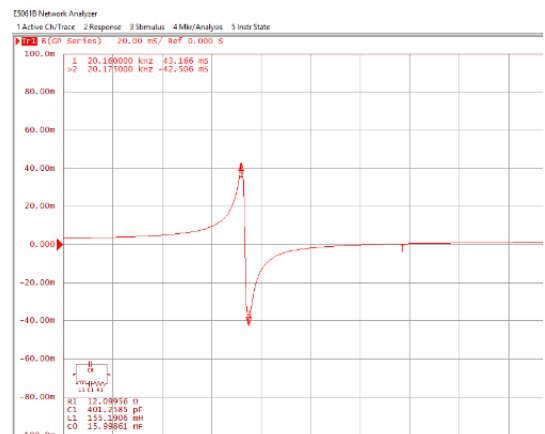
Điện trở
(Resistance)



Điện kháng
(Reactance)



Độ dẫn điện
(Conductance)



Điện nạp
(Susceptance)

Hình 4.27. Các thông số đo bởi máy phân tích trở kháng E5061B Network Analyzer

Đề tài đã đề xuất, triển khai thành công hai hệ thống thí nghiệm đáp ứng đồng thời các yêu cầu đặt ra. Bảng 4.4 so sánh giá trị tần số cộng hưởng, phản cộng hưởng với giá trị nhà sản xuất đưa ra.

Bảng 4.4. Bảng so sánh kết quả thực nghiệm và lý thuyết.

	Phương pháp đo tiếp xúc	Phương pháp đo bằng thiết bị phân tích trở kháng	Nhà sản xuất
Tần số cộng hưởng	20.05329	20.17	20
Tần số phản cộng hưởng	20.24898	20.42	--

Kết quả thực nghiệm sơ bộ đánh giá cho thấy hệ thống đáp ứng tốt yêu cầu và thu thập tín hiệu đo rõ ràng, ổn định với sai số nằm trong khoảng cho phép so với công bố của nhà sản xuất. Phương pháp đo tiếp xúc cho kết quả gần hơn với thông số của nhà sản xuất, tuy nhiên, quá trình thiết lập phức tạp, đảm bảo nhiều điều kiện gá đặt. Đối với phương pháp đo bằng thiết bị phân tích trở kháng, do thiết bị được thương mại hóa nên độ tin cậy cao, có thể thiết lập thí nghiệm dễ dàng, nhỏ gọn, có thể đo được nhiều thông số (ngoài giá trị trở kháng E5061B Network Analyzer có thể đo 14 thông số khác bao gồm đồ thị pha của trở kháng, giá trị điện dẫn, đồ thị pha của điện dẫn, điện dung song song, điện dung nối tiếp, điện cảm song song, điện cảm nối tiếp, điện trở song song, điện trở nối tiếp, hệ số suy hao, hệ số chất lượng, điện trở, điện kháng, độ dẫn điện, hệ số nạp điện).

4.4. Kiểm chứng kết quả mô phỏng số với kết quả thực nghiệm

4.4.1. Đối với mô hình giải tích

Để kiểm chứng mô hình giải tích, thí nghiệm được thiết lập để đo quang phổ trở kháng pha của 04 vòng PZT xếp chồng lên nhau bằng máy phân tích trở kháng ENA Keysight E5061B-3L5. Kích thước vòng PZT và tính chất vật liệu được thể hiện trong Bảng 4.5.

Bảng 4.5. Tính chất của vật liệu PZT4

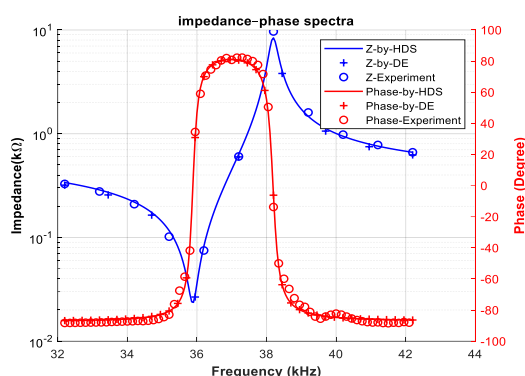
	Mật độ (kg/m ³)	Độ dày của một vòng PZT (mm)	Số lớp	Bán kính ngoài (mm)	Bán kính trong (mm)
PZT	7500	6.5	4	50	17

Như đã đề cập ở trên, chương trình sử dụng Matlab được áp dụng để tìm các biến k_t , $\tan \delta_k$, $\tan \delta_e$, $\tan \delta_m$, c_{33}^D , $\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$ của vật liệu PZT (bjultrasonic.com) từ 04 vòng PZT xếp chồng. Giới hạn dưới và trên của các tham số này được hiển thị trong Bảng 4.6.

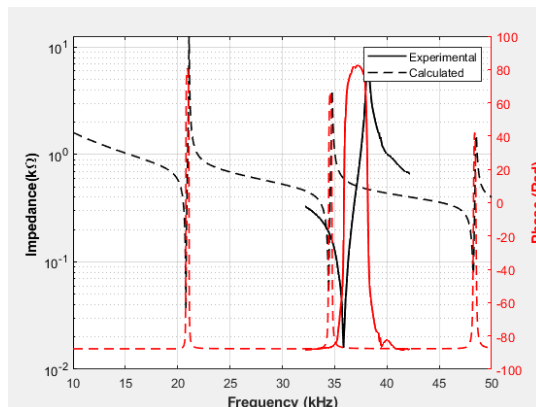
Bảng 4.6. Điều kiện biến của các biến thiết kế trong mô hình Kwok [50]

Các biến thiết kế	k_t	$\tan \delta_k$	$\tan \delta_e$	$\tan \delta_m$	c_{33}^D (GPa)	$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$
Giới hạn dưới	0	-1	0	0	1	500
Giới hạn trên	1	1	1	1	150	2000

Kết quả đồ thị trở kháng và sơ đồ pha tại điểm cộng hưởng và phản cộng hưởng trên Hình 4.28 và Hình 4.29 cho thấy dữ liệu mô phỏng với các hằng số tối ưu tương ứng phù hợp tốt với các hằng số từ các thí nghiệm.



Hình 4.28. So sánh trở kháng và sơ đồ pha của phần vật liệu áp điện với thực nghiệm



Hình 4.29. So sánh trở kháng và sơ đồ pha của thiết bị rung siêu âm với thực nghiệm

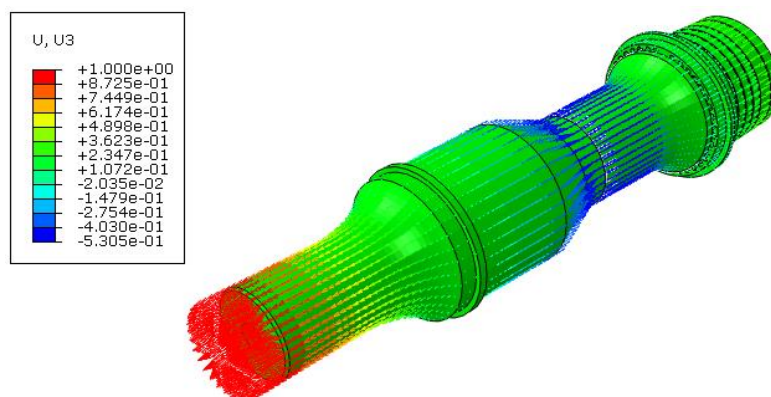
4.4.2. Đối với mô hình phần tử hữu hạn

Kết quả của quy trình thí nghiệm được thiết lập ở phần trước cho thấy giá trị của các đại lượng cần đo phù hợp với giá trị thiết kế. Cụ thể, tần số cộng hưởng đo được là 20.053 kHz, tương ứng với biên độ 20.07 μm so với giá trị thiết kế là 20 kHz và 20 μm . So sánh kết quả mô phỏng số và thực nghiệm được trình bày trong Bảng 4.7. Sai số tần số cộng hưởng là 1.74% và sai số biên độ dao động là 4.83%. Các kết quả số thu được là phù hợp tốt với kết quả thực nghiệm. Mặt khác, kết quả mô phỏng số trong

phần trước cho thấy chuyển vị của các điểm trên đầu trợ lực là như nhau (Hình 4.29). Điều đó một lần nữa khẳng định độ tin cậy của mô hình và kết quả mô phỏng số đã thực hiện.

