

XÁC ĐỊNH TẦN SỐ CỘNG HƯỞNG CỦA BIẾN TỬ SIÊU ÂM CÔNG SUẤT KIỂU HỘI TỤ

Nguyễn Văn Thịnh^{1*}, Võ Thanh Tùng², Lê Phước Định², Lê Ngọc Minh²

^{1*}Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng

²Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

*Email: thinhhdhn@gmail.com

Ngày nhận bài: 16/6/2021; ngày hoàn thành phản biện: 21/6/2021; ngày duyệt đăng: 02/11/2021

TÓM TẮT

Biến tử siêu âm công suất hoạt động trong dải tần số từ 18 KHz đến 45 kHz. Tùy theo vật liệu, cấu tạo, tổng chiều dài của biến tử sẽ có tần số cộng hưởng riêng của biến tử siêu âm. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày các kết quả nghiên cứu: xây dựng mô hình biến tử siêu âm công suất kiểu hội tụ với vật liệu áp điện cứng PZT, xác định các thông số tương đương điện – cơ của biến tử, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn và chương trình COMSOL- Multiphysics để xác định tần số cộng hưởng và các thông số đặc trưng phụ thuộc theo tần số. Kết quả nghiên cứu đã xác định được tần số dao động cộng hưởng, độ dịch chuyển, công suất bức xạ và đặc tính của trường áp suất âm phát ra. Các kết quả này là cơ sở cho việc thiết kế, chế tạo, ứng dụng trong kỹ thuật siêu âm công suất cao.

Từ khóa. Biến tử siêu âm hội tụ, PZT, FEM, siêu âm công suất, Comsol Multiphysics.

1. MỞ ĐẦU

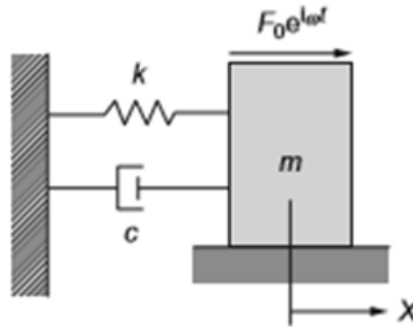
Biến tử siêu âm gồm áp điện là một linh kiện điện tử, bởi khi hoạt động các thông số cơ học tương đương các thông số điện của các phần tử thụ động R, L, C trong mạch dao động RLC, là phần tử chính dùng để chế tạo các thiết bị siêu âm công suất cao. Tùy theo vật liệu, mô hình thiết kế mà biến tử siêu âm sẽ có các thông số đặc trưng khác nhau. Để đạt được mục đích ứng dụng cụ thể cần phải xác định chính xác các thông số đặc trưng của biến tử siêu âm. Bằng cách xây dựng mô hình biến tử siêu âm công suất kiểu hội tụ gồm 6 bản gốm áp điện cứng PZT pha tạp, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trong môi trường vật liệu áp điện cứng PZT, chương trình COMSOL- Multiphysics để xác định tần số cộng hưởng, khảo sát sự phụ thuộc của các thông số

đặc trưng theo tần số. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để chọn vật liệu, phương án thiết kế và ứng dụng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình tương đương cơ – điện của biến tử siêu âm

Xét một hệ cơ học dao động cưỡng bức theo phương x, các thành phần gồm có: vật có khối lượng m, lò xo có độ cứng k, thành phần gây tổn hao có sức cản c, năng lượng cơ học sinh ra của vật m khi dịch chuyển theo phương x có giá trị là $F_0 e^{i\omega t}$ [1].



