MÔ PHỎNG MẢNG CÁC BIẾN TỬ SIÊU ÂM BẰNG PHẦN MỀM COMSOL MULTIPHYSICS

Lê Phước Định, Lê Thị Diệu Hiền, Lê Ngọc Minh, Lê Thị Ngọc Bảo*

Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ Vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

*Email: ltnbao@husc.edu.vn

Ngày nhận bài: 3/10/2024; ngày hoàn thành phản biện: 12/10/2024; ngày duyệt đăng: 01/11/2024

TÓM TẮT

Trong bài báo này chúng tôi sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method-FEM), phương pháp phần tử biên (Boundary Element Method – BEM) kết hợp để mô phỏng mảng 2 chiều các biến tử áp điện Langevin bức xạ vào nước. Sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics, chúng tôi đã xác định được trường dịch chuyển của các biến tử áp điện có tính đến tương tác âm học cũng như trường áp suất âm trong môi trường nước. Mô hình này là một công cụ rất hữu ích để tối ưu hóa thiết kế của các mảng biến tử được sử dụng trong các máy rửa siêu âm cũng như các thiết bị siêu âm dùng trong xử lý nước.

Từ khóa: Mảng các biến tử siêu âm, Phần tử hữu hạn, Phần tử biên.

1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, biến tử công suất siêu âm đã có sự phát triển vượt bậc, hiện nay có nhiều ứng dụng trong lĩnh vực công nghiệp, chẳng hạn như: làm sạch bằng siêu âm, hàn, cắt, chế biến thực phẩm, v.v. [1, 2]. Một trong những lợi thế của việc sử dụng siêu âm công suất trong chất lỏng là tạo ra vi bọt khí bằng siêu âm cường độ cao. Hiện tượng này có nhiều ứng dụng và hiện nay, nó được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp hóa chất để đồng nhất hóa các hỗn hợp chất lỏng không trộn lẫn, chẳng hạn như dầu-nước [3]; trong ngành công nghiệp thực phẩm, nó được sử dụng để loại bỏ vi khuẩn, khử trùng, cũng như để xử lý nhũ tương thực phẩm [4].

Để tạo ra siêu âm công suất, người ta thường sử dụng biến tử áp điện loại Langevin. Biến tử áp điện Langevin về cơ bản bao gồm các đĩa gốm áp điện kẹp giữa hai khối kim loại hình trụ được giữ bằng một bu lông dọc theo trục của nó để tăng độ bền cơ học của gốm áp điện. Các biến tử loại này được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống sonar và thông tin liên lạc dưới nước [5-8] cũng như trong nhiều ứng dụng công nghiệp [6,7] do khả năng dao động theo các mode chiều dày ở tần số thấp, không cần điện áp

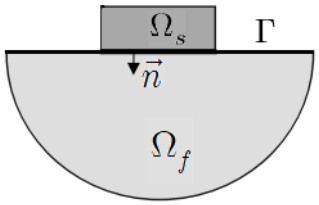
điều khiển lớn. Chúng thường được sử dụng dưới dạng mảng tuyến tính hoặc hai chiều gồm nhiều biến tử để cải thiện độ chính xác và độ tin cậy trong các hệ thống sonar, cải thiện chất lượng hình ảnh siêu âm cũng như khả năng xử lý nước.

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng FEM kết hợp với BEM để mô phỏng mảng các biến tử Langevin bức xạ vào môi trường nước. Quá trình bao gồm tính toán sự phân bố các dịch chuyển của các biến tử bằng FEM và khảo sát trường âm trong chất lỏng bằng BEM). Các tính toán được thực hiện trên phần mềm COMSOL Multiphysics.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Việc nghiên cứu các đặc tính dao động của các biến tử siêu âm chủ yếu dựa trên FEM và các đặc tính của trường bức xạ siêu âm được xác định bởi BEM.

