

# NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG BỘ CHUYỂN ĐỔI SIÊU ÂM

## A STUDY OF DESIGNING AND SIMULATING AN ULTRA SONIC TRANSDUCER

Hồ Thị Mỹ Nữ, Lương Quốc Việt, Nguyễn Tấn Ken, Đinh Lê Cao Kỳ, Lê Thế Truyền\*

Trường Đại học Công thương Thành phố Hồ Chí Minh, Hồ Chí Minh, Việt Nam<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: truyenlt@hufi.edu.vn

(Nhận bài / Received: 02/9/2023; Sửa bài / Revised: 27/10/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 20/11/2023)

**Tóm tắt** - Để tạo ra sóng dao động dọc và xoắn hỗn hợp, bộ chuyển đổi rung động siêu âm được thiết kế bằng cách điều chỉnh khối lượng của khối phía trước của bộ chuyển đổi Langevin truyền thống nhờ tạo các rãnh xoắn. Bài báo trình bày một thiết kế cho bộ chuyển đổi siêu âm có khối phía trước sở hữu biên dạng hàm mũ để làm tiền đề cho việc thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm mà nó thể tạo ra dao động dọc và xoắn. Một qui trình thiết kế cho bộ chuyển đổi siêu âm này được đề xuất. Sau đó, một mô hình phân tử hữu hạn được xây dựng bằng phần mềm ABAQUS để kiểm nghiệm đáp ứng động học của bộ chuyển đổi. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ chuyển đổi siêu âm được thiết kế theo qui trình đã đề xuất đáp ứng được các thông số thiết kế yêu cầu. Có thể kết luận rằng qui trình thiết kế được đề xuất là tin cậy cao và có thể được sử dụng để thiết kế các bộ chuyển đổi siêu âm tương tự.

**Từ khóa** - Hàn siêu âm; rung động; phương pháp phần tử hữu hạn; ABAQUS; đầu rung động siêu âm

### 1. Giới thiệu

Ngày nay, siêu âm công suất cao được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực công nghiệp khác nhau, từ các thiết bị y tế như các đầu siêu âm dùng trong nha khoa, siêu âm làm sạch, đến các ứng dụng công nghệ như hàn siêu âm và gia công bằng siêu âm [1], [2]. Kể từ khi Giáo sư Langevin phát triển bộ chuyển đổi rung động siêu âm đầu tiên bằng cách nhúng các vòng sứ áp điện vào giữa hai khối kim loại và sử dụng nó ở cường độ rung động cao, đã có những nỗ lực lớn trong việc mô hình hóa và xây dựng các bộ chuyển đổi dao động tương tự [3], [4], [5]. Trong các nghiên cứu đã nêu ở trên, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là một trong những công cụ đáng tin cậy để phân tích và đánh giá đáp ứng của bộ chuyển đổi siêu âm [6], [7], [8].

Sự ảnh hưởng của các thông số mô hình khác nhau đến đáp ứng của bộ chuyển đổi rung động siêu âm cũng đã được nhiều tác giả nghiên cứu. Li [9] nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dài, đường kính và vị trí của bu lông dự ứng lực dùng để kết nối các thành phần khác nhau của bộ chuyển đổi đến tần số cộng hưởng của bộ chuyển đổi. Xie và He [10] đã nghiên cứu lực tác động của bulông lên các thông số hoạt động của bộ chuyển đổi như tần số cộng hưởng và biên độ dao động; ngoài ra họ cũng tìm ra phương trình tần số của bộ chuyển đổi thông qua lý thuyết mạch tương đương và điều chỉnh các thông số này để đạt được tần số cộng hưởng mong muốn. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu trước đây, hầu hết bộ chuyển đổi siêu âm đều dựa trên hệ thống dao động sóng dọc, thiết kế tích hợp của sóng dọc-xoắn còn ít và phương pháp tính toán và thiết kế phức tạp hơn. Gần đây, các nhà nghiên

**Abstract** - In order to produce mixed longitudinal and torsional oscillation waves, a conventional Langevin transducer is modified at the front block's mass using perforations to generate ultrasonic vibration transducers. As a foundation for the development of an ultrasonic transducer capable of producing both longitudinal and torsional vibrations, this article describes the construction of an ultrasonic transducer featuring an exponential profile on the front block. Proposed is a design procedure for this ultrasonic transducer. Subsequently, an ABAQUS finite element model was constructed in order to evaluate the converter's dynamic response. As demonstrated by the simulation outcomes, the ultrasonic transducer that was developed utilizing the suggested methodology satisfies the initial design parameters. This demonstrates the high dependability of the proposed design method and its applicability to the development of comparable ultrasonic transducers.

**Key words** - Ultrasonic welding; vibration; finite element model; ABAQUS; ultrasonic horn

cứ đã đề xuất nhiều phương pháp khác nhau để thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm có dao động dọc và xoắn kết hợp. Với sự phát triển của các vòng gốm áp điện có thể tạo ra dao động xoắn, bộ chuyển đổi siêu âm có chế độ dọc - xoắn hỗn hợp đã được phát triển [11]. Trong các bộ chuyển đổi chế độ hỗn hợp xoắn-dọc này, vì tốc độ âm thanh của dao động dọc và dao động xoắn là khác nhau nên dao động dọc và dao động xoắn không thể cộng hưởng ở cùng tần số. Điều này dẫn đến những khó khăn trong việc kích thích các vòng áp điện để bộ chuyển đổi có chế độ dao động dọc - xoắn hỗn hợp. Tức là, để đạt được các dao động dọc và xoắn thì hai bộ máy phát điện siêu âm, một bộ tạo dao động xoắn và một bộ tạo dao động dọc, là cần thiết. Một bộ chuyển đổi siêu âm có thể tạo ra dao động dọc và xoắn tại bề mặt làm việc của bộ chuyển đổi siêu âm có thiết kế đơn giản hơn được đề xuất bởi Hassan Al-Budairi và các cộng sự [12]. Để tạo ra dao động dọc và xoắn tại bề mặt làm việc thì bộ chuyển đổi siêu âm truyền thống được xẻ các rãnh xoắn tại khối phía trước của bộ chuyển đổi. Nhờ các rãnh này mà dao động dọc trục của các vòng gốm áp điện của bộ siêu âm truyền thống được chuyển thành dao động dọc và xoắn tại bề mặt làm việc của bộ chuyển đổi.