Hình 1. Mô hình hệ cơ học dao động cưỡng bức

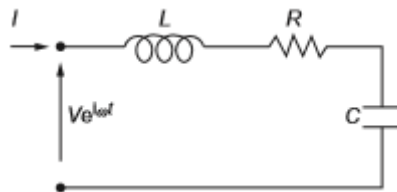
Phương trình chuyển động của hệ cơ học.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -c \frac{dx}{dt} - kx + F_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

Chia 2 vế cho m và đặt $2\zeta = c/m$, $\omega_n^2 = k/m$, ta được phương trình tương đương sau.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\zeta \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = \frac{F_0}{m} e^{i\omega t} \quad (2)$$

Xét mạch điện gồm các thành phần R, L, C mắc nối tiếp, cường độ dòng điện I, điện áp đặt vào có giá trị $V_0 e^{i\omega t}$.



Hình 2. Mạch điện RLC mắc nối tiếp

Phương trình điện áp của mạch RLC mắc nối tiếp.

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{i}{C} \int I dt = V_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

Phương trình chuyển động của hệ cơ học (1) dưới dạng vận tốc, với $v = dx/dt$.

$$m \frac{dv}{dt} + cv + \int v dt = F_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

So sánh phương trình (3) với (4) ta thấy, có sự tương đương giữa các thông số điện – cơ.

$$L \sim m, R \sim c, I \sim v, V \sim F, 1/C \sim k \quad (5)$$

Sự tương đương của các thông số điện – cơ trong phương trình điện áp (3) và phương trình biểu diễn vận tốc (4) cho thấy, mô hình hệ cơ dao động cưỡng bức biểu diễn dao động của biến tử siêu âm (hình 1) tương đương với mạch dao động RLC mắc nối tiếp (hình 2).

Trở kháng điện và trở kháng cơ lần lượt là: $Z_e = V/I, Z_m = F/v$.

Trở kháng thành phần R, L, C là: $Z_L = i\omega L, Z_R = R, Z_C = 1/i\omega C$.

Tổng trở kháng điện của mạch RLC nối tiếp là.

$$Z_e = R + i\omega L + 1/i\omega C \quad (6)$$

Từ (5) và (6) ta dẫn ra biểu thức tổng trở kháng cơ là.

$$Z_m = c + i\omega m + k/i\omega \quad (7)$$

Hai phương trình (6) và (7) là cơ sở để thiết kế mô phỏng và phối hợp trở kháng khi thiết kế mạch điện tử kích cho biến tử siêu âm. Đặc biệt, từ 2 phương trình này xác định được tần số dao động cộng hưởng của biến tử siêu âm, tần số của nguồn tín hiệu bằng tần số dao động của biến tử [1].

2.2. Các hệ phương trình vật lý toán mô tả động lực học của biến tử siêu âm

Biến tử áp điện hoạt động dựa trên hiệu ứng áp điện để chuyển đổi tín hiệu điện thành dao động cơ học. Hiệu ứng áp điện được mô tả bằng các tensor ứng suất T, tensor biến dạng S, liên hệ với điện trường và cảm ứng điện theo các phương trình [2, 3].

$$\mathbf{S} = s^E \mathbf{T} + d^t \mathbf{E} \quad (8)$$

$$\mathbf{D} = d^t \mathbf{T} + e^T \mathbf{E} \quad (9)$$

Phương trình (8) mô tả biến dạng cơ học S của phần tử áp điện khi có tác dụng của ứng suất cơ học T, điện trường E. Quan hệ giữa hai đại lượng cơ học được xác định thông qua ma trận hệ số đàn hồi s^E , các đại lượng điện và cơ liên hệ với nhau bởi ma trận hằng số áp điện d^t . Cảm ứng điện được xác định bởi phương trình (8), trong đó các hệ số áp điện d_{ij} và ma trận hằng số điện môi ϵ^T xác định quan hệ giữa các đại lượng điện và cơ học.

Trong hai phương trình trên, \mathbf{S} và \mathbf{T} là các ma trận 6×1 , \mathbf{E} và \mathbf{D} là các ma trận 1×3 , s^E là ma trận 6×6 , d là ma trận 3×6 (d^T là ma trận chuyển vị của d) còn ε^T là ma trận 3×3 .