Bảng 4.7. So sánh kết quả mô phỏng số và thực nghiệm

	Thực nghiệm	Mô phỏng số	Sai số (%)
Tần số cộng hưởng (Hz)	20053	19703	1.74
Biên độ rung (μm)	20.07	19.10	4.83



Hình 4.30. Sự dịch chuyển của các điểm trên đỉnh của bộ khuếch đại

4.5. Kết luận

Để triển khai nghiên cứu và phân tích rung động đầu công tác hàn siêu âm, hệ thống đo các đặc tính của đầu rung đề tài thiết lập đã đáp ứng đồng thời các yêu cầu sau:

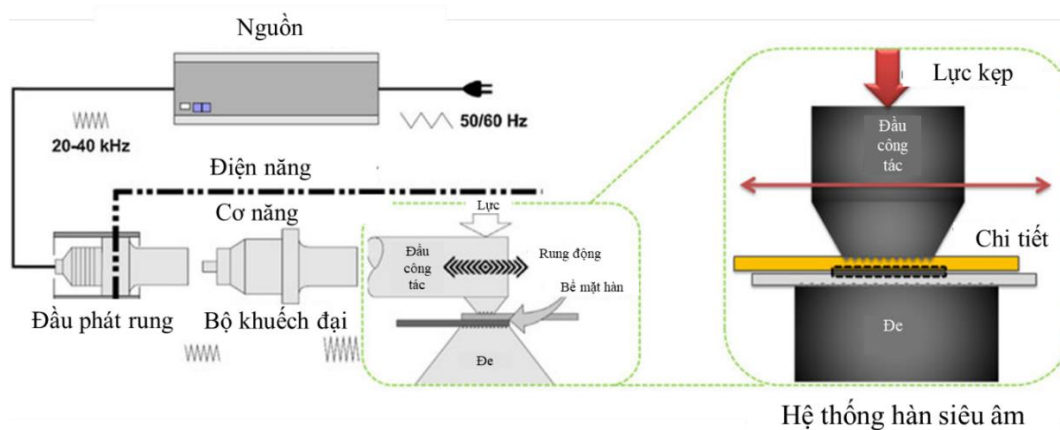
- Các hệ thống đo phù hợp với điều kiện hiện có trong nước, khắc phục khó khăn về thiết bị đo.
- Các số liệu đo được phù hợp với giải thuyết đã đặt ra, cũng như phù hợp với số liệu công bố của nhà sản xuất đối với bộ đầu rung mẫu. Đảm bảo đủ độ tin cậy và được sử dụng trực tiếp để so sánh với kết quả tính toán số từ các mô hình giải tích và mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trong nghiên cứu này.
- Hệ thống thí nghiệm xây dựng được là cơ sở quan trọng cho việc phát triển nghiên cứu thiết kế, chế tạo hoàn chỉnh dụng cụ cho gia công có rung động trợ giúp, triển khai nghiên cứu ứng dụng cho các sản phẩm thực.

Với mục tiêu đặt ra ban đầu là hướng đến triển khai nghiên cứu ứng dụng cho các sản phẩm thực, đề tài đã nghiên cứu thiết kế cải tiến bộ nguồn máy hàn siêu âm đơn chức năng thành bộ nguồn siêu âm đa dải tần, có điều khiển thích nghi, thông qua thiết kế bổ sung mạch điều khiển tạo tần số siêu âm có mạch phản hồi để sử dụng bộ công suất hiện có. Các nội dung này được trình bày trong chương 5 tiếp theo.

CHƯƠNG 5. THIẾT KẾ CHẾ TẠO BỘ NGUỒN SIÊU ÂM CẢI TIẾN ỨNG DỤNG TRONG HÀN SIÊU ÂM

5.1. Đặt vấn đề

Hàn siêu âm là một quá trình hàn áp lực, có nguyên lý tương tự hàn ma sát. Quá trình hàn sử dụng năng lượng cơ học của rung động siêu âm để nung nóng cục bộ vật liệu cần hàn đến trạng thái chảy dẻo tại vị trí bề mặt mối ghép. Rung động tương đối của các bề mặt tiếp xúc phát sinh lực ma sát nung nóng cục bộ các bề mặt này. Dưới tác dụng của lực ép các phần tử của chi tiết hàn được khuếch tán, thẩm thấu vào nhau tạo thành mối hàn. Hàn siêu âm là một phương pháp gia công tiên tiến, được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo các thiết bị y tế, công nghiệp điện - điện tử, hàng không vũ trụ và cơ khí chính xác... Sơ đồ nguyên lý hàn siêu âm được minh họa trên Hình 5.1.



Hình 5.1. Các thành phần của hệ thống hàn siêu âm

Bộ nguồn siêu âm (còn gọi là máy phát siêu âm) là một thiết bị điện tử tạo ra rung động có tần số cao hoặc sóng âm, thường trên 20 kHz, để cấp cho đầu rung siêu âm. Hiện nay, các máy phát rung động siêu âm trên thị trường chỉ tạo ra được các tín hiệu rung động siêu âm với một dải tần và công suất nhất định, mặc dù có giá thành rất cao, ví dụ: máy hàn siêu âm Rama RS-165 có công suất 3200W và tần số 15kHz, máy hàn nhựa siêu âm MT-2020AC+ có công suất 2000W và tần số 20kHz,... Để mở rộng phạm vi ứng dụng của bộ nguồn siêu âm phục vụ cho các mục đích khác nhau, đề tài đã nghiên cứu đề xuất thiết kế mạch điều khiển và tạo tín hiệu rung động siêu âm đa dải tần, ghép nối với mạch công suất siêu âm của bộ nguồn siêu âm có sẵn (Pearl Ultrasonic Welder USG 634) để nâng cấp bộ nguồn hàn siêu âm.

5.2. Cấu tạo của bộ nguồn siêu âm nguyên mẫu

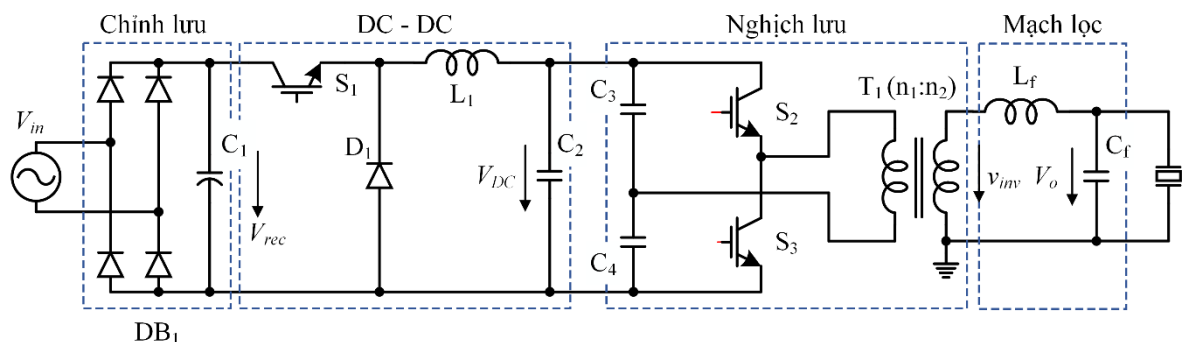
Cấu tạo của bộ nguồn siêu âm thông thường bao gồm các phần: nguồn điện, bộ tạo rung động và đầu rung (Hình 5.2). Bộ tạo rung động tạo ra tín hiệu điện ở một tần số cụ thể, sau đó được chuyển đổi thành các rung động cơ học bằng đầu rung. Những

rung động này được truyền qua một môi trường để tạo ra hiệu ứng siêu âm mong muốn. Các máy phát siêu âm có kích thước và xếp hạng năng lượng khác nhau tùy thuộc vào ứng dụng [94].



Hình 5.2. Cấu tạo của bộ nguồn siêu âm

Sơ đồ cấu trúc mạch của bộ nguồn siêu âm Pearl Ultrasonic Welder USG634 được chỉ tra trên Hình 5.3. Hệ thống có thể chia thành các module chính như sau: mạch chỉnh lưu, mạch biến đổi DC-DC, mạch nghịch lưu, và mạch lọc.



Hình 5.3. Sơ đồ cấu trúc hệ thống

a) Mạch chỉnh lưu

Mạch chỉnh lưu cầu diode DB_1 biến đổi điện áp lưới xoay chiều V_{in} 50Hz thành điện áp một chiều V_{rec} cung cấp năng lượng cho mạch công suất.

Điện áp chỉnh lưu sau đó được lọc và làm phẳng bởi tụ đầu vào C_1 . Điện dung của tụ có giá trị đủ lớn sao cho điện áp một chiều đầu ra là hằng số.

b) Bộ biến đổi DC-DC

Điện áp một chiều sau chỉnh lưu V_{rec} có độ lớn phụ thuộc vào điện áp lưới theo công thức: $V_{rec} = 0.707 \times V_{in}$. Ở chế độ cộng hưởng, công suất đầu rung siêu âm phụ

thuộc điện áp đầu vào của mạch nghịch lưu V_{DC} . Vì vậy, để điều chỉnh công suất siêu âm, điện áp sau chỉnh lưu V_{rec} được đưa qua bộ biến đổi DC – DC kiểu Buck để thay đổi điện áp V_{DC} theo yêu cầu:

$$V_{DC} = D \times V_{rec} \quad (5.1)$$

Trong đó: D ($0 \div 1$) là độ rộng xung PWM đưa tới điều khiển khóa bán dẫn S_1 . Diode D_1 , cuộn cảm L_1 , tụ C_2 là các thành phần của mạch Buck.

c) Mạch nghịch lưu

Mạch nghịch lưu biến đổi điện áp một chiều V_{DC} thành điện áp xoay chiều ở đầu ra v_{inv} . Điện áp v_{inv} có dạng xung vuông với tần số bằng tần số đóng cắt của 2 khóa S_2, S_3 , biên độ xung vuông được tính theo công thức:

$$V_{inv} = \frac{n_2}{n_1} \times \frac{V_{DC}}{2} \quad (5.2)$$

Trong đó: n_1, n_2 là số vòng cuộn dây sơ cấp và thứ cấp của máy biến áp T_1 .