Xét một cấu trúc dao động áp điện Ω_s bức xạ vào môi trường chất lỏng bán vô hạn Ω_f (hình 1). Mặt phân cách giữa Ω_s và Ω_f là Γ và $\vec{n}$ là vector đơn vị pháp tuyến ngoài của Ω_s. Các đặc tính của hệ được xác định bởi FEM trong miền Ω_s và bởi BEM trong miền Ω_f.



Hình 1. Miền tính toán trong mô phỏng.

2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)

Đối với một hệ dao động, hệ phương trình phần tử hữu hạn có dạng [11]:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & [K_{u\Phi}] \\ [K_{u\Phi}]^T & [K_{\Phi\Phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -q \end{bmatrix}, \tag{1}$$

ở đây U, Φ, q và F lần lượt là vector chứa các giá trị nút của dịch chuyển cơ học, điện thế, điện tích và ngoại lực tác dụng lên hệ. $[K_{uu}], [M], [K_{u\Phi}]$ và $[K_{\Phi\Phi}]$ lần lượt là các ma trận độ cứng, khối lượng, áp điện và điện môi của cấu trúc và ω là tần số dao động. Ngoại lực F liên hệ với áp suất P trên biên Γ bởi hệ thức:

$$F = -[L]P\,, \tag{2}$$

ở đây $[L]$ là ma trận kết nối biểu diễn sự liên kết giữa cấu trúc và chất lỏng trên biên Γ và P là vector chứa các giá trị nút của trường áp suất trên Γ.

Trên các bản áp điện, một mặt được nối với một điện cực có điện thế Φ_0 tương

ứng với điện tích Q_0 , mặt còn lại nối với điện cực điện thế Φ (điện tích bằng không) , do đó hệ phương trình (1) trở thành [11]:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}]-\omega^2[M] & [K_{u\Phi}] & [K_{u\Phi_0}] \\ [K_{u\Phi}]^T & [K_{\Phi\Phi}] & [K_{\Phi\Phi_0}] \\ [K_{u\Phi_0}]^T & [K_{\Phi\Phi_0}]^T & [K_{\Phi_0\Phi_0}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \\ \Phi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L[P] \\ 0 \\ -Q_0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.2. Phương pháp phần tử biên (BEM)

Môi trường chất lỏng được mô tả bằng cách sử dụng công thức tích phân Helmholtz có dạng sau [12]:

$$p(\vec{r}) = -2\int_{\Gamma} g(\vec{r},\vec{r}')\frac{\partial p(\vec{r}')}{\partial \vec{n}}d\Gamma \ , \ \vec{r} \in \Omega_f \cup \Gamma \quad (4)$$

ở đây $\vec{r}$ là vector vị trí của điểm trường trong Ω_s hoặc trên Γ, $\vec{r}'$ là điểm lấy tích phân trên Γ, g là hàm Green [8], $\partial/\partial\vec{n}$ chỉ đạo hàm theo hướng pháp tuyến ngoài của Γ. Thực hiện rời rạc hóa phương trình (4) trên biên Γ ta được phương trình ma trận sau:

$$P = [B]\frac{\partial P}{\partial \vec{n}} = \rho_f\omega^2[B]U_n \quad (5)$$

ở đây ρ_f là mật độ chất lỏng và U_n là các giá trị nút của độ dịch chuyển pháp tuyến trên Γ còn ma trận $[B]$ xuất phát từ việc tính số tích phân của hàm Green được lấy trung bình bằng các hàm nội suy.

2.3. Liên kết FEM-BEM

Liên kết này được sử dụng cho trường hợp các phần tử bậc hai được kết nối bằng các nút trên cả hai mặt phần tử hữu hạn và phần tử biên. Liên kết này nhận được bằng cách kết hợp các phương trình (3) và (5). Đại lượng P được xác định từ phương trình (5) và ma trận $[B]$ được chiếu theo từng hướng và được tập hợp lại trong $[B_P]$ dưới dạng:

$$[B]U_n = [B_P]U_{(\Gamma)} \quad , \quad (6)$$

ở đây $U_{(\Gamma)}$ chứa các giá trị của các thành phần của dịch chuyển nút trên Γ. Sau khi kết hợp hai phương trình đầu tiên trong (3) với các phương trình (5) và (6), thay $U_{(\Gamma)}$ vào U ta nhận được hệ phương trình:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}]-\omega^2[M]+\rho_f\omega^2[L][B_P] & [K_{u\Phi}] \\ [K_{u\Phi}]^T & [K_{\Phi\Phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[K_{u\Phi_0}]\Phi_0 \\ -[K_{\Phi\Phi_0}]\Phi_0 \end{bmatrix} . \quad (7)$$

Sau khi giải phương trình (7), trở kháng điện Z có thể xác định trực tiếp từ phương trình thứ ba trong (3) theo công thức:

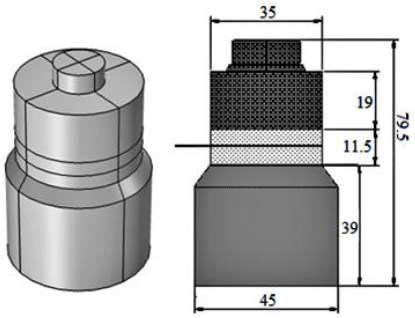
$$Z = \frac{\Phi_0}{i\omega Q_0} = \frac{i\Phi_0}{\omega\left(\left[K_{u\Phi_0}\right]^T U + \left[K_{\Phi\Phi_0}\right]^T \Phi_0 + \left[K_{\Phi\Phi_0}\right]\Phi_0\right)} \quad . \tag{8}$$

Sử dụng các giá trị của $U_{(\Gamma)}$ cùng với các phương trình (5) và (6) ta sẽ xác định được áp suất bề mặt. Sau đó, trường áp suất trong Ω_f sẽ được xác định từ phương trình (4).

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN

Việc giải số các hệ phương trình nêu trên được thực hiện nhờ phần mềm COMSOL Multiphysics. Đây là một phần mềm dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng các quá trình khác nhau dựa trên các modul có sẵn, đồng thời có thể kết hợp các mô hình với nhiều module cụ thể với nhau để trở thành mô phỏng đa mô hình. Phương pháp phần tử biên được đưa vào module Acoustics như một giao diện vật lý kể từ phiên bản 5.3a của phần mềm. Nó có thể được kết hợp liền mạch với các giao diện dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn để mô hình hóa các vấn đề tương tác âm học-cấu trúc. Dưới đây, chúng tôi sẽ sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics để xác định các đặc tính của biến tử áp điện loại Langevin cũng như mảng các biến tử áp điện này.

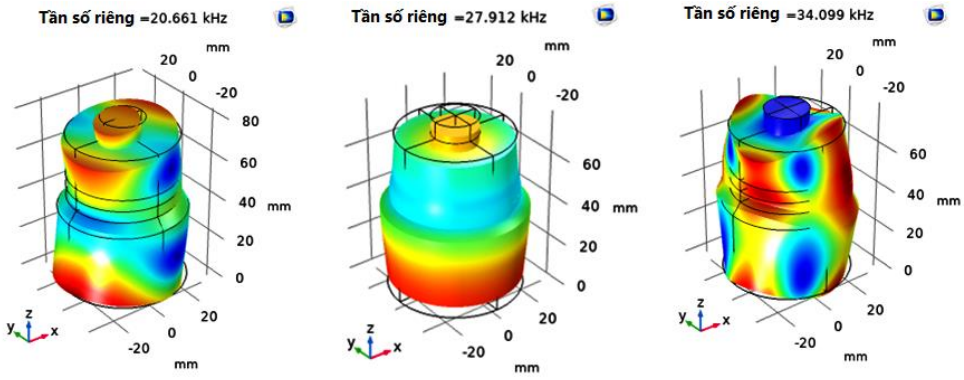
Biến tử Langevin được sử dụng trong mô phỏng gồm hai bản gốm áp điện PZT-8 được kẹp giữa phần đầu bằng nhôm và phần đuôi bằng thep bởi một bulong, hình dạng và kích thước của biến tử cho trên hình 2.