Biến tử Langevin hoạt động trong 33-mode, hệ phương trình (7) và (8) trở thành [2].

$$\begin{cases} S_1 = s_{13}^E T_{3+} + d_{31} E_3 & (a) \\ S_2 = s_{23}^E T_{3+} + d_{32} E_3 & (b) \\ S_3 = s_{33}^E T_{3+} + d_{33} E_3 & (c) \\ D_3 = d_{33} T_{3+} + \varepsilon_{33}^T E_3 & (d) \end{cases} \quad (10)$$

Phương trình (10c) và (10d) là hai phương trình cơ bản của biến tử.

Khi biến tử dao động trong chất lỏng nó tạo ra một trường âm. Trường âm trong chất lỏng được mô tả bởi áp suất âm thỏa mãn phương trình [3].

$$\frac{1}{\rho_0 v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \left[-\frac{1}{\rho_0} \nabla p - q \right] \quad (11)$$

Trong đó: ρ_0 là mật độ chất lỏng, v là vận tốc âm trong môi trường, \mathbf{q} và \mathbf{p} lần lượt là các nguồn âm đơn cực và lưỡng cực.

Các đặc trưng âm học của biến tử Langevin trong chất lỏng bao gồm [2, 3].

Trở kháng âm riêng (Specific Acoustic Impedance) Z_{aco} xác định bởi công thức:

$$Z_{aco} = \frac{1}{Z_0} \frac{\iint_S p dS}{\iint_S v_n dS'} \quad (12)$$

Trong đó: Z_0 là trở kháng đặc trưng của chất lỏng và có giá trị bằng tích của mật độ của chất lỏng và vận tốc âm trong chất lỏng tại nhiệt độ 293,15 K, v_n là thành phần pháp tuyến của vận tốc tại mặt tiếp xúc với chất lỏng.

Tổng công suất âm phát xạ trên mặt biến tử được xác định bởi công thức.

$$P_{tot} = \iint_{(S)} \vec{I} d\vec{S} \quad (13)$$

Trong đó I là cường độ âm hiệu dụng trên mặt phát xạ S của biến tử.

3. THỰC NGHIỆM

3.1. Các thông số vật liệu mô phỏng biến tử siêu âm kiểu hội tụ

Vật liệu áp điện sử dụng ở đây là PZT – 4, các khối kim loại và vít làm bằng thép, nhôm hoặc titan. Các tính chất của vật liệu được cho trong bảng 1 và 2 [4, 5].

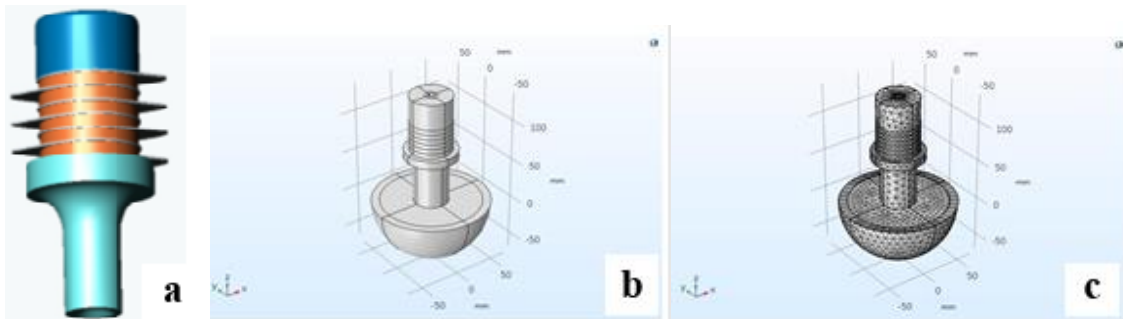
Bảng 1. Mật độ khối lượng, modul Young, tỷ số Poisson của thép, nhôm, titan và PZT-4

Vật liệu	Mật độ (kg/m ³)	Modul Young (Gpa)	Tỷ số Poisson
Thép	7850	205	0,28
Nhôm	2700	70	0,33
Titan	4506	115,7	0,321
PZT- 4	7500	65	0,34