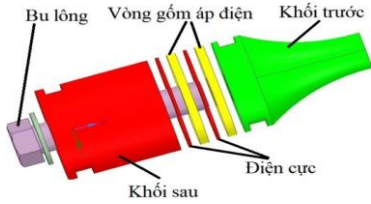
Hai giai đoạn cần thực hiện để thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm có thể tạo ra dao động dọc-xoắn hỗn hợp tại bề mặt làm việc theo [12], đó là:

**Giai đoạn 1:** Thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm truyền dao động sóng dọc với khối phía trước có biên dạng hàm mũ như được trình bày trong Hình 1.

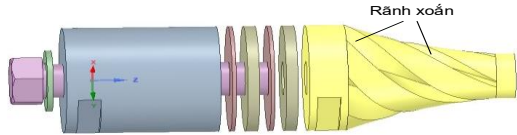
**Giai đoạn 2:** Tạo các rãnh xoắn trên khối phía trước có biên dạng hàm mũ đã được thiết kế ở giai đoạn 1 để chuyển

<sup>1</sup> Ho Chi Minh City University of Industry and Trade, Hochiminh, Vietnam (Ho Thi My Nu, Luong Quoc Viet, Nguyen Tan Ken, Dinh Le Cao Ky, Le The Truyen)

sóng dao động dọc thành sóng dọc-xoắn hỗn hợp như được trình bày trong Hình 2.



Hình 1. Bộ chuyển đổi siêu âm có biên dạng hàm mũ



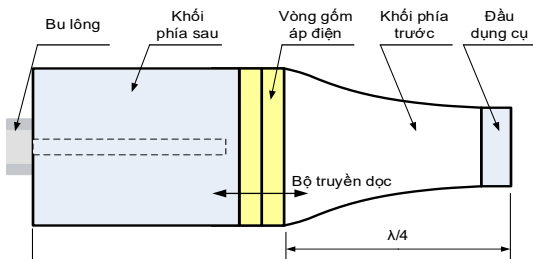
Hình 2. Bộ chuyển đổi siêu âm hỗn hợp

Bộ chuyển đổi siêu âm truyền sóng dọc được trình bày như trong Hình 1 gồm khối phía trước, khối phía sau, các vòng gôm áp điện, các điện cực và bu lông dự ứng lực. Dao động sóng dọc được phát ra từ các vòng gôm áp điện được truyền bên trong khối phía trước để tạo ra dao động có tần số siêu âm. Tuy nhiên, dao động sóng dọc này của các vòng gôm áp điện cũng truyền theo hướng ngược lại bên trong khối phía sau. Để sự truyền năng lượng trong quá trình truyền lan tỏa sóng dao động này là hiệu quả thì các thành phần vật liệu dùng để chế tạo các khối, các kích thước chúng phải được lựa chọn và thiết kế phù hợp.

Để có được dao động hỗn hợp dọc-xoắn hỗn hợp như được trình bày trong Hình 2 thì bộ chuyển đổi siêu âm sóng dọc ở giai đoạn 1 phải được thiết kế hoàn hảo. Dù đã có nhiều nghiên cứu về thiết kế cho bộ chuyển đổi siêu âm này đã được công bố trong những năm qua nhưng qui trình thiết kế và tính toán các thông số của các thành phần bộ chuyển đổi siêu âm, phương thức lựa chọn vật liệu chưa được rõ ràng và tường minh. Bài báo này đề xuất một qui trình tính toán, phương thức lựa chọn vật liệu và thiết kế các kích thước của bộ chuyển đổi siêu âm truyền sóng dọc ở giai đoạn 1 để làm cơ sở cho các thiết kế ở giai đoạn 2 nhằm tạo ra một bộ chuyển đổi rung động siêu âm có chế độ dọc-xoắn hỗn hợp. Kích thước của các bộ phận của bộ chuyển đổi siêu âm này được xác định bằng cách giả định tần số cộng hưởng của bộ chuyển đổi là 20 kHz. Phương pháp FEM được cung cấp bởi phần mềm thương mại ABAQUS được sử dụng để kiểm nghiệm và đánh giá tính hiệu quả của qui trình thiết kế đã đề xuất thông qua việc đánh giá các đáp ứng đầu ra của bộ chuyển đổi đã được thiết kế.

**2. Cấu tạo bộ chuyển đổi siêu âm được đề xuất**

Bộ chuyển đổi siêu âm có biên dạng hàm mũ trong nghiên cứu này có chiều dài tương ứng với 1/4 bước sóng, như được hiển thị trong Hình 3.



Hình 3. Bộ chuyển đổi siêu âm được đề xuất

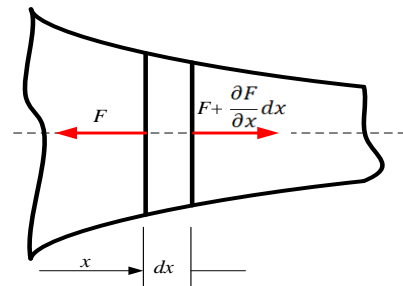
Vận tốc sóng dao động trong các thành phần của bộ chuyển đổi là khác nhau vì vật liệu được dùng để chế tạo các thành phần đó là khác nhau. Đồng thời, hình dạng của các thành phần của bộ chuyển đổi siêu âm thay đổi dẫn đến bước sóng thay đổi, do đó độ dài hai khối phía trước và sau của bộ chuyển đổi là không bằng nhau vì bước sóng khác nhau.

Bu lông dự ứng lực được dùng để kết nối các thành phần của đầu siêu âm. Khối phía trước được thiết kế để có thể lắp đầu dụng cụ. Các vòng gôm áp điện tạo ra dao động sóng dọc khi được kích hoạt ở dòng điện có tần số cao. Dao động dọc này được truyền và biến đổi trong các khối phía trước và phía sau để tạo ra dao động siêu âm tại bề mặt làm việc của bộ chuyển đổi.

**3. Qui trình thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm**

**3.1. Cơ sở lý thuyết**

Phương trình vi phân tổng quát cho dao động dọc của đầu siêu âm có thể được suy ra bằng cách xét trạng thái cân bằng của một phần tử vô cùng bé  $dx$  dưới tác dụng của lực đàn hồi (Elastic force) và lực quán tính (Inertial force) như được trình bày trong Hình 4.