Hình 2. Hình dạng và kích thước (tính theo *mm*) của biến tử Langevin.

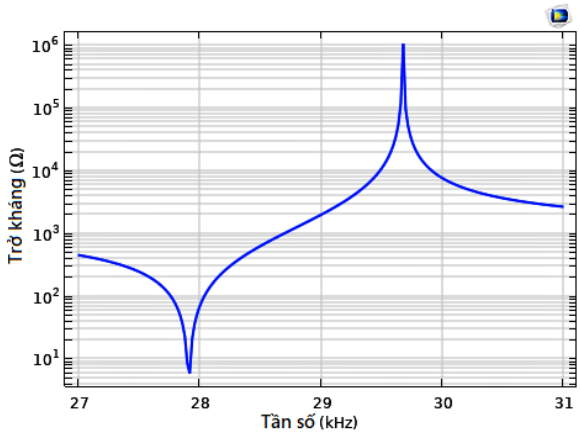
3.1. Xác định các đặc tính cơ, điện của biến tử.

Trên hình 3 là một số dạng dao động riêng của biến tử Langevin ứng với các tần số riêng khác nhau. Từ hình vẽ này ta thấy rằng, dao động ứng với tần số 27,9 kHz là dao động theo chiều dày, đây chính là kiểu dao động được sử dụng trong các máy rửa siêu âm.



Hình 3. Một số dạng dao động riêng của biến tử Langevin.

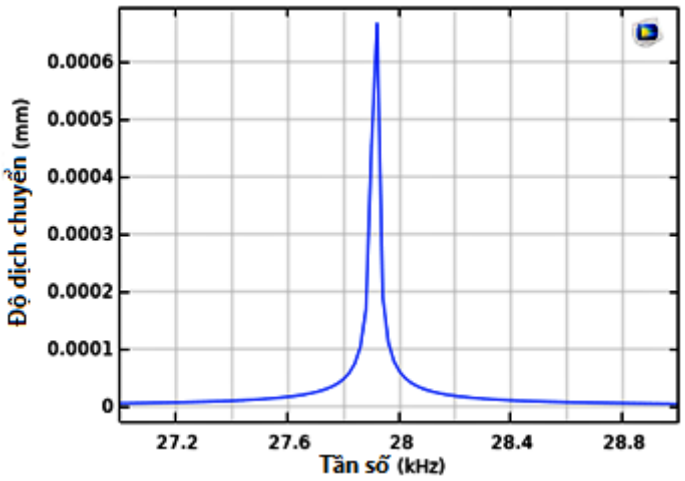
Để xác định các đặc trưng cơ, điện của biến tử, ta kích thích biến tử bằng nguồn điện áp xoay chiều với điện áp hiệu dụng 1V, có tần số biến thiên trong dải từ 10 kHz đến 40 kHz.



Hình 4. Sự phụ thuộc của trở kháng của biến tử vào tần số.

Trên hình 4 là đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của trở kháng (Impedance) của biến tử vào tần số. Từ đồ thị này, ta thấy rằng, trở kháng của biến tử đạt cực tiểu khi tần số của điện áp kích thích đạt giá trị $f_r = 27{,}9$ kHz, tần số này cũng chính là tần số riêng của biến tử.