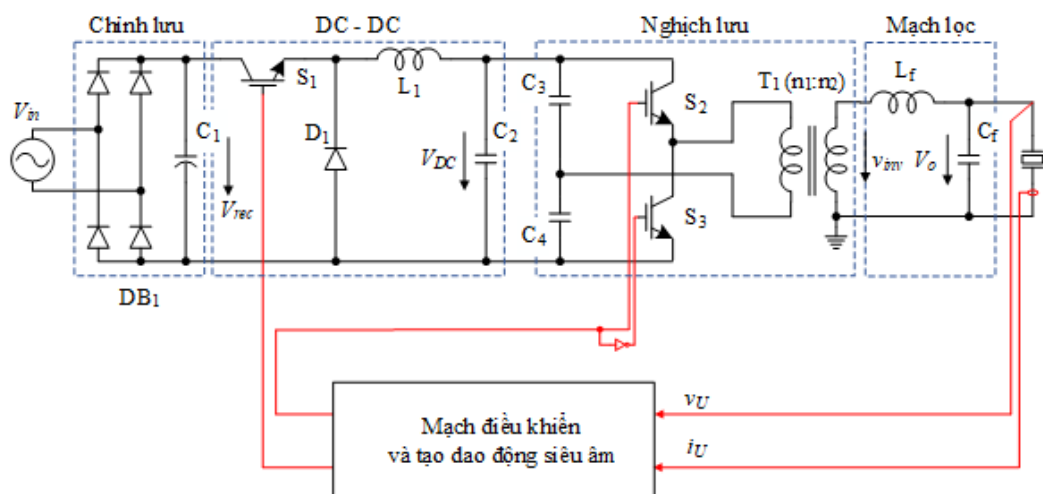
d) Mạch lọc

Điện áp xoay chiều đầu ra của mạch nghịch lưu V_{inv} có dạng xung vuông được đưa qua mạch lọc LC tạo thành điện áp xoay chiều hình sine trên đầu rung siêu âm V_o . Ngoài ra, mạch lọc LC cũng có tác dụng cân bằng trở kháng giữa mạch nghịch lưu và đầu rung siêu âm để đạt được hiệu suất truyền năng lượng tối ưu.

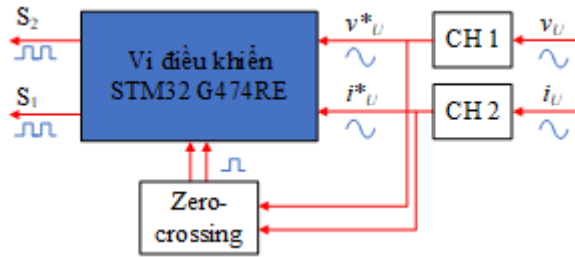
5.3. Cấu trúc bộ nguồn siêu âm cải tiến

Sơ đồ cấu trúc hệ thống cải tiến chỉ ra trên Hình 5.4. Trong đó, phần mạch công suất (gồm các mạch chỉnh lưu, biến đổi DC-DC, nghịch lưu, lọc) lấy từ bộ nguồn siêu âm sẵn có, được chỉnh sửa để ghép nối với mạch điều khiển và tạo dao động siêu âm.

Với việc gắn thêm mạch điều khiển và tạo tín hiệu rung động siêu âm đa dải tần (Hình 5.5), thiết bị sau cải tiến có thể điều chỉnh hoạt động trên một số dải tần số khác nhau (từ 20KHz đến 40KHz) và mức công suất khác nhau, từ đó, thiết kế và chế tạo một số đầu rung siêu âm thử nghiệm trong ứng dụng hàn nhựa hay làm sạch.