Bảng 2. Các hệ số vật liệu của gốm PZT – 4

e_{ij}^T / e_0		d_{ij} (pC/N)				
e_{33}^T / e_0	d_{15}	d_{24}	d_{31}	d_{32}	d_{33}	
1300	496	496	-123	-123	289	
s^E (10 ⁻¹² m ² /N)						
s_{13}^E	s_{22}^E	s_{23}^E	s_{33}^E	s_{44}^E	s_{55}^E	s_{66}^E
-5,31	12,3	-5,31	15,5	39	39	32,7

3.2. Xây dựng mô hình biến tử siêu âm kiểu hội tụ

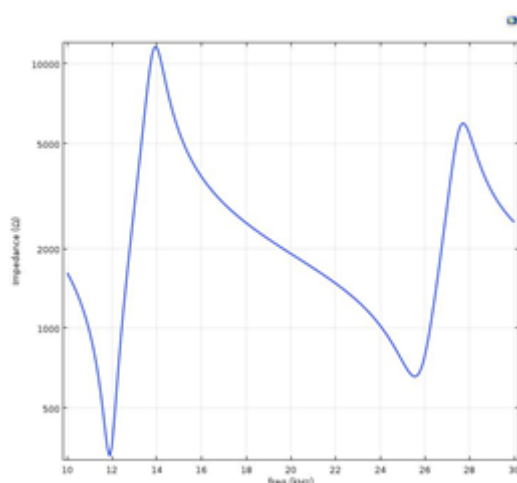


Hình 3. Hình thực (a), mô hình 3D (b), mô hình chia lưới (c) của biến tử siêu âm kiểu hội tụ

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Xác định tần số cộng hưởng

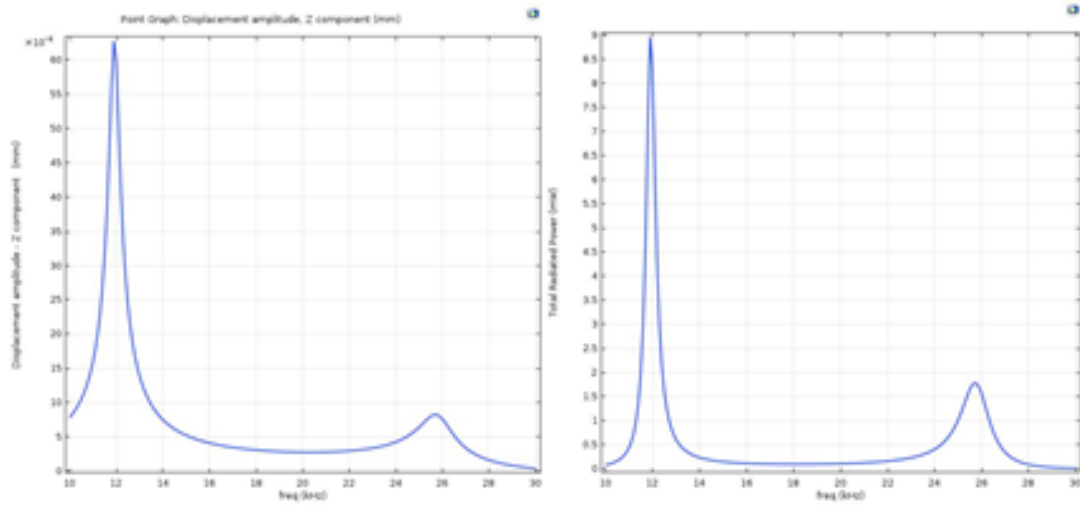
Để xác định tần số cộng hưởng cần khảo sát sự phụ thuộc trở kháng theo tần số, tiến hành mô phỏng trong dải tần số từ 10 kHz đến 30 kHz. Hình 4 cho thấy tại tần số 11,9 kHz và 25,7 kHz trở kháng đạt cực tiểu, tại tần số 13,9 kHz và 27,5 kHz trở kháng cực đại. Tại các giá trị trở kháng cực tiểu xác định được tần số cộng hưởng, tại các giá trị có trở kháng cực đại xác định được tần số phản cộng hưởng. Điều này hoàn toàn phù hợp với các thông số điện của mạch điện tử hoạt động với nguồn tín hiệu xoay chiều, hiện tượng cộng hưởng sẽ xảy ra khi trở kháng của mạch đạt cực tiểu. Ngoài ra, tại hình 4 còn cho thấy dải tần số từ 11,9 kHz đến 25,7 kHz trở kháng giảm dần từ cực đại đến cực tiểu, đây cũng là dải tần số có khả năng xảy ra cộng hưởng với điều kiện phối hợp trở kháng thích hợp. Kết quả này là cơ sở để xác định tần số cộng hưởng, thiết kế, phối hợp trở kháng, chế tạo mạch điện tử kích thích cho biến tử siêu âm hoạt động [5].



