

ANALIZA NUMERICĂ A UNUI TRADUCTOR PIEZOELECTRIC DE ULTRASUNET

Yelda VELI¹, Florin SĂFTOIU² și Alexandru M. MOREGA^{1,3}

¹Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Națională de Științe și Tehnologie
POLITEHNICA București

²Școala Doctorală de Inginerie Electrică, Universitatea Națională de Științe și Tehnologie
POLITEHNICA București

³Institutul de Statistică Matematică și Matematică Aplicată "Gh. Mihoc – C. Iacob",
Academia Română

yelda.veli@upb.ro¹, florinsaftoiu@gmail.com², amm@iem.pub.ro^{1,3}

Rezumat. Lucrarea prezintă analiza numerică a unui traductor piezoelectric de ultrasunet destinat aplicațiilor biologice de microcavitație. Se analizează numeric sursa de ultrasunet în variantă bidimensională, simplificată, cu simetrie axială. Se determină frecvențele naturale, modurile proprii ale deformării asociate acestor frecvențe naturale, respectiv frecvența de rezonanță. Pentru studiul în regim dinamic se consideră alimentarea straturilor piezoceramice la o tensiune sinusoidală la frecvența de rezonanță determinată anterior.

1. INTRODUCERE

Metodele de prelucrare a materiei organice și anorganice se regăsește în diverse domenii, chimie, fizică, inginerie medicală [1,2], ecologică [3,4] și industrială [5,6], însă metodele indirecte, realizate în câmp magnetic, optic sau acustic, sunt de preferat atunci când se dorește prelucrarea particulelor la scară nanoscopică [8], față de metodele directe în care procedeul se realizează prin contact mecanic direct și accentuează riscul de contaminare a substanței de probă [7,9]. În aplicațiile biologice de prelucrare a materiei organice se utilizează preponderent, ca sursă a câmpului acustic, traductoarele piezoelectrice de ultrasunet (US). Fiecare aplicație în parte dictează gama de frecvențe în care va funcționa dispozitivul US [10]. Astfel, pentru aplicațiile industriale, traductoarele US funcționează în gama 30 – 500 kHz, când discutăm de aplicații de microcavitație și tratamente de modificare a structurii membranelor celulare biologice, gama frecvențelor se regăsește în intervalul 20 kHz – 100 kHz [10-11], iar în aplicații medicale frecvența de lucru poate atinge și valori de 1,5 MHz [2].

Structura unui traductor include stratul de suport, stratul piezoelectric și cel de cuplare. Când se aplică un impuls electric asupra stratului piezoelectric, se generează o undă de presiune, atât frontal cât și în spatele stratului. Unda de presiune generată către spatele stratului piezoelectric va fi absorbită de stratul de suport, pe când o bună parte din unda de presiune generată frontal va fi pierdută datorită nepotrivirii impedanței acustice dintre stratul piezoelectric și obiectele întâlnite în traseul de propagare a undei.

Așadar, stratul de cuplare se aplică între stratul piezoelectric și domeniul de lucru pentru a reduce pierderile de presiune datorate nepotrivirii impedanței acustice [12]. Se va utiliza un sonotrod, cu rol de cuplare, care se va atașa de un capăt de traductorul de US, cu rol de sursă a câmpului acustic, iar celălalt capăt va fi imersat în substanța de probă care urmează a fi prelucrată.

Lucrarea prezintă analiza numerică a unui traductor piezoelectric de ultrasunet destinat aplicațiilor de microcavitație a materiei biologice. Se studiază doar câmpul electric – câmpul de deformare mecanică structurală, câmpul acustic și propagarea sunetului prin mediul și substanța de probă nu se consideră în acest studiu.

Se evaluează frecvențele naturale, respectiv modurile de deformare ale dispozitivului și se identifică frecvența de rezonanță utilizată ulterior în studiul tranzitoriu.

2. DOMENIUL DE CALCUL

Domeniul de calcul bidimensional, axisimetric, al traductorului ultrasonic, cu toate componentele sale, este prezentat în Fig. 1. Sunt menționate și condițiile la limită pentru problema de deformare mecanică, prin săgeți de culoare verde.