Hình 4. Nguyên lý truyền dao động

$$Elastic\ force = F + \frac{\partial F}{\partial x} dx - F \tag{1}$$

$$Inertial\ force = A(x). dx. \rho \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \tag{2}$$

Trong đó:

- $F = E. A(x) \frac{\partial y}{\partial x}$  là lực đàn hồi,
- $A(x)$  là diện tích mặt cắt ngang,
- $y$  là chuyển vị theo phương dọc trục và chuyển vị này phụ thuộc theo vị trí  $x$  và  $t = \xi \sin \omega t$ ,
- $t$  là thời gian,
- $x$  là vị trí của mặt được đo từ đầu cố định,
- $\xi$  là biên độ dao động và là hàm số phụ thuộc biến  $x$ ,
- $\omega$  là vận tốc góc,  $\omega = 2\pi f$ ,
- $f$  là tần số,
- $E$  là mô đun đàn hồi Young,
- $\rho$  trọngkhối lượng riêng của vật liệu,
- $\frac{\partial y}{\partial x}$  là tỉ lệ biến dạng (strain),
- $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$  là gia tốc.

Từ (1) và (2), phương trình cân bằng giữa lực đàn hồi và lực quán tính được cho bởi:

$$\frac{\partial F}{\partial x} dx = A(x). dx. \rho. \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3}$$

Thay thế các giá trị của  $F$  và  $y$  vào phương trình (3), phương trình vi phân tổng quát trở thành:

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} + \frac{d \ln A(x)}{dx} \cdot \frac{d\xi}{dx} + \left[\frac{\omega}{c}\right]^2 \xi = 0 \quad (4)$$

Với  $c$  là vận tốc sóng trong vật liệu được tính theo:

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (5)$$

Tần số được chọn dựa trên yêu cầu của ứng dụng bộ chuyển đổi siêu âm. Hầu hết bộ chuyển đổi siêu âm được thiết kế để được làm việc ở tần số cộng hưởng để tối đa hóa biên độ rung động. Trong trường hợp bộ chuyển đổi chế độ dọc, người ta thường sử dụng tần số cộng hưởng của chế độ rung theo chiều dọc thứ nhất nơi có thể đạt được biên độ cao nhất. Khi thiết kế bộ cộng hưởng siêu âm, tần số cộng hưởng được sử dụng để tính toán bước sóng như sau [13]:

$$\lambda = c/f \quad (6)$$

Khối phía trước còn được gọi là sừng (horn) có biên dạng hàm mũ chủ yếu được sử dụng để gia công các vật liệu cứng và dai vì nó có thể làm việc với biên độ dao động lớn mà không có nguy cơ bị phá hủy do mỏi. Chúng có thể được thiết kế đơn giản và có thể được sản xuất dễ dàng trên máy tiện CNC. Nếu sừng hàm mũ có tiết diện tròn thì:

$$D_x = D_0 \cdot e^{-hx} \quad (7)$$

Trong đó,  $h$  là hệ số mũ,  $D_0$  là đường kính lớn,  $D_x$  là đường kính tại vị trí  $x$ . Thay (7) vào phương trình vi phân tổng quát (4), phương trình vi phân của sừng hàm mũ thu được bằng:

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} - 2h \frac{d\xi}{dx} + \left[\frac{\omega}{c}\right]^2 \xi = 0 \quad (8)$$

Giải phương trình (8), phân bố biên độ  $\xi$  theo vị trí  $x$  được cho bởi:

$$\xi = -\xi_0 \sqrt{1 + \frac{(hl)^2}{\pi}} \cdot e^{hx} \cdot \sin\left(\sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - h^2} \cdot x - \arctan\left(\frac{\pi}{hl}\right)\right) \quad (9)$$

trong đó,  $\xi_0$  là biên độ dao động tại vị trí  $x = 0$ ,  $l$  là chiều dài của sừng. Điều kiện để xảy ra cộng hưởng suy ra từ phương trình trên là:

$$\sqrt{\left[\frac{\omega}{c}\right]^2 - h^2} = \frac{\pi}{l} \quad (10)$$

Vậy chiều dài của sừng được xác định để xảy ra cộng hưởng là:

$$l = \frac{\pi}{\sqrt{\left[\frac{\omega}{c}\right]^2 - h^2}} \quad (11)$$

Và hệ số mũ  $h$  được tính:

$$h = \left(\frac{\omega}{c}\right) / \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \quad (12)$$

### 3.2. Trình tự thiết kế bộ chuyển đổi

Trình tự thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm trong bài báo này được chia làm các bước như sau:

**Bước 1**, chọn giá trị tần số cộng hưởng của bộ chuyển đổi siêu âm để tạo ra biên độ cao và để giảm thiểu ảnh hưởng của sự sinh nhiệt trong quá trình bộ chuyển đổi hoạt động. Giá trị của tần số được chọn là  $f = 20 \text{ kHz}$ , về mặt lý thuyết đây là tần số thấp nhất của ngưỡng siêu âm;

**Bước 2**, lựa chọn vật liệu cho các bộ phận trong bộ

chuyển đổi siêu âm;

**Bước 3**, tính toán kích thước của các bộ phận.

#### 3.2.1. Lựa chọn vật liệu

Bộ chuyển đổi siêu âm Langevin có hai loại vật liệu: vật liệu áp điện là bộ phận phát rung động và vật liệu kim loại bao gồm khối phía trước và sau là các bộ phận truyền rung động. Để sự truyền năng lượng giữa các vật liệu là hiệu quả và để tránh sự phản xạ ứng suất bên trong của sóng dao động, các đặc tính âm thanh của các vật liệu cấu tạo nên các thành phần cần phải được chọn lựa phù hợp. Phương trình sau đây có thể được sử dụng để làm cơ sở cho việc lựa chọn vật liệu cho các thành phần trong bộ chuyển đổi siêu âm [14]:

$$Z_c = \sqrt{Z_f \cdot Z_b} \quad (13)$$

Trong đó,  $Z_c$ ,  $Z_f$  và  $Z_b$  là trở kháng âm của vật liệu áp điện, khối phía trước và phía sau của bộ chuyển đổi, tương ứng. Theo chiều dọc bộ chuyển đổi, năng lượng âm thanh được tạo ra trong vật liệu áp điện được truyền đến cả khối lượng phía trước và phía sau của bộ chuyển đổi. Vì vậy, để giảm thiểu tổn thất năng lượng, khối phía sau phải có trở kháng âm cao hơn khối phía trước, khi đó hầu hết năng lượng sẽ được hướng tới khối phía trước là nơi chứa đầu dụng cụ làm việc. Trở kháng âm của các vật liệu của gốm áp điện, của khối phía trước và khối phía sau của bộ chuyển đổi cần phải thỏa phương trình (13) để quá trình truyền năng lượng là tối ưu.