Hình 4. Sự phụ thuộc trở kháng theo tần số

4.2. Độ dịch chuyển và công suất bức xạ của biến tử theo tần số.

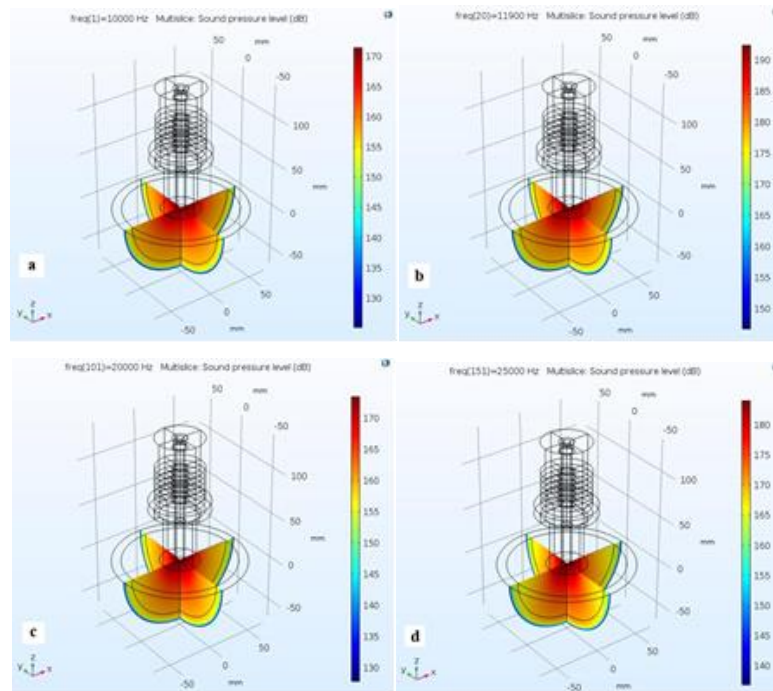
Theo hình 5, độ dịch chuyển và công suất bức xạ của biến tử đạt cực đại tại tần số 11,9 kHz và 25,7 kHz. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với sự phụ thuộc trở kháng theo tần số (hình 4), cụ thể hiện tượng cộng hưởng đã xảy ra tại hai tần số này. Đây là cơ sở ban đầu cho thấy thông tin về sự phụ thuộc của trở kháng theo tần số sẽ cho phép xác định được tần số cộng hưởng của biến tử [6].