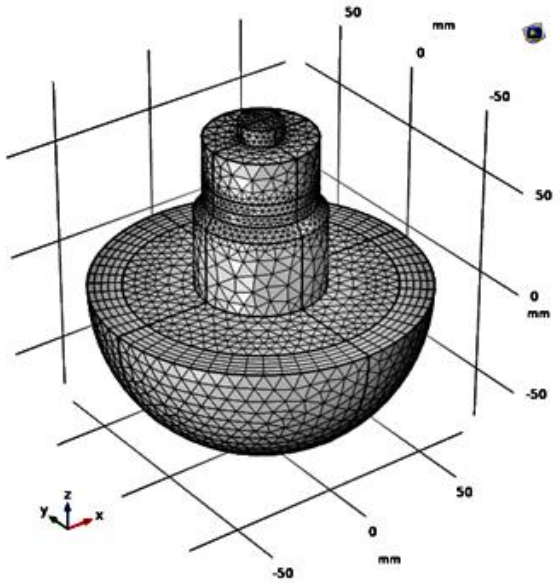
Sự phụ thuộc của độ dịch của biến tử ở mặt trước vào tần số của điện áp kích thích cho trên hình 5. Từ hình vẽ này ta thấy rằng độ dịch chuyển đạt cực đại tại tần số f_r, kết quả này hoàn toàn phù hợp với đồ thị trở kháng trên hình 4, khi trở kháng đạt cực tiểu thì biên độ dao động đạt cực đại.



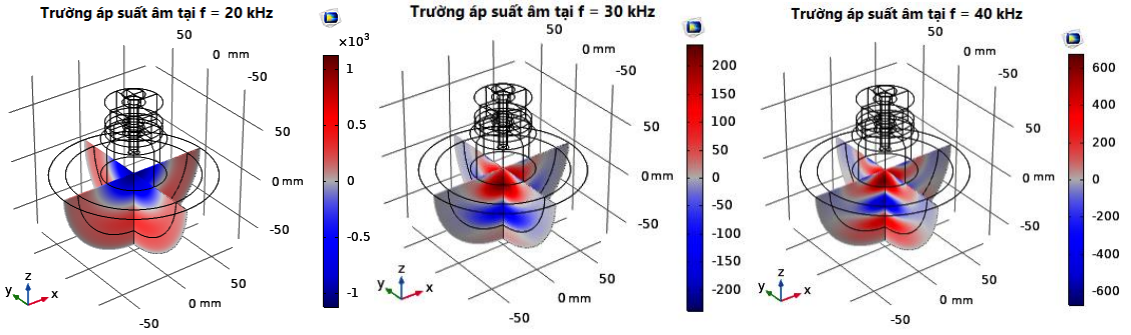
Hình 5. Sự phụ thuộc của độ dịch chuyển của mặt trước biến tử vào tần số.

3.2. Khảo sát các đặc tính âm học của biến tử.

Mô hình xác định các đặc tính âm học của biến tử cho trên hình 6. Ở đây miền tính toán trường âm do biến tử bức xạ vào môi trường nước có dạng bán cầu với bán kính $R_w = 60mm$. Trường âm ở ngoài miền này được xác định bằng kỹ thuật trường xa. Phân bố trường áp suất âm trong miền tính toán ở các tần số khác nhau cho trên hình 7.

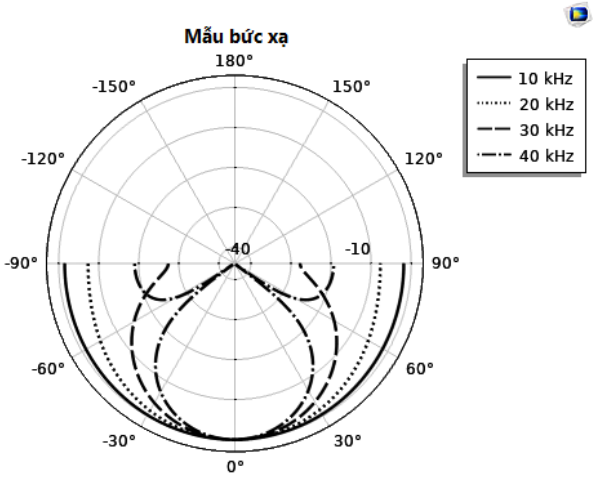


Hình 6. Mô hình biến tử, miền tính toán trường âm và lưới tính toán.