**Bảng 1.** Đặc tính âm học

STT	Vật liệu	Vận tốc sóng (m/s)	Kháng âm (N.s/m <sup>3</sup> )
1	Hợp kim titan (Ti6Al4v)	4900	39,2E+6
2	Hợp kim nhôm (Al 7075)	5000	15,25E+6
3	Thép công cụ	5250	41,2E+6
4	Sonox P8	3080	42,6E+6

**Bảng 2.** Đặc tính cơ học

STT	Bộ phận	Vật liệu	Young mô-đun (GPa)	Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )	Hệ số Poisson
1	Vòng áp điện	P8	73	7700	
2	Điện cực	Đồng C101	115	8900	0,31
3	Khối sau	Steel	179.18	7723	0,3
4	Khối trước	Nhôm Al 7750	68	2700	0,3
5	Bu lông	Ti6Al4v	110	4418	0,342

Trong nghiên cứu này, bộ chuyển đổi được đề xuất bao gồm 2 vòng gốm áp điện loại Sonox P8. Dựa trên cơ sở mối tương quan giữa các kháng âm của các thành phần của bộ chuyển đổi được trình bày trong (13), khối phía sau của bộ chuyển đổi được lựa chọn chế tạo từ thép công cụ (St 304) và có biên dạng hình trụ, còn khối phía trước có biên dạng hàm mũ làm từ vật liệu nhôm (Al 7075). Vật liệu bu lông dự ứng lực được làm từ hợp kim titan Ti6Al4V. Các tấm điện cực sử dụng đồng C101. Các đặc tính âm thanh của vật liệu được trình bày như trong Bảng 1 và các đặc tính cơ học được trình bày như trong Bảng 2 [15]. Khối phía trước được thiết kế từ hợp kim nhôm vì nó có độ bền kéo tốt, trọng lượng nhẹ và tính chất âm học tốt. Thép carbon thấp được sử dụng cho khối phía sau do trọng lượng cao và do đó có trở kháng âm thanh cao.

3.2.2. Tính toán kích thước các thành phần

a. Kích thước khối phía sau

Để tính chiều dài của riêng khối phía sau (phần vật liệu kim loại), mối quan hệ sau đây có thể sử dụng [12]:

$$\frac{Z_b}{Z_c} \tan\left(\frac{2\pi f l_b}{c_b}\right) \tan\left(\frac{2\pi f l_c}{c_c}\right) = 1 \quad (14)$$

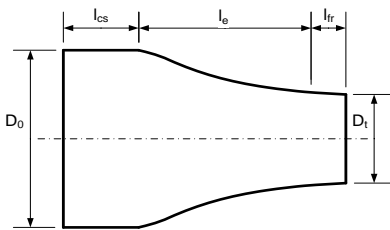
Trong đó,  $Z_b$ ,  $Z_c$ ,  $c_b$  và  $c_c$  là trở kháng âm và tốc độ sóng của khối phía sau và các thành phần áp điện tương ứng. Chiều dài của khối phía sau là  $l_b$  và chiều dài của ống áp điện là  $l_c$ . Vì vòng gồm áp điện là các chi tiết được tiêu chuẩn hóa về kích thước nên nó sẽ được lựa chọn đầu tiên để làm cơ sở tính toán tiếp theo. Chiều dài khối phía sau  $l_b$  của bộ chuyển đổi siêu âm được tính toán sau khi đã lựa chọn được các vòng gồm áp điện. Thành phần Piezo được sử dụng trong thiết kế này là loại Sonox P8 có các thông số kỹ thuật như trong Bảng 3 [15].

Bảng 3. Thông số của vòng Piezo

Sonox P8	Đường kính trong (mm)	Đường kính ngoài (mm)	Độ dày (mm)	Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )
	16	38	5	7700

Trên cơ sở các giá trị như:  $Z_b$  và  $c_b$  của khối phía sau được làm từ thép công cụ,  $Z_c$  và  $c_c$  (theo số liệu Bảng 1) và  $l_c$  của các vòng gồm áp điện (theo số liệu Bảng 3), tần số dao động  $f = 20 \text{ kHz}$ , chiều dài của phần khối phía sau  $l_b$  được tính theo (14) là  $l_b = 36 \text{ mm}$ . Chiều dài của các vòng gồm áp điện là  $(2 \times 5 \text{ mm}) = 10 \text{ mm}$ . Các điện cực đồng có chiều dày là  $2 \times 0,4 \text{ mm}$ . Chọn chiều dày cho các điện cực này đủ lớn để đảm bảo độ cứng khi chịu tải rung động siêu âm. Tổng chiều dài của khối phía sau là  $46,8 \text{ mm}$ .

b. Kích thước khối phía trước



Hình 5. Khối phía trước

Các kích thước cơ bản của khối phía trước được trình bày như trong Hình 5. Nó bao gồm một phần cơ sở, một phần mũ ở giữa và phần hình trụ phía trước để lắp dụng cụ. Tổng chiều dài được tính toán bằng 1/4 bước sóng. Khối phía trước được làm từ hợp kim nhôm Al 7075, bằng cách sử dụng kết hợp các công thức (5) và (6) xác định được bước sóng  $\lambda$ , chiều dài của khối phía trước là  $l = \lambda/4 = 0,07 \text{ m} = 70 \text{ mm}$ . Phần đế là bộ phận quan trọng cho bộ chuyển đổi vì được dùng để cố định bộ chuyển đổi và chiều dài của nó được chọn là  $l_{cs} = 15 \text{ mm}$ . Đầu phía trước được sử dụng để cho phép gắn các dụng cụ khác vào bộ chuyển đổi và chiều dài được chọn là  $l_{fr} = 5 \text{ mm}$ . Hai kích thước này được xem xét lựa chọn ban đầu dựa trên độ dài cần thiết và sau đó được tối ưu hóa tùy vào ứng dụng của bộ chuyển đổi.

Đường kính đầu lớn của khối phía trước phải trùng với đường kính của vòng gồm áp điện đã trình bày ở Bảng 3, vậy  $D_0 = 38 \text{ mm}$ . Đường kính phần đầu còn lại của khối này được tính theo công thức (7) trên cơ sở hệ số mũ  $h = 0,0128$  được tính theo công thức (12). Tổng quát, kích thước chi

tiết của khối phía trước được trình bày trong Bảng 4.