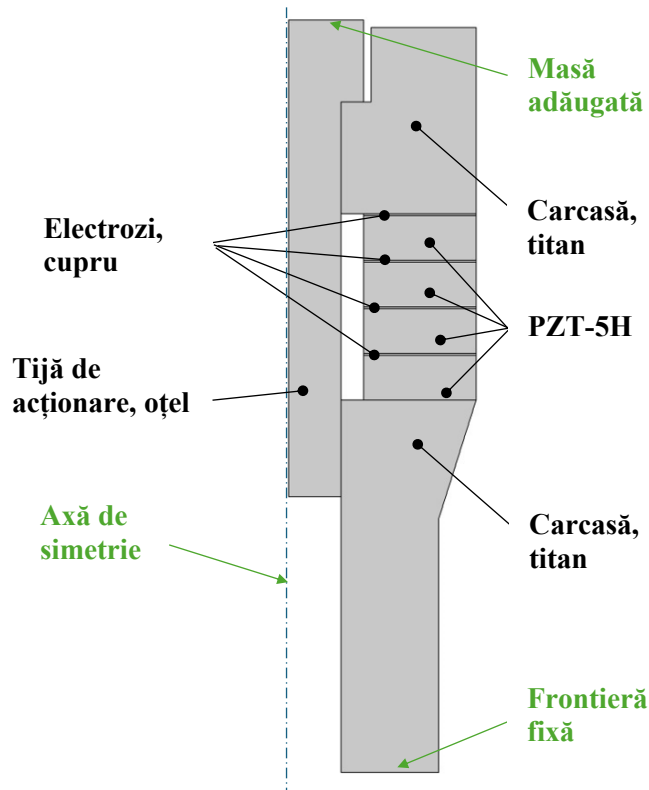


Fig. 1. Domeniul de calcul și componentele dispozitivului piezoelectric.

În problema mecanică se consideră masa sonotrodului pe unitatea de suprafață aplicată ca condiție la limită.

3. MODELUL MATEMATIC

Calculul numeric se realizează considerând relațiile piezoelectrice constitutive, sub formularea dată de solicitare mecanică – tensiune, astfel:

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}_d \mathbf{S} - \mathbf{q}^t \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = -\mathbf{q} \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}_s^{-1} \mathbf{D} \end{cases} \quad (1)$$

unde: \mathbf{T} [N/m^2] este vectorul solicitării mecanice, \mathbf{c}_d [N/m^2] reprezintă matricea rigidității mecanice, \mathbf{S} este vectorul deformării mecanice, \mathbf{q}^t [N/C] reprezintă transpusa matricii coeficienților piezoelectrice de cuplare, \mathbf{D} [C/m^2] este inducția electrică, \mathbf{E} [V/m] este vectorul intensității câmpului electric, iar $\boldsymbol{\varepsilon}$ [F/m] este permitivitatea electrică la deformare constantă.

Modelul matematic este completat de legile corespunzătoare câmpului electric:

Legea conservării sarcinii electrice

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (2)$$

Legea conducției electrice

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (3)$$

Legea fluxului electric

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v, \quad (4)$$

Consecință a legii inducției electromagnetice

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad (5)$$

Legea de material

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (6)$$

unde: \mathbf{J} [A/m^2] este densitatea curentului electric, σ [S/m] este conductivitatea electrică, ρ_v [C/m^3] este densitatea volumetrică a sarcinii electrice, V [V] reprezintă potențialul electric, iar \mathbf{P} [C/m^2] este polarizarea electrică. Condițiile la limită sunt redată în Fig. 1 (deformare mecanică structurală), respectiv în Fig. 2 (câmp electrostatic).