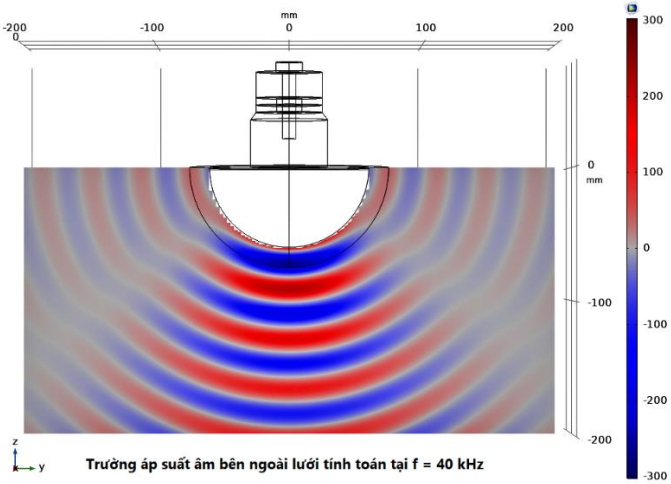
Hình 7. Trường áp suất âm trong miền tính toán ở các tần số khác nhau.

Tính định hướng của trường bức xạ được biểu thị qua đồ thị của mẫu bức xạ của trường áp suất âm ở các tần số khác nhau cho trên hình 8. Từ đồ thị này ta thấy rằng ở các tần số thấp, trường áp suất âm có tính đẳng hướng.



Hình 8. Mẫu bức xạ của trường áp suất âm ở các tần số khác nhau

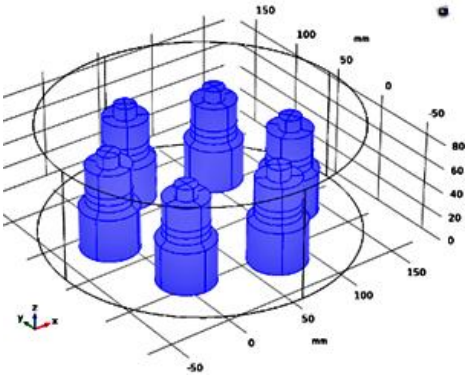
Trường áp suất âm ở ngoài lưới tính toán được xác định bằng kỹ thuật tính toán trường xa. Kỹ thuật này cho phép xác định trường áp suất âm ở khoảng cách bất kỳ bên ngoài lưới tính toán trong cả miền trường gần và trường xa. Trên hình 9 là trường áp suất âm toàn phần ở tần số 40 kHz ở trong và ngoài lưới tính toán được xác định bằng kỹ thuật trường xa.



Hình 9. Trường áp suất âm bên ngoài lưới tính toán xác định bằng kỹ thuật trường xa.

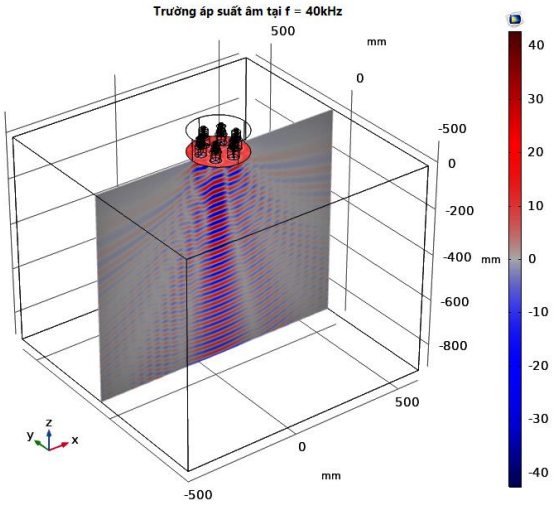
3.3. Khảo sát các đặc tính âm học của mảng các biến tử.

Trong phần này, chúng tôi khảo sát mảng hai chiều các biến tử Langevin gồm 6 biến tử phân bố đều trên chu vi của hình tròn như trên hình 10. Các đặc tính âm học của hệ được xác định bằng BEM.