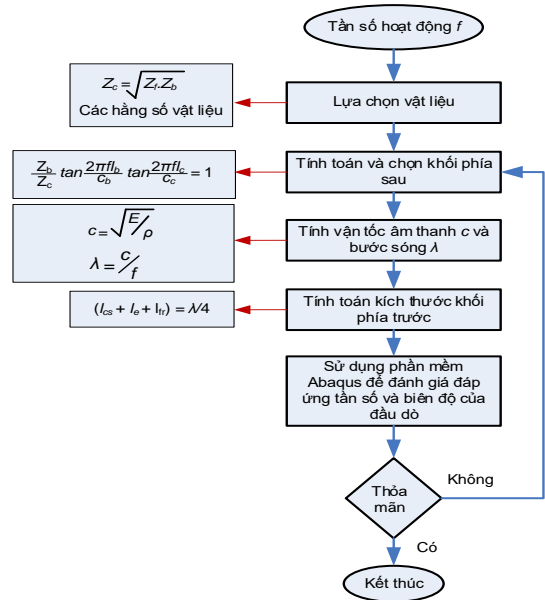
Bảng 4. Các thông số thiết kế của khối trước

Các thông số thiết kế của khối trước				
$D_0$	$D_1$	$l_e$	$l_{cs}$	$l_{fr}$
38 mm	20 mm	50 mm	15 mm	5 mm

c. Bu lông dự ứng lực

Bu lông dự ứng lực được dùng để lắp ghép các thành phần có đường kính bằng với đường kính trong của vòng gồm áp điện là  $16 \text{ mm}$ .

d. Quy trình thiết kế



Hình 6. Quy trình thiết kế được đề xuất

Cuối cùng, một quy trình thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm có biên dạng hàm mũ được đề xuất bởi bài báo như được trình bày trong Hình 6. Quy trình này bắt đầu từ việc chọn tần số cộng hưởng mong muốn. Sau đó lựa chọn các thành phần vật liệu để đảm bảo sự tương thích về các đặc tính âm học để tối ưu sự truyền năng lượng siêu âm. Để xác định kích thước của khối phía sau thì cần phải chọn trước các vòng gồm áp điện đã được sản xuất theo tiêu chuẩn công nghiệp. Trên cơ sở đặc tính âm học liên quan giữa khối phía sau và các vòng gồm áp điện, kích thước khối phía sau sẽ được xác định. Dựa vào các đặc tính cơ học của vật liệu như khối lượng riêng, mô đun đàn hồi Young để xác định bước sóng. Kích thước khối phía trước được xác định theo lý thuyết 1/4 bước sóng để đạt được biên độ dao động lớn nhất. Để kiểm nghiệm kết quả thiết kế, mô hình số được xây dựng để đánh giá đáp ứng đầu ra của bộ chuyển đổi.

4. Mô phỏng phần tử hữu hạn

Phân tích số dựa trên Phương pháp FEM được ưu tiên sử dụng để phân tích thiết kế của bộ chuyển đổi siêu âm so với phương pháp giải tích, vì việc giải phương trình sóng dao động bằng phương pháp giải tích là rất khó khăn và tốn nhiều thời gian. Phần mềm phân tích phần tử hữu hạn có thể tính toán đáp ứng sóng hài và phương thức dao động của các bộ chuyển đổi năng lượng và kết quả đó có thể được sử dụng để so sánh với lý thuyết thiết kế. Đối với bộ chuyển đổi siêu âm, phương



pháp phân tích phần tử hữu hạn đã được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng để kiểm chứng độ chính xác ở một số nghiên cứu [16]. Phương pháp FEM thường được sử dụng để xác định tần số tự nhiên, phương thức dao động và vị trí của các mặt phẳng nút. Tần số tự nhiên và phương thức dao động là các thông số quan trọng trong thiết kế của một bộ chuyển đổi siêu âm.

#### 4.1. Mô hình vật liệu

Đối với đặc tính đàn hồi cơ học, số liệu cần lấy là: mô đun đàn hồi Young, tỷ lệ Poisson và mật độ vật liệu cho đặc tính khối lượng. Những số liệu này là được liệt kê trong Bảng 2. Đối với vật liệu áp điện, mô đun đàn hồi của vật liệu có thể được đánh giá dưới sự dịch chuyển điện bên trong vật liệu. Phần mềm ABAQUS đã hỗ trợ hiệu quả cho việc mô tả đặc tính đàn hồi của vật liệu áp điện [17].

Độ thấm điện môi tương đối của vật liệu áp điện được biểu diễn dưới dạng ma trận như sau [18]:

$$|\epsilon_s^R| = \begin{bmatrix} 730 & 0 & 0 \\ 0 & 635 & 0 \\ 0 & 0 & 730 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Ma trận ứng suất áp điện ở biến dạng không đổi là:

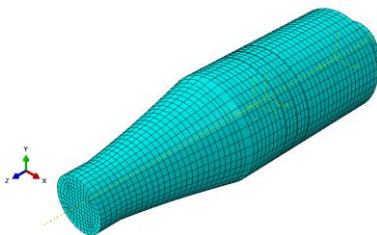
$$|e| = \begin{bmatrix} 0 & -5,2 & 0 \\ 0 & 15,1 & 0 \\ 0 & -5,2 & 0 \\ 12,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12,7 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left( \frac{C}{m^2} \right) \quad (16)$$

Ma trận độ cứng ở điện trường không đổi là:

$$|c^e| = \begin{bmatrix} 12,06 & -5,1 & -3,98 & 0 & 0 & 0 \\ -5,1 & 18,11 & -5,1 & 0 & 0 & 0 \\ -3,98 & -5,1 & 12,06 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 21,72 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 21,72 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 32,07 \end{bmatrix} \quad (17)$$

#### 4.2. Chia lưới

Để phân tích ứng suất tuyến tính trong ABAQUS, phần tử được khuyến nghị để có kết quả chính xác là C3D20R [17]. Nó là phần tử liên tục (rắn) ở dạng 3D và có 20 nút, một nút ở mỗi đỉnh của hình thoi và một nút ở giữa mỗi cạnh giữa các nút đỉnh. Riêng đối với vật liệu gốm áp điện piezo, phần tử C3D20RE được sử dụng. Mô hình phần tử hữu hạn của bộ chuyển đổi siêu âm được trình bày như trong Hình 7. Số phần tử của mô hình trong nghiên cứu này là 162.234.