Hình 5.4 Sơ đồ cấu trúc hệ thống cải tiến

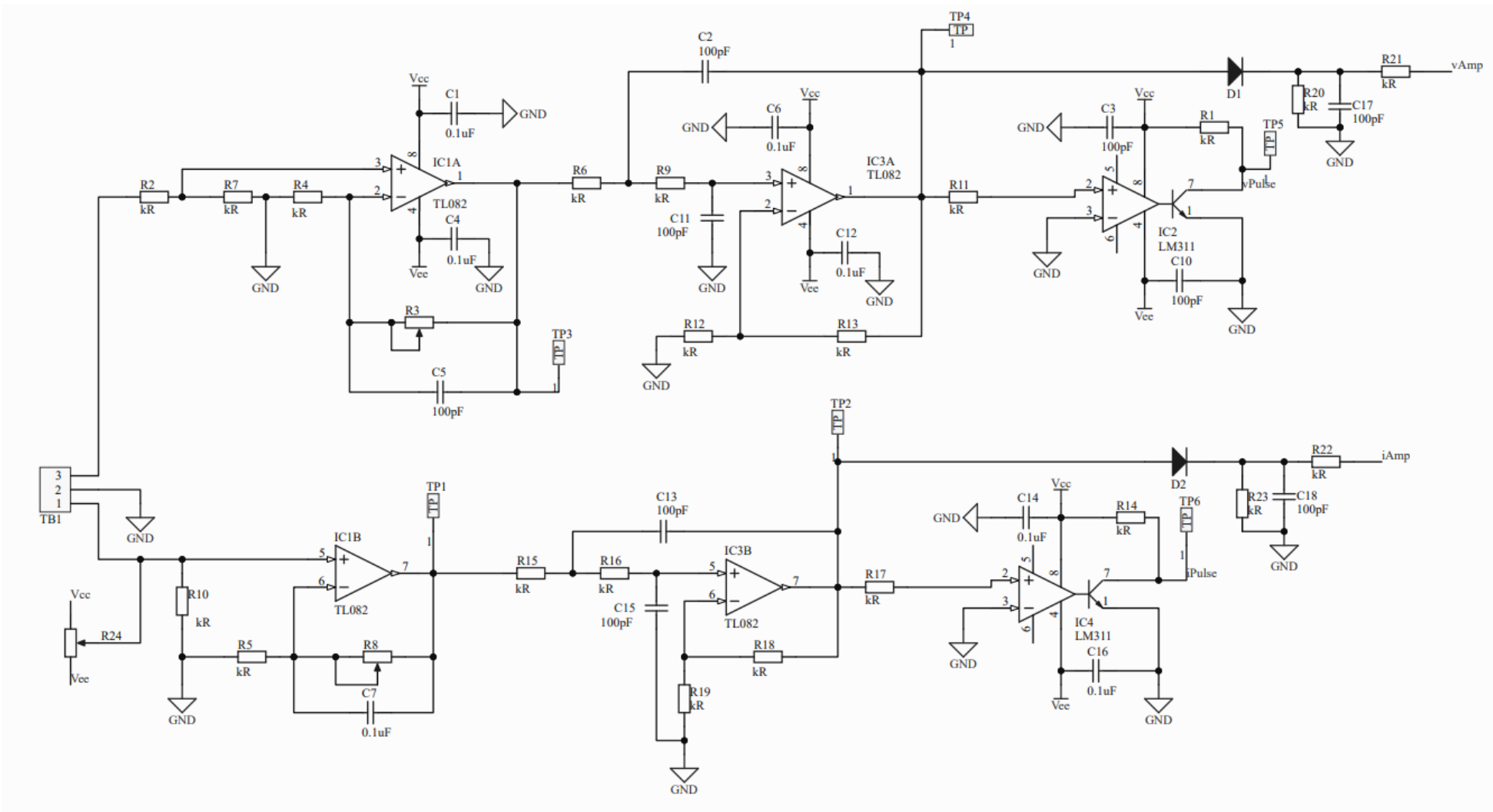


Hình 5.5. Mạch điều khiển và tạo rung động siêu âm

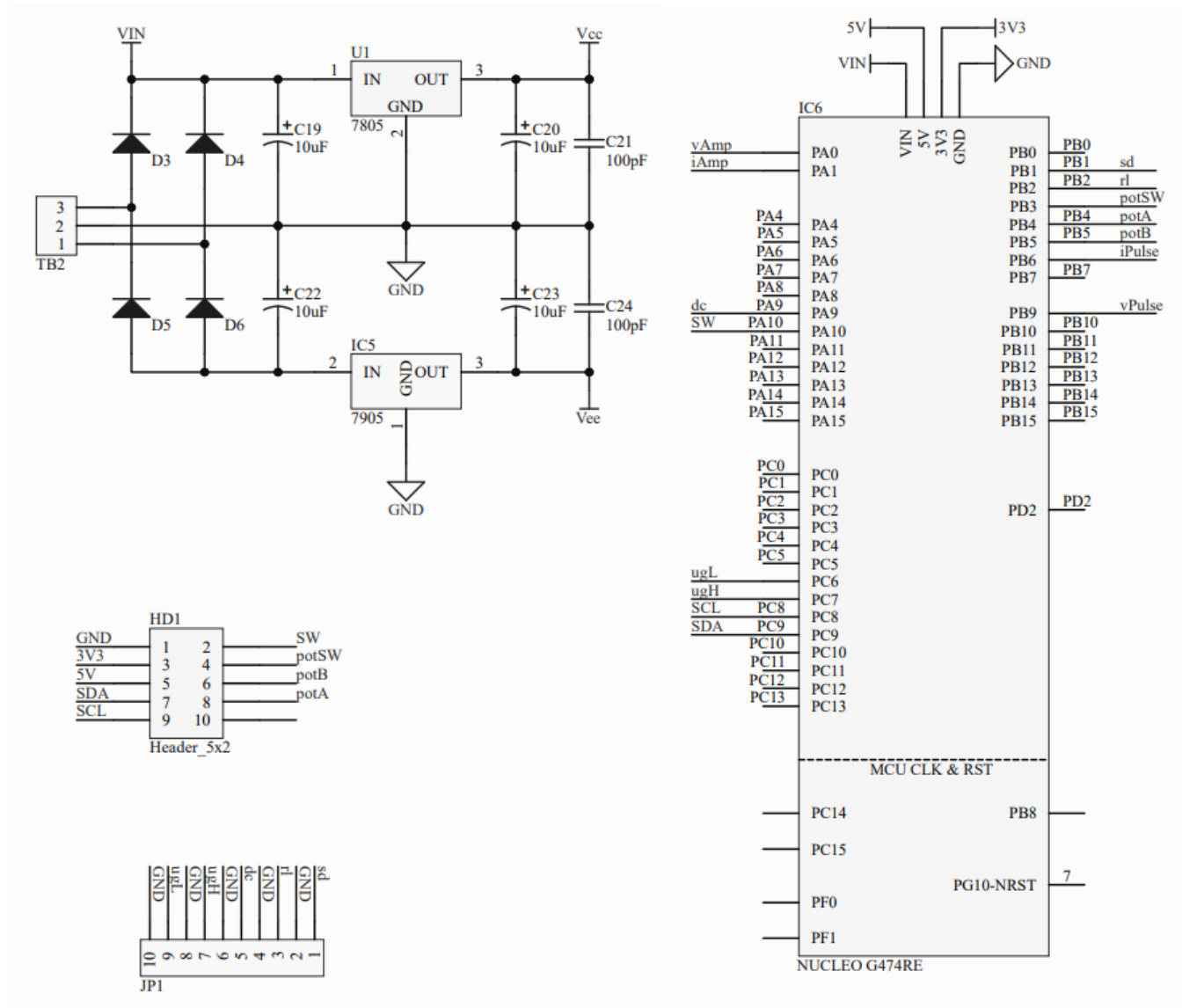
Mạch điều khiển và tạo rung động siêu âm có nhiệm vụ tạo ra xung điều khiển cho các khóa bán dẫn S_2, S_3 của mạch nghịch lưu. Tần số xung được tự động điều chỉnh sao cho đầu rung siêu âm luôn hoạt động ở chế độ cộng hưởng. Đồng thời, mạch cũng tạo ra xung điều khiển cho khóa S_1 của mạch buck DC-DC nhằm duy trì công suất siêu âm ở giá trị đặt trước.

Thành phần chính của mạch điều khiển và tạo rung động siêu âm là vi điều khiển STM32 G474RE. Các xung đầu ra điều khiển cho S_1, S_2 được tạo ra từ ngoại vi PWM 32-bit của vi điều khiển, cho phép điều chỉnh tần số dao động với độ phân giải cao.

Các tín hiệu dòng điện i_U , điện áp v_U trên đầu rung siêu âm được đưa qua các mạch chuẩn hóa và lọc tín hiệu CH1, CH2 để khuếch đại và loại bỏ nhiễu trước khi đưa vào vi điều khiển. Tín hiệu sau chuẩn hóa được chuyển thành tín hiệu số nhờ bộ ADC của vi điều khiển. Thông tin về biên độ của dòng điện, điện áp trên đầu rung siêu âm được xác định từ các tín hiệu ADC này. Đồng thời, các tín hiệu sau chuẩn hóa cũng được đưa qua mạch so 0 “zero-crossing” chuyển thành tín hiệu xung và đưa về vi điều khiển, xác định góc lệch pha giữa dòng điện và điện áp của đầu rung siêu âm.



Hình 5.6. Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển

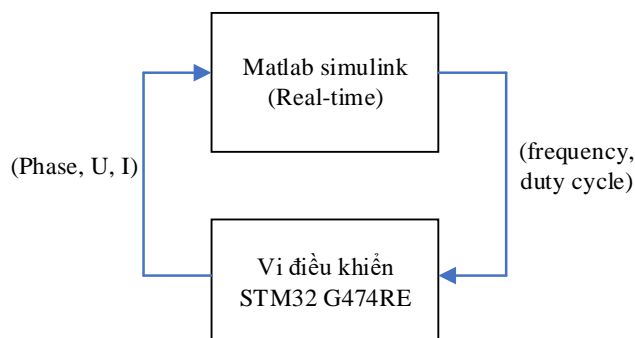


Hình 5.7. Sơ đồ nguyên lý mạch tạo rung động siêu âm.

- **Sơ đồ mô tả quan hệ giữa các thành phần của hệ thống mạch điều khiển:**

+) Vi điều khiển có nhiệm vụ đo đạc các thông số và gửi về bộ điều khiển trên simulink gồm 3 trường dữ liệu theo thứ tự: (1) góc pha, (2) biên độ điện áp, (3) biên độ dòng điện.

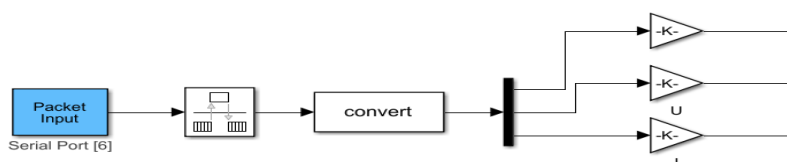
Đồng thời nhận lệnh từ Simulink, bao gồm 2 trường dữ liệu: (1) giá trị tần số cho bộ phát xung và (2) giá trị hệ số bề rộng xung (duty cycle) của bộ DC-DC.



Hình 5.8. Sơ đồ quan hệ giữa các phần của hệ thống mạch điều khiển

- **Các khối trên Simulink:**

- Phần nhận tín hiệu đo: tín hiệu nhận được từ cổng serial của STM32, là một vector gồm 3 tín hiệu kiểu int (16bit), sau đó được tách và quy đổi thành 3 tín hiệu ở đầu ra: góc pha (đơn vị degree), biên độ điện áp (V), biên độ dòng điện (V).



Hình 5.9. Sơ đồ khối tín hiệu đo

- Khối gửi tín hiệu lệnh xuống cho vi điều khiển:

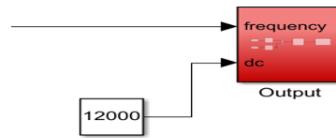
+) Tín hiệu thứ nhất: giá trị tần số cho bộ phát xung siêu âm, thực chất là giá trị của counter trong khâu high-resolution pwm của STM32, độ rộng xung luôn được duy trì là 50%. Khâu này đã được setup với tỉ lệ giữa tần số phát ra với giá trị của counter:

$$\text{Tần số phát ra} = \text{giá trị counter.}$$

Ví dụ: muốn xung phát ra với tần số là 40kHz, thì giá trị đặt cho tín hiệu này sẽ là: 40000.

Chú ý: tín hiệu được giới hạn trong khoảng tần số: 38kHz – 42kHz.

+) Tín hiệu thứ hai: giá trị độ rộng xung đưa tới bộ biến đổi DC-DC để điều chỉnh điện áp của mạch phát xung. Tín hiệu này có giá trị từ 0 – 14000, tương ứng với độ rộng xung phát ra từ 0% đến 100%.