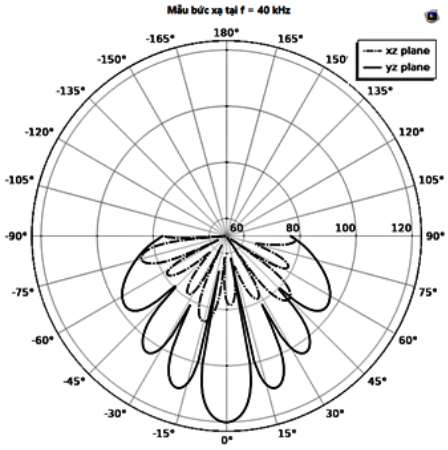
Hình 10. Mảng các biến tử Langevin.

Trường áp suất âm gây bởi mảng các biến tử ở tần số 40 kHz cho trên hình 11.

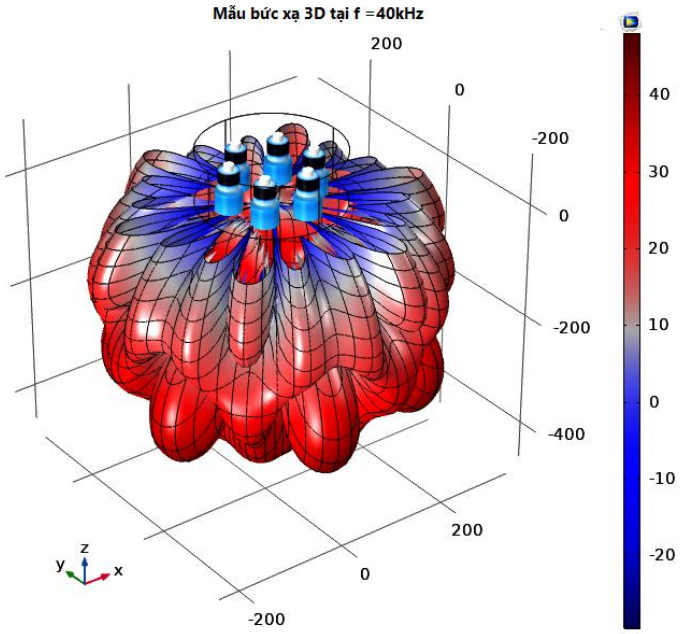


Hình 11. Trường áp suất âm gây bởi mảng các biến tử ở tần số 40 kHz.

Mẫu bức xạ trong các mặt phẳng xz và yz ở tần số 40 kHz cho trên hình 12 và đồ thị 3 chiều của nó cho trên hình 13. Từ các đồ thị này ta thấy rằng, trường bức xạ không có tính đẳng hướng.



Hình 12. Mẫu bức xạ trong các mặt phẳng xz và yz tại tần số $f = 40kHz$



Hình 13. Dạng ba chiều của mẫu bức xạ.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này chúng tôi đã sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics để khảo sát các đặc tính của biến tử áp điện loại Langevin. Chúng tôi đã xây dựng được các mô hình để khảo sát các đặc trưng của một biến tử đơn lẻ cũng như mảng các biến tử. Các mô hình này có thể được sử dụng trong thực tế để nghiên cứu thiết kế máy rửa siêu âm cũng như các hệ thống xử lý nước bằng siêu âm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. X. Liu, C. Wu, G. K. Padhy (2015). Characterization of plastic deformation and material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding. *Scripta Materialia,* Vol. 102. pp. 95-98.

[2]. G. Musielak, D. Mierzwa, J. Kroehnke (2016) Food drying enhancement by ultrasound - A review. *Trends in Food Science & Technology,* Vol. 56, pp. 126-141.

[3]. A. Cucheval, R. Chow (2008) A study on the emulsification of oil by power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*. Vol. 15. No.5, pp. 916-920.

[4]. O. Krasulya, V. Bogush, V. Trishina, I. Potoroko, S. Khmelev, P. Sivashanmugam, S. Anandan (2016) Impact of acoustic cavitation on food emulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*. Vol. 30, pp. 98-102.