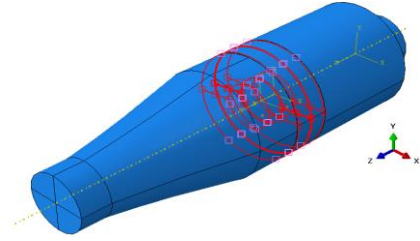
Hình 7. Mô hình phần tử hữu hạn

#### 4.3. Sự tương tác giữa các thành phần

Mô-đun tương tác (interaction) trong phần mềm ABAQUS được sử dụng để xác định điều kiện tiếp xúc giữa các bộ phận của mô hình đã lắp ráp hoặc giữa mô hình và môi trường xung quanh nó. Trong nghiên cứu này, tất cả các bề mặt tiếp xúc của các thành phần đều được mô hình hóa bằng thuật toán tiếp xúc chung (general contact). Lực xiết bu lông dự ứng lực được mô hình hóa bằng áp suất nén.

#### 4.4. Điều kiện biên

Để mô phỏng đáp ứng tần số của bộ chuyển đổi siêu âm, điều kiện biên tự do được áp dụng (các nút được dao động tự do). Điện áp dương (+V) và điện áp nối đất (0 V) được cấp cho các mặt cực của các vòng gốm áp điện như được trình bày trong Hình 8.



Hình 8. Điều kiện biên tự do

#### 4.5. Giải hệ phương trình

Một hệ phương trình ma trận thu được trong mô hình số để giải các giá trị nút chưa biết. Các phương trình để phân tích phương thức dao động và động học trong mô hình số được đưa ra dưới dạng sau:

$$[M]_{m \times n} \{u''\}_{n \times 1} + [K]_{m \times n} \{u\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (18)$$

Trong đó,  $[M]$  và  $[K]$  là ma trận quán tính và độ cứng,  $\{u''\}$  và  $\{u\}$  là vectơ gia tốc và vectơ chuyển vị của các trường biến chưa biết và  $\{F\}$  là vectơ tải.

Nếu  $\{F\} = 0$  thì:

$$[M]_{m \times n} \{u''\}_{n \times 1} + [K]_{m \times n} \{u\}_{n \times 1} = 0 \quad (19)$$

Khi đó, hệ thực hiện chuyển động điều hòa đơn giản:

$$\{u\} = \{\phi\} e^{j\omega t} \quad (20)$$

Vậy:  $([K] - \omega^2 [M])\{\phi\} = 0$  (21)

Nếu  $\{\phi\} \neq 0$  thì

$$[K] - \omega^2 [M] = 0 \quad (22)$$

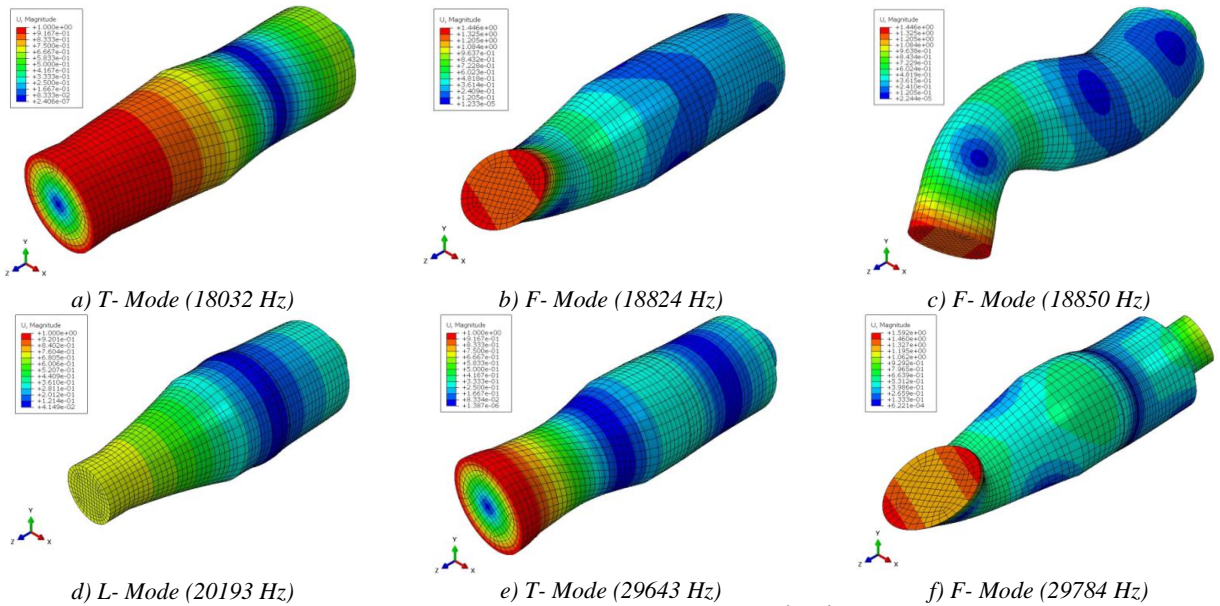
Phương trình trên được dùng để xác định các tần số dao động của bộ chuyển đổi siêu âm trong mô hình số.

### 5. Kết quả mô phỏng và thảo luận

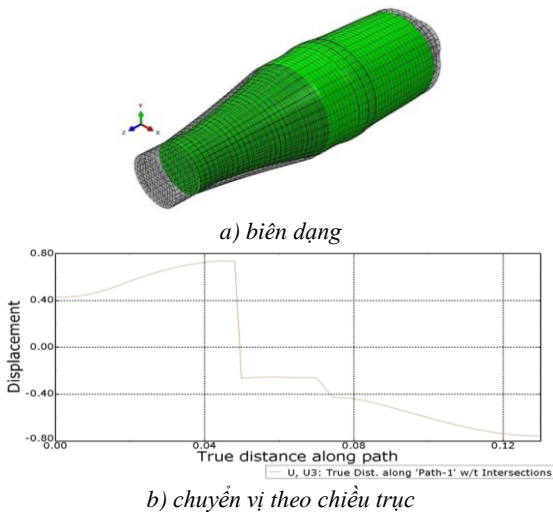
#### 5.1. Phân tích mô hình

Phân tích phương thức dao động cho phép tìm được tần số tự nhiên của từng phương thức và phương thức biến dạng nhận được ở mỗi tần số này. Những biến dạng và tần số được xác định bởi: hình dáng hình học, chiều dài, đường kính và tính chất vật lý của vật liệu được dùng để chế tạo bộ chuyển đổi siêu âm. Dải tần số được phân tích giữa 16,5 kHz và 30 kHz vì tần số được thiết kế là 20 kHz. Trong quá trình mô phỏng, tần số và phương thức dao động thu được bằng phương pháp giải Block Lanczos trong điều kiện biên tự do. Phân tích phần tử hữu hạn trong trường hợp này đặt điện áp 0 V vào mặt gốm áp điện để làm cho nó bị đoản mạch. Kết quả mô phỏng về các dạng dao động của đầu siêu âm trong nghiên cứu này được trình bày như trong Hình 9 với các ghi chú sau đây được sử dụng:  $T$ - dạng xoắn,  $F$ -dạng cong,  $L$ -dạng dọc.