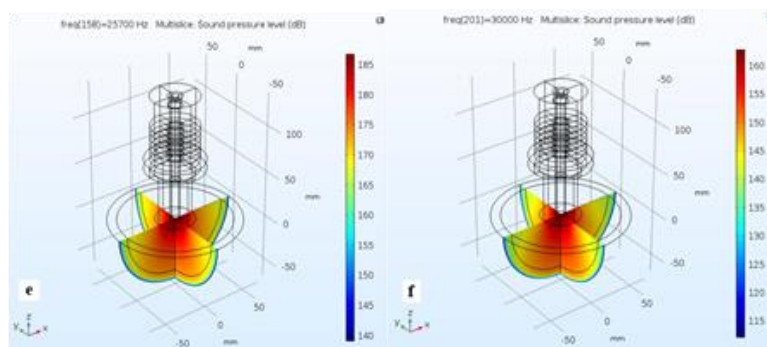


Hình 5. Độ dịch chuyển (trái), công suất bức xạ (phải) của biến tử.

4.3. Mức áp suất âm phát ra trong môi trường nước trước biến tử

Sau khi đã xác định được tần số cộng hưởng, độ dịch chuyển, công suất bức xạ của biến tử. Chúng tôi tiếp tục khảo sát mức áp suất âm phát ra từ biến tử theo các tần số khác nhau, giả thiết mặt trước biến tử là môi trường nước.





Hình 6. Mức áp suất âm trong môi trường nước phía trước biển từ

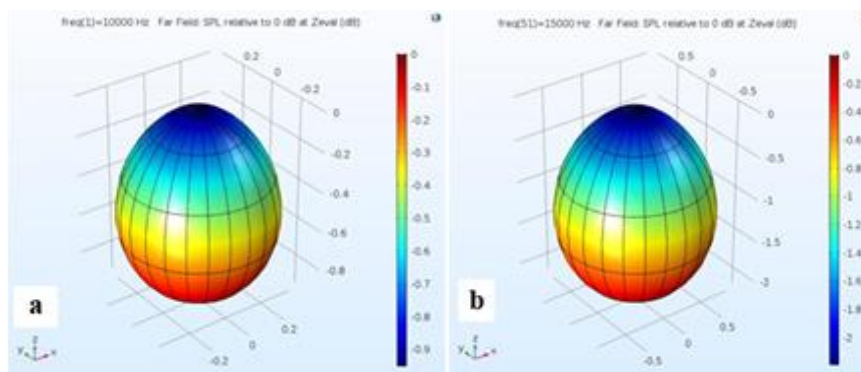
Theo hình 6 giá trị mức áp suất âm theo tần số hiển thị trên thước đo của giao diện được biểu diễn tại bảng 3. Mức áp suất âm đạt giá trị lớn nhất tại tần số 11,9 kHz (hình 6b) và 25,7 kHz (hình 6e). Qua đây cho thấy sự đồng nhất giữa các kết quả: đặc tính trở kháng, độ dịch chuyển, công suất bức xạ và mức áp suất âm của biển từ tại tần số 11,9 kHz và 25,7 kHz

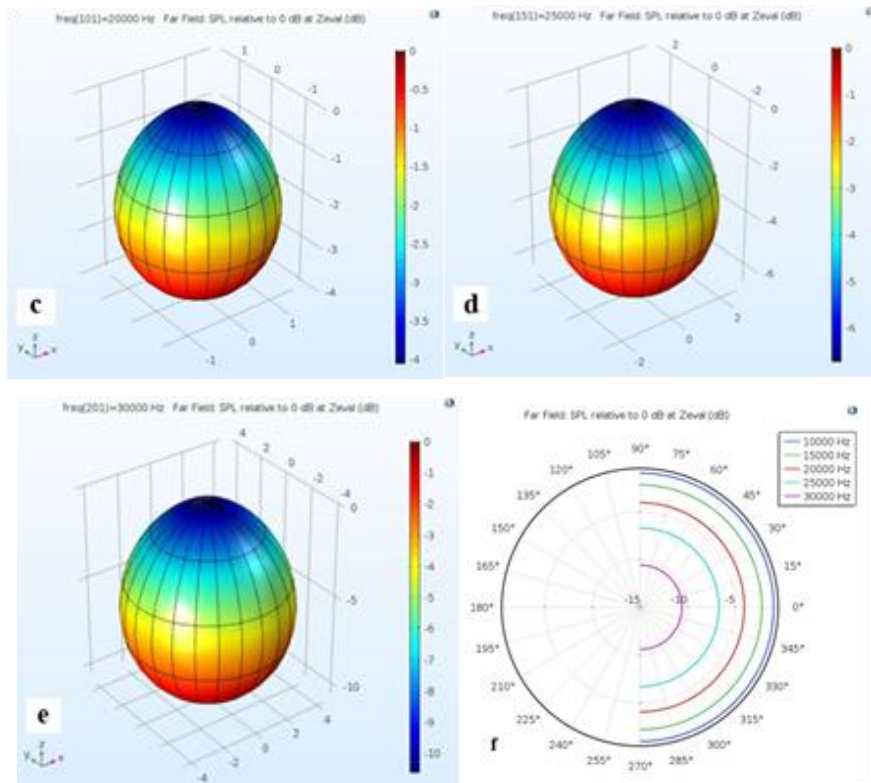
Bảng 3: Sự phụ thuộc mức áp suất âm theo tần số