Hình 5.10. Khối gửi tín hiệu lệnh

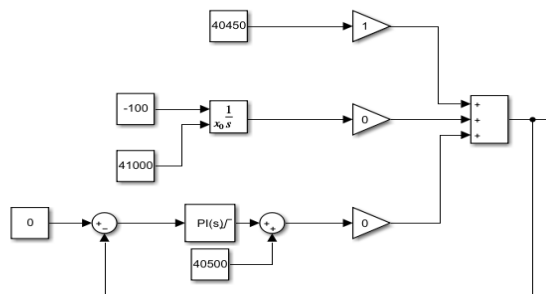
- Dựa trên các tín hiệu I/O này, có thể thiết lập các bộ điều khiển hoặc chức năng bằng cách sử dụng các khối của simulink.

Dưới đây là ví dụ về các khối đang được test, khi muốn active khối nào thì ta cho giá trị gain của khối tương ứng bằng 1, và gain của các khối khác bằng 0.

Ví dụ Hình 5.11: khối trên cùng là khi muốn chủ động đặt một tần số cố định cho xung phát ra.

Khối dưới cùng là một bộ điều khiển PI, nhận góc pha đo về và điều chỉnh giá trị tần số xung phát ra để sao cho góc pha đạt giá trị mong muốn.

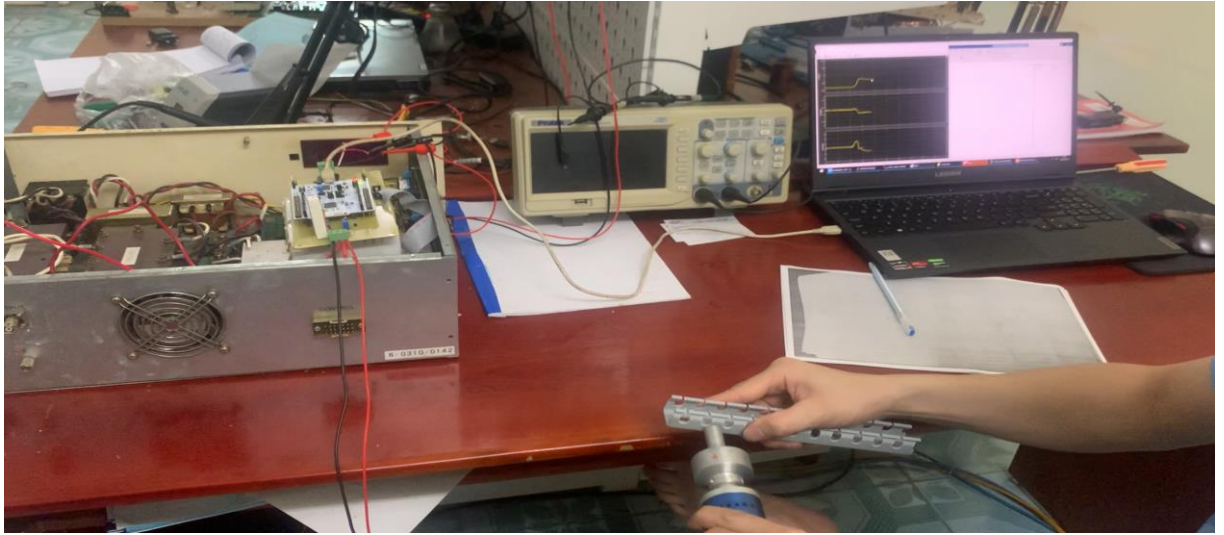
Khối ở giữa là để quét trong một dải tần số.



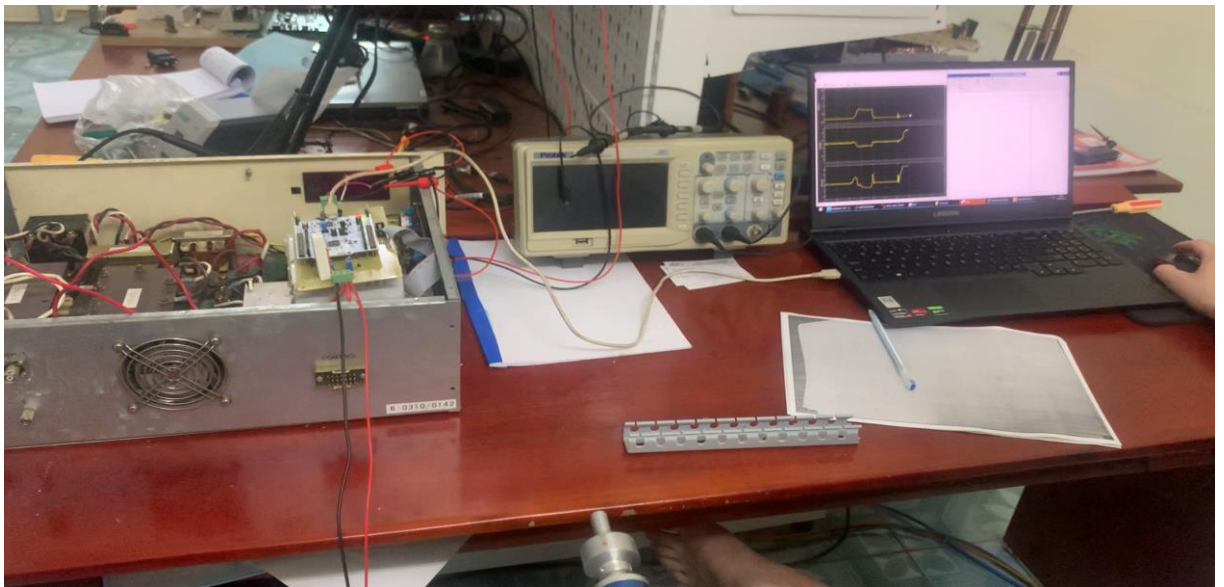
Hình 5.11. Ví dụ

5.4. Đánh giá kết quả

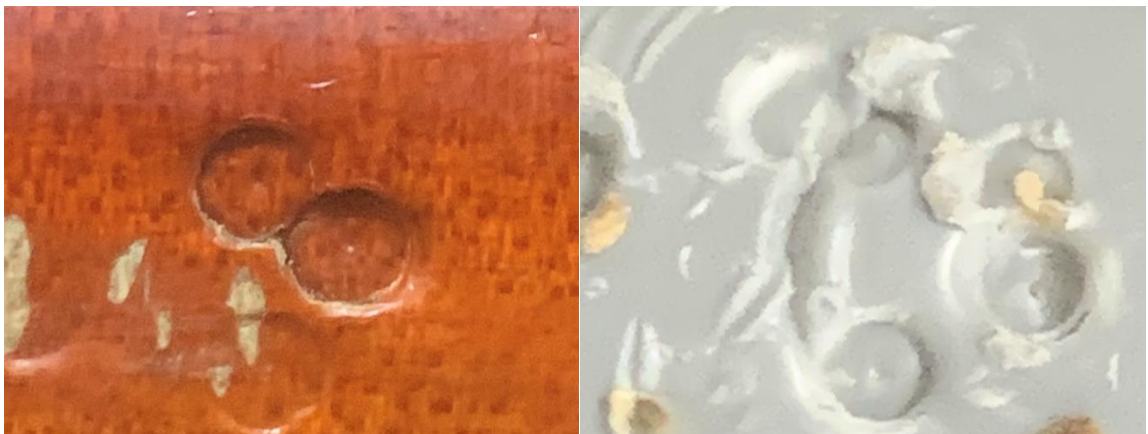
Để đánh giá mô hình thiết kế, đề tài đã xây dựng mạch điều khiển thực (Hình 5.12) từ sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển (Hình 5.6) và sơ đồ nguyên lý mạch tạo rung động siêu âm (Hình 5.7); kết nối các thiết bị theo mô hình cải tiến (Hình 5.4, Hình 5.5 và Hình 5.8) và tiến hành lập trình điều khiển cho vi điều khiển STM32G474RE; thiết lập mô hình mô phỏng trên Matlab simulink tạo thành vòng điều khiển kín (Hình 5.8).



Hình 5.12. Thử nghiệm phát sung siêu âm với nhựa ở công suất đặt 2000W



Hình 5.13. Thử nghiệm phát sung siêu âm với gỗ ở công suất đặt 2500W



(a)

(b)

Hình 5.14. Vết tạo ra trên gỗ (a) và trên nhựa (b) ở công suất đặt 2500W và 2000W

Để tiến hành thử nghiệm khả năng tự tìm tần số cộng hưởng của hệ thống với các vật liệu khác nhau khi đặt các giá trị công suất nguồn siêu âm trước, đề tài đã thử nghiệm với công suất đặt trước 2500W cho gỗ và công suất đặt trước 2000W cho nhựa như ở Hình 5.13 và Hình 5.14. Hình ảnh vết của đầu siêu âm trên vật liệu gỗ và vật liệu nhựa với công suất đặt khác nhau như Hình 5.14 a, b. cho thấy, hệ thống có khả năng tự tìm tần số cộng hưởng cho đầu rung siêu âm và hoạt động tốt trong dải tần thiết kế (20Hz đến 40Hz).