Các kết quả mô phỏng về các dạng dao động của bộ chuyển đổi được trình bày trong Hình 9 cho thấy, khoảng cách tần số giữa các chế độ dao động là đủ rộng để ngăn chặn bất kỳ phương thức dao động không mong muốn nào. Dạng dao động dọc ( $L$ ) xảy ra khi tần số là 20149 Hz trong khi tần số cộng hưởng của chế độ cong ( $F$ ) gần nhất là 18850 Hz. Dao động xoắn ( $T$ ) xảy ra khi tần số cộng hưởng là 18032 Hz.



**Hình 9.** Các dạng dao động của bộ chuyển đổi



**Hình 10.** Các chế độ dao động dọc

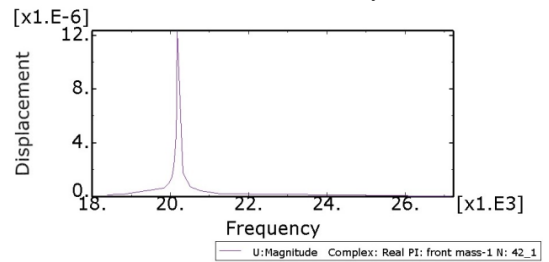
Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng đầu siêu âm được thiết kế có tần số cộng hưởng ở phương thức dao động dọc ở tần số 20149 Hz là gần đúng với tần số thiết kế mong muốn là 20 kHz.

Hình 10 trình bày phương thức dao động bao gồm trạng thái trước và sau biến dạng cùng chuyển vị theo phương trục OZ của bộ chuyển đổi siêu âm ở tần số 20149 Hz. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng biên độ dao động của bộ chuyển đổi thiết kế là đủ lớn và có thể ứng dụng được trong các lĩnh vực như hàn siêu âm, gia công siêu âm, cắt gọt siêu âm và nhiều ứng dụng khác.

**5.2. Phân tích sóng hài**

Để phân tích sóng hài (harmonic), mô phỏng thực hiện với điện áp cấp cho các vòng gồm áp điện là 50 V. Hình 11 trình bày kết quả mô phỏng về chuyển vị của bộ chuyển đổi siêu âm trong miền tần số với điện áp cung cấp cho các vòng áp điện là 50 V. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng tần số xảy ra cộng hưởng là 20149 Hz. So sánh với mong muốn thiết kế là 20 kHz thì sai số ước lượng là tương đối nhỏ. Tuy nhiên, sai số này có thể thay đổi tăng hay giảm tùy theo độ mịn của lưới. Ngày nay, các công cụ tính toán có cấu hình và tốc độ xử lý mạnh mẽ có thể hỗ trợ

tốt cho công việc tính toán số nên việc tạo lưới mịn trong các mô phỏng số là khả thi. Kết quả mô phỏng này đã chứng minh rằng cách tiếp cận của phương pháp thiết kế bộ chuyển đổi siêu âm được đề xuất bởi bài báo là khá tin cậy.



**Hình 11.** Đáp ứng trong miền tần số của chuyển vị

Các chuyển vị và ứng suất von-mises theo phương OZ được trình bày như trong Hình 12. Chuyển vị đạt giá trị cực đại tại đầu làm việc của bộ chuyển đổi siêu âm là 1,228E-5 (m). Ứng suất giảm dần theo chiều dọc tính từ vị trí các vòng áp điện và đạt giá trị cực tiểu tại đầu cuối làm việc của bộ chuyển đổi siêu âm.

Một chỉ tiêu quan trọng trong hoạt động của bộ chuyển đổi này là tần số cộng hưởng của các thành phần gồm áp điện. Khi tiếp xúc với điện trường xoay chiều, phần tử gốm áp điện sẽ thay đổi kích thước theo chu kỳ, theo tần số của chu kỳ trường điện từ. Tần số cộng hưởng là tần số mà phần tử gốm áp điện có thể dao động dễ dàng nhất và chuyển đổi năng lượng điện đầu vào thành năng lượng cơ học một cách hiệu quả nhất.

Để dự đoán tần số cộng hưởng của vòng gồm áp điện piezo, tham số dòng điện phản kháng tại nút (RCHG) được hỗ trợ bởi phần mềm ABAQUS để truy xuất tổng điện tích  $Q_e$  trên các mặt dương của các vòng gồm áp điện. Tổng điện tích này được tính bằng tổng các nút trên bề mặt. Từ tổng điện tích  $Q_e$  có thể tính toán dòng điện được sinh ra theo phương trình sau [19]:

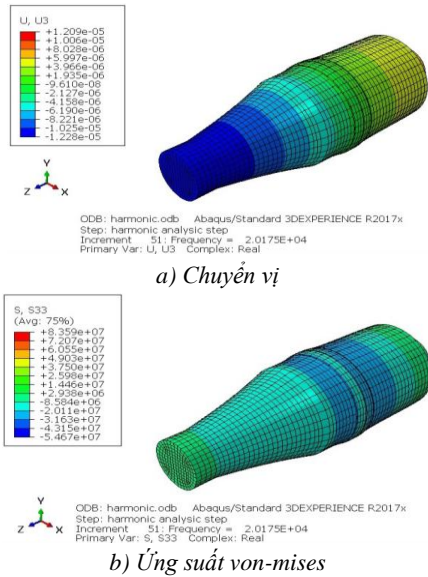
$$I = i\omega \sum Q_e \tag{23}$$

Trong đó,  $i$  và  $\omega$  là phần ảo và tần số góc của dòng điện kích thích. Trở kháng điện  $Z_e$  có thể được tính bằng:

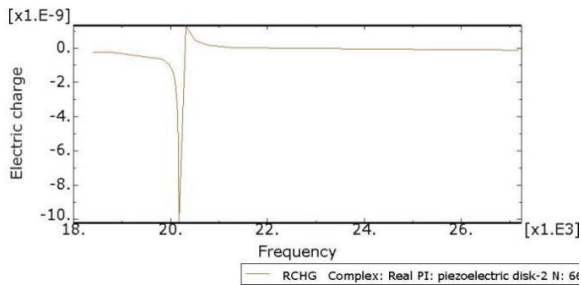
$$Z_e = \frac{V}{I} \tag{24}$$

Trong đó,  $V$  là điện áp của dòng điện kích.