Hình 6	Tần số (kHz)	Mức áp suất âm (dB)
a	10	170
b	11,9	190
c	20	170
d	25	180
e	25,7	185
f	30	160

4.4. Đặc tính trường áp suất âm do biển từ phát ra

Khảo sát đặc tính trường áp suất âm phát ra trong môi trường nước giả lập, bằng đồ thị 3D và đồ thị dạng cực độ nhạy chùm trong dải tần số từ 10 kHz đến 30 kHz, hình 7.





Hình 7. Trường áp suất âm phát ra trong môi trường nước phía trước biển từ

Đặc tính trường âm do biển từ phát ra có tính đẳng hướng trong dải tần số khảo sát, đây cũng là kết quả mong đợi cho thấy trường âm do biển từ phát ra đủ lớn để không xảy ra tính dị hướng. Theo nguyên lý truyền sóng, khi xảy ra tính dị hướng luôn tồn tại các sóng phụ đối xứng hai phía búp sóng chính, dẫn đến suy giảm khả năng truyền sóng tại trường xa, vì công suất bức xạ của biển từ là không đổi [7-10].

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, mô hình tương đương điện cơ của biển từ siêu âm đã được thiết lập. Từ đó, các đại lượng điện của biển từ siêu âm hoạt động với nguồn tín hiệu xoay chiều được xác định. Các phương trình vật lý – toán mô tả quá trình động học của biển từ siêu âm cũng đã được xây dựng.

Kết quả mô phỏng đã xây dựng mô hình biển từ siêu âm kiểu hội tụ trên cơ sở 6 bản gồm áp điện Langevin, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn và phần mềm Comsol – Multiphysics để mô phỏng hoạt động của biển từ.

Kết quả đã xác định được tần số cộng hưởng của biển từ siêu âm hoạt động trong miền tần số thấp tại hai tần số 11,9 kHz và 25,7 kHz.