5.5. Kết luận

Để mở rộng phạm vi ứng dụng của nguồn siêu âm phục vụ cho nhiều mục đích khác nhau; khắc phục nhược điểm của các máy tạo tín hiệu trên thị trường chỉ làm việc với công suất và dải tần nhất định, đề tài đã tập trung nghiên cứu thiết kế cải tiến mạch công suất siêu âm của bộ nguồn siêu âm có sẵn Ultrasonic Welder USG 634 (là một trong các mạch công suất siêu âm phổ biến) ghép nối với bộ điều khiển để tạo ra tín hiệu rung động siêu âm đa dải tần. Kết quả nhận được của đề tài:

- Đã cải tiến bộ nguồn siêu âm Ultrasonic Welder USG 634 cho phép có thể điều khiển được dải tần số tạo ra với tần số từ 20KHz đến 40KHz. Từ kết quả nghiên cứu này có thể áp dụng nguyên lý tương tự thiết kế cho các mạch công suất của bộ nguồn siêu âm khác ứng dụng cho các đối tượng nghiên cứu khác trong tương lai.
- Mạch công suất siêu âm được thiết kế đáp ứng được mục tiêu đặt ra là 1) Duy trì công suất của nguồn siêu âm ở giá trị đặt trước và 2). Đầu rung siêu âm luôn làm việc ở tần số cộng hưởng.
- Đã thiết kế các mạch nguyên lý điều khiển, mạch nguyên lý tạo rung siêu âm cải tiến mạch công suất của nguồn siêu âm có sẵn và đã xây dựng các mạch thực; kết nối hệ thống, lập trình điều khiển cho vi điều khiển STM32474RE và thiết lập mô hình điều khiển Matlab Simulink. Đã tiến hành thử nghiệm với vật liệu gỗ và nhựa ở công suất đặt khác nhau để kiểm thử khả năng tự điều chỉnh tần số làm việc của đầu rung siêu âm sao cho đầu rung siêu âm luôn làm việc ở tần số cộng hưởng

KẾT LUẬN

Các kết quả chính đạt được

(1) Đã phát triển được mô hình toán cho phổ đáp ứng trở kháng phức của đầu rung siêu âm có cấu hình bất kỳ với tải đặt tại mặt công tác của đầu rung; chương trình Matlab cho phép phân tích đặc tính điện (trở kháng phức và pha) của đầu rung, làm công cụ để tính toán, thiết kế và đánh giá đầu rung về mặt điện.

(2) Đã phát triển được giải thuật và chương trình Matlab hồi quy dựa trên thuật toán HDS, cho phép xác định bộ thông số phức của các tấm, vòng gồm áp điện thương mại dựa trên dữ liệu đo trở kháng và pha của chúng nhờ các máy phân tích trở kháng phức chuyên dụng. Đây là công cụ đặc biệt có ý nghĩa khi thiết kế đầu rung với các tấm, vòng gồm áp điện thương mại.

(3) Đã xây dựng được mô hình phần tử hữu hạn cho đầu rung siêu âm trên phần mềm ABAQUS để phân tích, mô phỏng ứng xử động lực học của đầu rung.

(4) Đã xây dựng được mô hình thí nghiệm xác định một số thông số đặc trưng cho đáp ứng động học, động lực học đầu rung siêu âm. Hệ thống cho phép đo biên độ rung động tại mặt công tác của đầu rung siêu âm ở các tần số khác nhau và điện áp kích thích khác nhau. Đây là công cụ quan trọng nhằm đánh giá độ tin cậy của các mô hình toán, mô hình phần tử hữu hạn cũng như đánh giá, kiểm chứng thiết kế.

(5) Đã xây dựng được mô hình thí nghiệm xác định thủ công một số thông số điện của đầu rung siêu âm, gồm tần số và trở kháng cộng hưởng; đã khai thác thành công thiết bị đo, phân tích trở kháng phức chuyên dụng Keysight E5061B, cho phép lập bộ dữ liệu đầy đủ về các thông số điện của tấm, vòng. Bộ dữ liệu từ các thiết bị chuyên dụng này có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế đầu rung và bộ nguồn siêu âm, đồng thời còn là công cụ quan trọng nhằm đánh giá độ tin cậy của các mô hình toán cũng như đánh giá, kiểm chứng thiết kế.

(6) Đã thiết kế và lắp được mạch điều khiển dao động siêu âm đa dải, ghép nối với mạch công suất siêu âm của bộ nguồn siêu âm có sẵn (USG 634) để nâng cấp bộ nguồn hàn siêu âm có thể chỉnh định hoạt động trên một số dải tần khác nhau (từ 20KHz đến 40KHz).

(7) Đã thiết kế và chế tạo được một mẫu đầu rung siêu âm thử nghiệm trong ứng dụng hàn nhựa, tần số làm việc 20KHz, công suất 2000W.

Một số hạn chế và hướng phát triển

➤ Về nội dung mô hình hóa

- *Đối với mô hình giải tích:* Trong nghiên cứu này sử dụng phân tích mạch tương đương, tuy nhiên mô hình không tách biệt các vòng gồm áp điện, coi dãy PZT như một tấm đơn nhất. Với mô hình này, mạch tương đương đơn giản giúp giảm khối lượng tính toán. Tuy nhiên, điểm hạn chế là mô hình không có khả năng phân tích trở kháng trên từng tấm, cũng như không cho phép tính toán lực (cũng như ứng suất trên mỗi tấm). Ngoài ra, đối với vật liệu áp điện có sự tổn thất năng lượng khi có sự thay đổi cấu hình cũng như điều kiện làm việc dẫn đến sinh nhiệt hoặc phá hủy chưa được thể hiện rõ ràng. Đây là 1 hướng nghiên cứu tiềm năng, đó là phát triển mô hình dãy tấm PZT với nhiều lớp khác nhau, cho phép tính toán, phân tích trực tiếp các cơ chế lão hóa, tổn thất năng lượng cụ thể trên từng lớp vật liệu PZT đã qua sử dụng. Bên cạnh đó việc khảo sát, đánh giá năng lượng điện tiêu thụ của hệ thống cũng là hướng nghiên cứu hứa hẹn sẽ có nhiều công bố khoa học mới.

- *Đối với mô hình phần tử hữu hạn:* Trong nghiên cứu này phương pháp phần tử hữu hạn đã được ứng dụng để phân tích động học của thiết bị rung siêu âm hoàn chỉnh. Tuy nhiên mô hình phần tử hữu hạn sử dụng phần tử 3D có chi phí (thời gian) tính toán rất lớn, đồng thời vẫn còn tồn tại một số hạn chế như mô hình hóa để tính toán mô phỏng được sự tổn thất năng lượng do nhiệt của thiết bị ở trạng làm việc. Ngoài ra, mô hình phần tử hữu hạn chưa thực hiện được với hiện tượng mỏi và phá hủy của bu lông lực và vòng PZT vì lý do chưa có đủ thiết bị để tiến hành các thí nghiệm xác định các thông số mỏi cho vật liệu PZT sử dụng trong nghiên cứu. Do đó, trong nghiên cứu tiếp theo, nhóm sẽ tiếp tục phát triển mô hình sử dụng phần tử 2D, hoàn thiện phương án chia lưới với phần tử 3D để tăng hiệu suất tính toán, giải quyết tốt mô hình điều kiện biên, mô hình tải trọng để phân tích đầy đủ ứng xử động lực học, phá hủy và bài toán nhiệt trong kết cấu đầu rung.