Bài báo này chỉ trình bày kết quả tổng điện tích  $Q_e$  trong miền tần số mà không trình bày trở kháng điện  $Z_e$ .



**Hình 12.** Chuyển vị và ứng suất tại tần số cộng hưởng



**Hình 13.** Đáp ứng trong miền tần số của  $Q_e$

Kết quả mô phỏng trong Hình 13 chứng minh rằng các phần tử gồm dao động dễ dàng nhất (khi trở kháng điện thấp nhất) và chuyển đổi năng lượng điện đầu vào thành năng lượng cơ học một cách hiệu quả nhất trong dải tần số nằm trong vùng lân cận tần số cộng hưởng của đầu siêu âm đã được thiết kế.

## 6. Kết luận

Bài báo này đã phác thảo một qui trình tính toán và thiết kế một bộ chuyển đổi siêu âm có dạng hàm mũ có thể truyền sóng dọc. Sử dụng lý thuyết một phần tư bước sóng để thiết kế sừng của bộ chuyển đổi siêu âm. Mô phỏng phần tử hữu hạn được sử dụng để kiểm chứng các thông số thiết kế và phương thức dao động của bộ chuyển đổi siêu âm. Kết quả mô phỏng cho thấy giá trị tần số riêng mô phỏng gần đúng với giá trị thiết kế. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng khoảng cách giữa các phương thức dao động là đủ lớn để ngăn ngừa các dạng dao động không mong muốn. Điều này chứng tỏ, qui trình và các cơ sở thiết kế được trình bày trong bài báo này có độ chính xác cao và có thể được sử dụng để thiết kế các bộ chuyển đổi siêu âm truyền sóng dọc có sừng hàm mũ. Trong tương lai, các phương pháp mô hình hóa sẽ được nghiên cứu sử dụng để giảm thời gian tính toán. Độ hội tụ của lưới cũng sẽ được nghiên cứu để đánh giá mức độ ảnh hưởng của độ mịn lưới đến kết quả mô phỏng. Ngoài ra, bộ chuyển đổi tiếp tục được gia công chế tạo để kiểm nghiệm tính đúng đắn của lý thuyết đã được đề xuất và tiến hành chế

tạo các rãnh xoắn để tạo ra dao động sóng dọc-xoắn hỗn hợp.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này do Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh bảo trợ và cấp kinh phí theo Hợp đồng số 76/HĐ-DCT ngày 15 tháng 8 năm 2023.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Asami and H. Miura, "Study of ultrasonic machining by longitudinal-torsional vibration for processing brittle materials-observation of machining marks", *Physics Proc.*, Vol. 70, pp. 118–121, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.056>
- [2] J. Tang and B. Zhao, "A new longitudinal-torsional composite ultrasonic milling system with a single excitation", *Journal of Vibration and Shock*, Vol. 34, No. 6, pp. 57–71, 2015. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2015.06.011>
- [3] L. STĂNĂȘEL and F. ARDELEAN, "The Parametric Design of the Ultrasonic Exponential Horns", *Nonconventional Technologies Review*, Vol. 14, No. 4, pp 54-58, 2010.
- [4] F. J. Wang, H. J. Zhang, C. M. Liang, Y. L. Tian, X. Y. Zhao, and D. W. Zhang, "Design of high-frequency ultrasonic transducers with flexure decoupling flanges for thermo-sonic bonding", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 63, No. 4, pp. 2304-2312, 2016. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2500197>
- [5] Y. Y. Hu, H. J. Liu, and H. Fujii, "Improving the mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints by ultrasonic vibrations during friction stir welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 271, pp. 75-84, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.013>
- [6] V. Yadava and A. Deoghare, "Design of horn for rotary ultrasonic machining using the finite element method", *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, pp. 9–20, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1193-7>
- [7] A. Iula, D. Cerro, M. Pappalardo, and N. Lamberti, "3D finite element analysis of the Langevin transducer", *IEEE Symposium on Ultrasonics*, Vol. 2, pp.1663–1667, 2003. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2003.1293230>.
- [8] A. Iula, F. Vazquez, M. Pappalardo, and J. A. Gallego, "Finite element three dimensional analysis of the vibrational behaviour of the Langevin type transducer", *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 513–517, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00174-9](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00174-9)
- [9] J. Li, "Effect of bolt on the performance parameters of piezoelectric transducer", *Piezoelect. Acoustoopt.*, Vol 32, pp. 985–990, 2010.
- [10] X. X. Xie and X. P. He, "Effect of rear bolt on the performance parameters of transducer", *J. Shanxi Normal Univ.*, Vol. 37, pp. 42–46, 2009.
- [11] J. Tsujino, R. Suzuki, and M. Takeuchi, "Load characteristics of ultrasonic rotary motor using a longitudinal torsional vibration converter with diagonal slits", *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 265–269, 1996. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(95\)00067-D](https://doi.org/10.1016/0041-624X(95)00067-D)
- [12] H. Al-Budairi, M. Lucas, and P. Harkness, "A design approach for longitudinal-torsional ultrasonic transducers," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 198, pp. 99-106, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.04.024>
- [13] J. A. Hossack and B. Auld, "Improving the characteristics of a transducer using multiple piezoelectric layers", *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 40, No. 2, pp. 131-139, 1993. <https://doi.org/10.1109/58.212561>
- [14] L. Parrini, "New technology for the design of advanced ultrasonic transducers for high-power applications", *Ultrasonics*, Vol. 41, No. 4, pp. 261-269, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00450-X](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00450-X)
- [15] Y. Youping, S. Wolfgang, G. Rainer, and Z. Jue, "Development and analysis of a longitudinal and torsional type ultrasonic motor with two stators", *Ultrasonic*, Vol. 43, No. 8, pp. 629-634, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2005.03.007>
- [16] A. Nabhan, "Vibration analysis of deep groove ball bearing with outer race defect using ABAQUS", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 35, No. 4, pp. 312-325, 2016. <https://doi.org/10.1177/0263092316676414>
- [17] Hibbitt, *ABAQUS User's Manual*, version 6.10, Karlsson & Sorensen, Inc., 2011.
- [18] ANSYS, Inc. "Ansys Store Catalog", Available: <https://catalog.ansys.com>. [Accessed 10/26/2023].
- [19] P. Selva, O. Cherrier, V. Budinger, F. Lachaud, and J. Morlier, "Smart EMI Monitoring of Thin Composite Structures", *16<sup>th</sup> International Conference on Composite Structures*, University of Porto, Porto, Portugal, June 28-30, 2011.