[5]. T. Inoue, T. Nada, T. Tsuchiya, T. Nakanishi, T. Miyama, and M. Konno (1993) Tonpilz piezoelectric transducers with acoustic matching plates for underwater color image transmission. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. Vol. 40, pp. 121–129.

[6]. R. F. W. Coates (1991). The design of transducers and arrays for underwater data transmission. *IEEE J. Ocean. Eng.* Vol. 16, pp. 123–135.

[7]. S. G. Schock, L. R. Leblanc, and S. Panda (1994). Spatial and temporal pulse design considerations for a marine sediment classification sonar. *IEEE J. Ocean. Eng.* Vol.19, pp. 406 – 415.

[8]. R. F. W. Coates (1994). Underwater acoustic communication. *Sea Technol*. Vol.35, pp. 41 – 47.

[9]. S. W. Or, H. L. W. Chan, V. C. Lo, and C. W. Yuen (1998). Dynamics of ultrasonics transducers used for wire bondings. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 45, pp. 1453–1460.

[10]. L. Shuyu (1995). Study on the Multifrequency Langevin Ultrasonic Transducer. *Ultrasonics*. Vol. 33, pp. 445 – 448.

[12]. P.M. Morse, K.U. Ingard (1968). *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, 1968.

SIMULATION OF ULTRASONIC TRANSDUCER ARRAY USING COMSOL MULTIPHYSICS

Le Phuoc Dinh, Le Thi Dieu Hien, Le Ngoc Minh, Le Thi Ngoc Bao*

Faculty of Electronics, Electrical Engineering and Material Technology,

University of Sciences, Hue University

*Email: ltnbao@husc.edu.vn

ABSTRACT

In this paper, we use the Finite Element Method (FEM) and the Boundary Element Method (BEM) to simulate a two-dimensional array of Langevin piezoelectric transducers radiating into water. Using COMSOL Multiphysics software, we have determined the displacement field of the piezoelectric transducers, taking into account the acoustic interaction and the acoustics pressure field in the water environment. This model is a handy tool for optimizing the design of transducer arrays used in ultrasonic cleaners and ultrasonic devices for water treatment.

Keywords: Ultrasonic transducer array, FEM, BEM.

Lê Phước Định sinh ngày 15/10/1991 tại Thành phố Huế. Năm 2014, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý Chất rắn tại trường Đại học Khoa học,Đại học Huế. Năm 2017, ông tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn và hiện nay công tác tại trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: vật lý chất rắn, kỹ thuật siêu âm, mô phỏng...

Lê Thị Diệu Hiền sinh ngày 03/02/1989 tại thành phố Huế. Năm 2011, bà tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý Tiên tiến tại Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế. Năm 2013, bà tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý lý thuyết và vật lý toán tại trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế. Năm 2023 tốt nghiệp Tiến sĩ chuyên ngành Vật lý lý thuyết và Vật lý toán tại trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế. Hiện nay, bà giảng dạy tại trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật liệu có cấu trúc nano, mô phỏng lý thuyết.

Lê Ngọc Minh sinh ngày 06/12/1963 tại thành phố Nam Định. Năm 1985, ông tốt nghiệp Cử nhân khoa học ngành Vật lý tại Trường Đại học Tổng hợp Huế. Năm 1998, tốt nghiệp Thạc sỹ chuyên ngành Vật lý Chất rắn tại trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Từ 1985 đến nay là giảng viên của Khoa Vật lý, nay là Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật lý lý thuyết và vật lý toán.

Lê Thị Ngọc Bảo sinh ngày 31/10/1983 tại Huế. Năm 2006, bà tốt nghiệp Cử nhân khoa học ngành Vật lý tại Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Năm 2009, bà tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Vật lý lý thuyết và Vật lý toán tại trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế. Năm 2020, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Vật lý lý thuyết và Vật lý toán tại Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế. Hiện nay, bà là giảng viên của Khoa Vật lý, nay là Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật lý lý thuyết và vật lý toán.