➤ Về thiết bị

Bộ nguồn đa dải tần, điều khiển thích và đầu rung được thiết kế và chế tạo chưa mang tính đồng bộ, chuẩn hóa để tiến tới thiết kế chuẩn có tính thương mại hóa. Do khuôn khổ của đề tài cũng như mục đích đặt ra ban đầu là chế tạo được thiết bị đơn chiếc phục vụ thí nghiệm nên thiết kế chủ yếu dựa trên việc tích hợp các linh kiện, modul và thiết bị tiêu chuẩn có thể đặt mua trên thị trường. Do đó, đây cũng là một nội dung sẽ được nhóm tiếp tục phát triển từng bước trong giai đoạn tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Việt Hoa và Vũ Hồng Tuấn, “Vai trò của siêu âm trước sinh trong quản lý bệnh tắc tá tràng bẩm sinh tại Bệnh viện Việt Đức giai đoạn 2010 - 2015,” *Tạp chí Y học Việt Nam*, vol. 465, no. 2, pp. 95–98, 2018, [Online]. Available: <http://42.112.40.170/pages/opac/wpid-detailbib-id-799588.html>.
- [2] L. T. Dũng, N. D. Tâm, and T. V. Chương, “NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP PHỤC HỒI BIẾN TỬ ÁP ĐIỆN TRONG ĐẦU DÒ CỦA MÁY ĐO SÂU , DÒ CÁ,” *Tạp chí Khoa học - Công nghệ thủy sản*, vol. 2016, no. 1, pp. 26–31, 2016.
- [3] N. T. Hieu, “Khảo sát hệ số biến động vận tốc xung siêu âm áp dụng trong đánh giá độ đồng nhất của bê tông,” *Tạp chí Giao thông vận tải*, vol. 58, no. 10, pp. 45–49, 2017.
- [4] L. J. B. Dale Ensminger, *Ultrasonics Fundamentals, Technologies, and Applications, Third Edition*. 2012.
- [5] I. Romaniuc, “Development of a Magnetostrictive Vibromotor 3 Vibromotor Using Magnetostriction Effect,” *Adv. Prod. Autom. Transp. Syst.*, pp. 184–187, 2007.
- [6] M. N. Kumar, S. Kanmani Subbu, P. Vamsi Krishna, and A. Venugopal, “Vibration assisted conventional and advanced machining: A review,” *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1577–1586, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.441.
- [7] B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A. E. Tekkaya, R. Neugebauer, and D. McIntosh, “Hybrid processes in manufacturing,” *CIRP Ann.*, vol. 63, no. 2, pp. 561–583, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.
- [8] M. Kushan, S. Orak, and Y. Uzunonut, “Ultrasonic Assisted Machining Methods: A Review,” *Int. J. Adv. Eng. Res. Appl.*, Sep. 2017.
- [9] V. Sharma and P. Pandey, “Recent advances in ultrasonic assisted turning: A step towards sustainability,” *Cogent Eng.*, vol. 3, no. 1, Aug. 2016, doi: 10.1080/23311916.2016.1222776.
- [10] P. J. Liew, A. Shaaroni, N. A. C. Sidik, and J. Yan, “An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 114, pp. 380–394, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.077>.
- [11] and D. M. M. Moreland, “Versatile performance of ultrasonic machining. Am Ceram Soc Bull,” *Am. Ceram. Soc. Bull.*, vol. 67, no. 06/01, pp. 1045–1047, 1988.
- [12] “What is ultrasonic wave?” .
- [13] D. Moore, “Ultrasonic impact grinding,” *Proc. Non-traditional Mach. Conf.*, pp. 137–139, 1985.

- [14] L. C. L. K.H.W. Seah, Y.S. Wong, "Parametric studies of ultrasonic machining," *Soc. Manuf. Eng.*, 1990.
- [15] J. A. McGeough, *Advanced Methods of Machining*, 1st ed. Springer Netherlands, 1988.
- [16] and W. A. K. G. Boothroyd, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2nd ed. MARCEL DEKKER, INC., 1990.
- [17] K. F. Graff, "6 - Power ultrasonic transducers: principles and design," J. A. Gallego-Juárez and K. F. B. T.-P. U. Graff, Eds. Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 127–158.
- [18] C. Rosen, B. Hiremath and R. Newnham, *Piezoelectricity*, American Institute of Physics, USA, 1992
- [19] IEEE Standard on Piezoelectricity, USA, 1988.
- [20] MORGAN Advanced Ceramics Inc., *Piezoelectric Ceramics Properties and Applications*, UK,
<http://www.morgantechnicalceramics.com/resources/piezoelectric-ceramicsproperties-and-applications/>, Accessed on 8th June 2012.
- [21] B. Fu, *Piezoelectric Actuator Design via Multiobjective Optimization Methods*, PhD Thesis, University of Paderborn, Germany, 2005.
- [22] G. Zhou, Y. Zhang and B. Zhang, "The Complex-mode Vibration of Ultrasonic Vibration Systems," *Ultrasonics*, vol. 40, pp. 907-911, 2002.
- [23] A. Mitskevich, *Sources of High-intensity Ultrasound*, Edited by L. Rozenberg, Plenum Press, USA, 1969.
- [24] L. Shuyu, "Study on the Longitudinal-torsional Composite Mode Exponential Ultrasonic Horns," *Ultrasonics*, vol. 34, no. 7, pp. 757-762, 1996.
- [25] E. Eisner, "Design of Sonic Amplitude Transformers for High Magnification," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 35, no. 9, pp. 1367-1377, 1963.
- [26] B. Dubus, J. Debus, J. Decarpigny and D. Boucher, "Analysis of Mechanical Limitations of High Power Piezoelectric Transducers Using Finite Element Modelling," *Ultrasonics*, vol. 29, no. 3, pp. 201-207, 1991.
- [27] L. Merkulov, "Design of Ultrasonic Concentrations," *Soviet Physics*, vol. 3, pp. 246–255, 1957.
- [28] L. Merkulov and A. Kharitonov, "Theory and Analysis of Sectional Concentrators," *Soviet Physics*, vol. 5, pp. 183-190, 1959.
- [29] S. Sherrit, S. Leary, B. Dolgin and Y. Bar-Cohen, "Comparison of the Mason and KLM Equivalent Circuits for Piezoelectric Resonators in the Thickness Mode," *IEEE Proceedings of Ultrasonics Symposium*, vol. 2, pp. 921-926, 1999.
- [30] M. Redwood, "Experiments with the Electrical Analog of a Piezoelectric

- Transducer," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 36, no. 10, pp. 1872-1880, 1964.
- [31] E. Sittig, "Effects of Bonding and Electrode Layers on the Transmission Parameters of Piezoelectric Transducers Used in Ultrasonic Digital Delay Lines," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 16, no. 1, pp. 2-9, 1969
- [32] R. Krimholtz, D. Leedom and G. Matthaei, "New Equivalent Circuits for Elementary Piezoelectric Transducers," *Electronics Letters*, vol. 6, no. 13, pp. 398-399, 1970.
- [33] E. Neppiras, "The Pre-stressed Piezoelectric Sandwich Transducer," *Ultrasonics International Conference*, pp. 295-302, 1973.
- [34] F. Arnold, L. Bravo-Roger, M. Goncalves and M. Grilo, "A Simple Electric Circuit for Teaching One-Dimensional Characterization of Piezoelectric Plates," *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 5, no. 4, pp. 680-685, 2011.
- [35] C. Hutchens and S. Morris, "A Two-Dimensional Equivalent Circuit for the Tall Thin Piezoelectric Bar," *IEEE Proceeding of Ultrasonics Symposium*, pp. 671-676, 1985.
- [36] M. Willatzen, "Ultrasound Transducer Modeling-General Theory and Applications to Ultrasound Reciprocal Systems," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 48, no. 1, pp. 100-112, 2001.
- [37] L. Shuyu, "Sandwiched Piezoelectric Ultrasonic Transducers of Longitudinal-torsional Compound Vibrational Modes," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 44, no. 6, pp. 1189-1197, 1997.
- [38] L. Shuyu, "Study on the Longitudinal-Torsional Compound Transducer with Slanting Slots," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 3, pp. 1643-1650, 1999.
- [39] J. Kocbach, *Finite Element Modeling of Ultrasonic Piezoelectric Transducers*, PhD Thesis, University of Bergen, Norway, 2000.
- [40] H. Allik, K. Webman and J. Hunt, "Vibrational Response of Sonar Transducers Using Piezoelectric Finite Elements," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 56, pp. 1782- 1791, 1974.
- [41] D. Ostergaard and T. Pawlak, "Three-dimensional Finite Elements for Analyzing Piezoelectric Structures," *Ultrasonics Symposium Proceeding*, pp. 639-642, 1986.
- [42] A. Nagoor Kani, *CIRCUIT THEORY*, Published by McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- [43] Berlincourt, D. A., Curran, D. R., and Jaffe, H.: 'Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers', in MASON, w. p. (Ed.): 'Physical acoustics—Vol. 1', (Academic Press, 1964).