Việc khảo sát độ dịch chuyển, công suất bức xạ, mức áp suất âm và đặc tính trường áp suất âm phát ra trong môi trường nước giả lập đã được tiến hành nhằm đánh giá các đặc trưng của biến tử hoạt động tại hai tần số này. Các kết quả khảo sát thể hiện tính đồng nhất tại tần số cộng hưởng. Nghiên cứu này là cơ sở để chế tạo biến tử siêu âm công suất cao kiểu hội tụ và ứng dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K.F. Graff EWI, Columbus, OH, USA. Power ultrasonic transducers: principles and design.
- [2]. T.J. Mason, J.P. Lorimer (2002). Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA.
- [3]. A.S. Peshkovsky, S.L. Peshkovsky. Acoustic cavitation theory and equipment design principles for industrial applications of high-intensity ultrasound (Physics Research and Technology) Nova Science Publishers, Hauppauge, NY. 2010.
- [4]. E. Heikkola, K. Miettinen, P. Nieminen. Multiobjective optimization of an ultrasonic transducer using NIMBUS, Ultrasonics. 2006; Vol: 44, 368–380.
- [5]. A. Bangviwat, H.K. Ponnekanti, R.D. Finch. Optimizing the performance of piezoelectric drivers that use stepped horns, J. Acoust. Soc. Am. 1991; Vol: 90, 1223–1229.
- [6]. K. Adachi, S. Ueha. Modal vibration control of large ultrasonic tools with the use of wave-trapped horns, J. Acoust. Soc. Am. 1990; Vol: 87, pp. 208–214.
- [7]. T.J. Mason. Sonochemistry and sonoprocessing: the link, the trends and (probably) the future, Ultrason. Sonochem. 2003; Vol: 10, 175–179.
- [8]. A.S. Peshkovsky, S.L. Peshkovsky. "Industrial-scale processing of liquids by high-intensity acoustic cavitation-the underlying theory and ultrasonic equipment design principles", Sonochemistry: Theory Reactions and Syntheses, and Applications, Nova Science publishers. 2010; 63 -104.
- [9]. S.L. Peshkovsky, A.S. Peshkovsky. Matching a transducer to water at cavitation: acoustic horn design principles, Ultrason. Sonochem. 2017; Vol: 14, 314–322.
- [10]. S.L. Peshkovsky, A.S. Peshkovsky. Shock-wave model of acoustic cavitation, Ultrason. Sonochem. 2008; Vol: 15, 618–628.

DETERMINE THE RESONANCE FREQUENCY OF THE CONVERGING ULTRASONIC TRANSDUCER

Nguyen Van Thinh^{1*}, Vo Thanh Tung², Le Phuc Dinh², Le Ngoc Minh²

^{1*}University of Technology and Education, The University of Danang

²University of Sciences, Hue University

Email: thinhhdhn@gmail.com

ABSTRACT

The power ultrasonic transducer operates in range of frequencies from 18 KHz to 45 kHz. Depending on the material, the transducer structure has the characteristic parameters that are suitable for each application. The research results in this paper: building the power ultrasound transducer model from the PZT hard piezoelectric materials and using finite element method and COMSOL- Multiphysics program to determine characteristic parameters. The research result has identified resonant oscillation frequency, the transducer displacement and the characteristics of the sound pressure emanating from the ultrasound transducer. These results are fundamental for the designing and applying in the high power ultrasound techniques.

Keywords: Converging ultrasonic transducer, FEM, Comsol Multiphysics PZT, power ultrasonic.



Nguyễn Văn Thịnh sinh ngày 24/11/1968 tại Quảng Trị. Năm 1996, ông tốt nghiệp Cử nhân ngành Vật lý tại Trường Đại học Khoa học – Đại học Huế; năm 2008 ông tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điện tử tại Đại học Đà Nẵng. Hiện nay ông đang công tác tại Khoa Điện-Điện tử Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng.

Lĩnh vực nghiên cứu: Kỹ thuật điện tử, Vật liệu áp điện, kỹ thuật siêu âm công suất cao, kỹ thuật lập trình vi xử lý, xử lý tín hiệu số, ...



Võ Thanh Tùng sinh ngày 17/07/1979 tại Quảng Bình. Năm 2001, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý Chất rắn tại Trường Đại học Tổng hợp Huế. Năm 2004, ông tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn; năm 2009, ông tốt nghiệp tiến sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn tại Belarus. Năm 2015, ông được phong hàm PGS và hiện nay là Hiệu trưởng Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật liệu áp điện, kỹ thuật siêu âm, mô phỏng lý thuyết, kỹ thuật vi xử lý và ứng dụng, xử lý tín hiệu số...



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 Ngọc Minh sinh ngày 06/12/1963 tại Nam Định. Năm 1985, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý lý thuyết tại trường Đại học Tổng hợp Huế. Năm 1998, 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: lý thuyết chất rắn, vật lý tính toán, kỹ thuật siêu âm, mô phỏng ...