- [44] Gordon E. Martin, On the Theory of Segmented Electromechanical Systems, The Journal of the acoustical Society of America, Vol.36, Number 7, July 1946.
- [45] M. Castillo, P. Acevedo and E. Moreno, "KLM Model for Lossy Piezoelectric Transducers," *Ultrasonics*, vol. 41, no. 8, pp. 671-679, 2003.
- [46] R. Holland, "Representation of Dielectric, Elastic, and Piezoelectric Losses by Complex Coefficients," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. SU-14, no. 1, pp. 18-20, 1967
- [47] L. Shuyu and Z. Fucheng, "Study of Vibrational Characteristics for Piezoelectric Sandwich Ultrasonic Transducers," *Ultrasonics*, vol. 32, no. 1, pp. 39-42, 1994.
- [48] T. Royston and B. Houston, "Modeling and Measurement of Nonlinear Dynamic Behavior in Piezoelectric Ceramics with Application to 1-3 Composites," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 5, pp. 2814-2827, 1998.
- [49] L. Shuyu, "Load Characteristics of High Power Sandwich Piezoelectric Ultrasonic Transducers," *Ultrasonics*, vol. 43, no. 5, pp. 365-373, 2005.
- [50] K. W. Kwok, H. Lai, W. Chan, and C. L. Choy. (1997). "Evaluation of the material parameters of piezoelectric materials by various methods," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 44, no. 4, pp. 733-742, doi: 10.1109/58.655188.
- [51] N. Abboud, G. Wojcik, D. Vaughan, J. Mould, D. Powell and L. Nikodym, "Finite Element Modeling for Ultrasonic Transducers," *Proceedings of the SPIE International Symposium on Medical Imaging*, vol. 3341, pp. 19-42, 1998.
- [52] B. Liu, *Transducers for Sound and Vibration- The Finite Element Method Based Design*, PhD Thesis, University of Denmark, Denmark, 2001.
- [53] A. Mathieson, *Nonlinear Characterisation of Power Ultrasonic Devices Used in Bone Surgery*, PhD Thesis, University of Glasgow, UK, 2012.
- [54] H. Hocheng and K. Kuo, "On-line Tool Wear Monitoring During Ultrasonic Machining Using Tool Resonance Frequency," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, no. 1, pp. 80-84, 2002.
- [55] L. STĂNĂȘEL and F. ARDELEAN, "The Parametric Design of the Ultrasonic Exponential Horns," *Nonconventional Technologies Review*, no. 4, pp. 54-58, 2010.
- [56] CeramTec GmbH, *Advanced Ceramics in Piezo Applications*, Germany, 2011.
- [57] A. Abdullah, M. Shahini and A. Pak, "An Approach to Design a High Power Piezoelectric Ultrasonic Transducer," *Journal of Electroceramics*, vol. 22, no. 4, pp. 369-382, 2009.
- [58] M. Radmanović and D. Mančić, *Design and Modelling of the Power Ultrasonic Transducers*, Faculty of Electronics in Niš, Serbia, 2004.
- [59] H. Al-Budairi, M. Lucas, and P. Harkness, A design approach for longitudinal-torsional ultrasonic transducers, *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 198, 2013, pp. 99-106

- [60] M. Baraya, Mohamed Y.; Hossam, Design of an electromechanical system for measuring and monitoring micro-ultrasonic amplitude of Langevin transducer, *International J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020
- [61] V. D. Luong, A. S. Bonnin, F. Abbès, J. B. Nolot, D. Erre, and B. Abbès, Finite Element and Experimental Investigation on the Effect of Repetitive Shock in Corrugated Cardboard Packaging, *J. Appl. Comput. Mech.*, vol. 7, no. 2, 2021, pp. 820–830
- [62] X. Chen, Y. Yin, Q. Hou, L. Jin, and X. Li, The simulation and structural optimization of ultrasonic transducer, *2010 2nd Int. Conf. Ind. Inf. Syst. IIS 2010*, vol. 1, pp. 330–333, 2010
- [63] I. Jovanović, D. Mančić, U. Jovanović, and M. Prokić, A 3D model of new composite ultrasonic transducer, *J. Comput. Electron.*, vol. 16, no. 3, 2017, pp. 977–986
- [64] Q. Xu, A. Gao, Y. Li, and Y. Jin, Design and Optimization of Piezoelectric Cantilever Beam Vibration Energy Harvester, *Micromachines*, vol. 13, no. 5, 2022
- [65] M. Liu, Finite Element Analysis of the Contact Deformation of Piezoelectric Materials, *Theses and Dissertations--Chemical and Materials Engineering*. 2012.
- [66] A. Abdullah and A. Pak, Correct prediction of the vibration behavior of a high power ultrasonic transducer by FEM simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 1–2, 2008, pp. 21–28
- [67] J. T. Zhao, L. P. Ning, Z. M. Jiang, and Y. L. Li, Design and finite element analysis of longitudinal vibrating stepped ultrasonic horn, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2029, no. 1. 2021
- [68] A. Abdullah, M. Shahini, and A. Pak, An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer, *J. Electroceramics*, vol. 22, no. 4, 2009, pp. 369–382
- [69] D. Hanson, T. P. Waters, D. J. Thompson, R. B. Randall, and R. A. J. Ford, The role of anti-resonance frequencies from operational modal analysis in finite element model updating, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 1, 2007, pp. 74–97
- [70] X. Chen, Y. Yin, Q. Hou, L. Jin, and X. Li, The simulation and structural optimization of ultrasonic transducer, *2010 2nd Int. Conf. Ind. Inf. Syst. IIS 2010*, vol. 1, pp. 330–333, 2010
- [71] Wang, J., Liu, D., Li, W., Wei, P., & Tang, L. (2019). Effects of electrodes and electrical connections of piezoelectric layers on dynamic characteristics of radially polarized multilayer piezoelectric cylindrical transducers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 30(1), 63-81

- [72] Lerch, R. (1990). Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 37(3), 233–247. doi:10.1109/58.55314
- [73] K. J. Bathe, “Finite Element Procedures,” Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996.
- [74] L. Cremer, M. Heckl, B.A.T. Petersson., *Structure-Borne Sound*. Springer-Verlag, New York, 2005.
- [75] D. Berlincourt, H.H.A. Krueger, and C. Near: Properties of Morgan Electroceramics, Technical publication TP-226, Properties of Electroceramics
- [76] Abaqus Analysis User's Guide (6.14)
- [77] J.van Randerrat and R. E. Settrington, Piezoelectric ceramics. Applications book, *Philips Application Book*. (1974), p. 202.
- [78] M. V. Guiman and I. C. Roca, “A New Approach on Vibrating Horns Design,” *Shock and Vibration*, vol. 2017. 2017, doi: 10.1155/2017/8532021.
- [79] M. Hahn, Y. Cho, G. Jang, and B. Kim, Optimal design and experimental verification of ultrasonic cutting horn for ceramic composite material, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4, (2001), pp. 1–13.
- [80] S. Sherrit, B. P. Dolgin, Y. Bar-Cohen, D. Pal, J. Kroh, and T. Peterson, Modeling of horns for sonic/ultrasonic applications, in *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, vol. 1, (1999), pp. 647–651.
- [81] W. L. Cong, Z. J. Pei, N. Mohanty, E. Van Vleet, and C. Treadwell, "Vibration Amplitude in Rotary Ultrasonic Machining: A Novel Measurement Method and Effects of Process Variables," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 133, p. 034501, 2011.
- [82] J. Kováčik and Š. Emmer, "Steels as Materials for Sonotrode Tools," *Key Engineering Materials*, vol. 601, pp. 21-24, 2014.
- [83] S. Sherrit, S. P. Leary, B. P. Dolgin, and Y. Bar-Cohen, “Comparison of the Mason and KLM equivalent circuits for piezoelectric resonators in the thickness mode,” *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, vol. 2, no. July, pp. 921–926, 1999, doi: 10.1109/ultsym.1999.849139.
- [84] E. D. D. ROYER, *Elastic Waves in Solids II: Generation, Acousto-optic Interaction, Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [85] P. Maréchal, F. Levassort, L. P. Tran-Huu-Hue, and M. Lethiecq, “Lens-focused transducer modeling using an extended KLM model,” *Ultrasonics*, vol. 46, no. 2, pp. 155–167, 2007, doi: 10.1016/j.ultras.2007.01.006.
- [86] A. R. C. Hernandez, Y. Bernard, “Validation du modèle d’un transducteur de Langevin piézoélectrique par schéma électrique équivalent,” *5ème Colloq. sur les Matériaux en Génie Electr. « MGE 2010 »*, vol. 08/01, pp. 1–6, 2010.
- [87] N. Pérez, F. Buiochi, M. A. B. Andrade, and J. C. Adamowski, “Numerical

- characterization of piezoceramics using resonance curves,” *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 2, 2016, doi: 10.3390/ma9020071.
- [88] A. A. Vives, *Piezoelectric Transducers and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [89] C. G. Hutchens and S. A. Morris, “A Two-Dimensional Equivalent Circuit for the Tall Thin Piezoelectric Bar,” in *IEEE 1985 Ultrasonics Symposium*, 1985, pp. 671–676, doi: 10.1109/ULTSYM.1985.198595.
- [90] S. Lin, “Radiation impedance and equivalent circuit for piezoelectric ultrasonic composite transducers of vibrational mode-conversion,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 1, pp. 139–149, 2012, doi: 10.1109/TUFFC.2012.2165.
- [91] F. Sammoura and S. G. Kim, “Theoretical modeling and equivalent electric circuit of a bimorph piezoelectric micromachined ultrasonic transducer,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 5, pp. 990–998, 2012, doi: 10.1109/TUFFC.2012.2284.
- [92] D. P. Singh, S. Mishra, and R. K. Porwal, “Modal analysis of ultrasonic horn using finite element method,” *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 3617–3623, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.293.
- [93] M. V. Guiman and I. C. Roca, “A New Approach on Vibrating Horns Design,” *Shock Vib.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/8532021.
- [94] <https://techblog.ctgclean.com/2012/01/ultrasonics-ultrasonic-generators-introduction/>