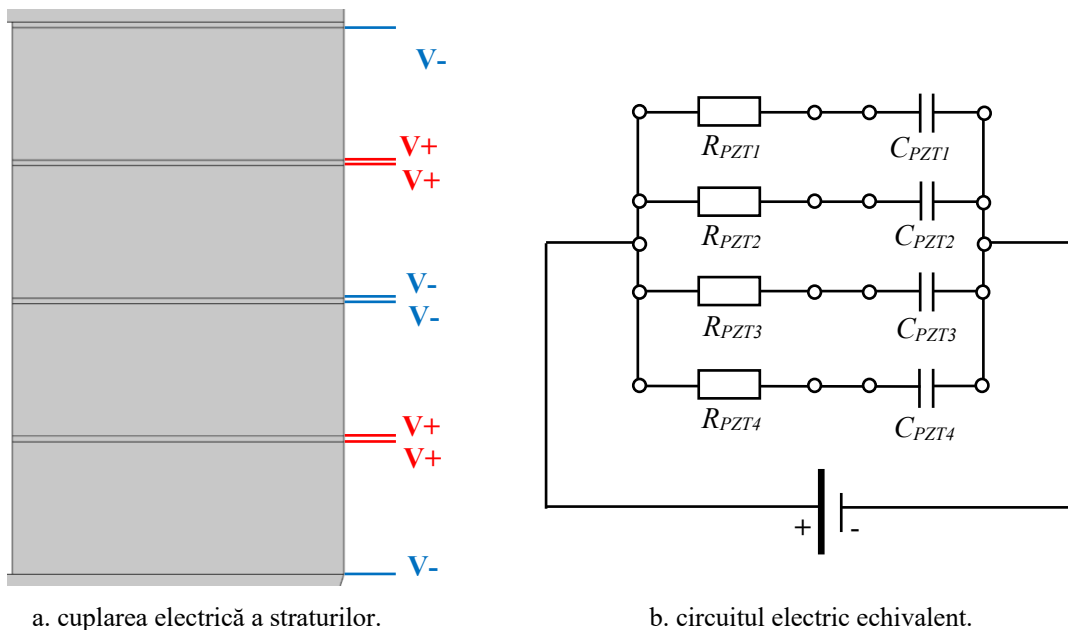


Fig. 2. Conexiunea electrică și circuitul electric echivalent a straturilor piezoelectrice, PZT-5H.

Straturile PZT sunt cuplate electric în paralel, iar circuitul electric echivalent ține seamă de componenta rezistivă, R_{PZT} , respectiv capacitivă, C_{PZT} , a fiecărui strat în parte.

4. REZULTATE ȘI DISCUȚII

În Fig. 3 sunt prezentate cele două moduri de deformare.



a. $f_{n1} = 8,840$ kHz.

b. $f_{n2} = 27,571$ kHz.

Fig. 3. Modurile proprii de deformare ale frecvențelor naturale.

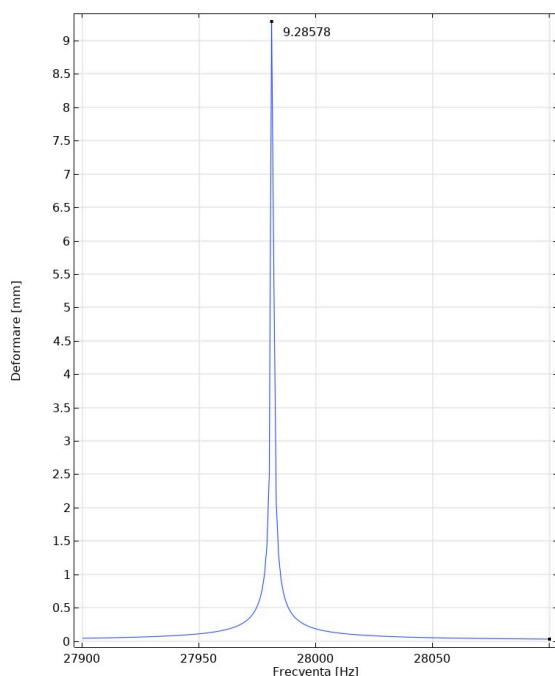
Modurile de deformare corespund extensiei și comprimării dispozitivului ultrasonic, atunci când se consideră atașat sonotrodul de capătul superior al traductorului. Frecvențele naturale și cea de rezonanță pentru traductorul PZE US cu și fără masa sonotrodului adăugată (Fig. 1) sunt incluse în Tabelul 1.

Tabelul 1. Frecvențele naturale și de rezonanță, cu și fără masa sonotrodului adăugată.

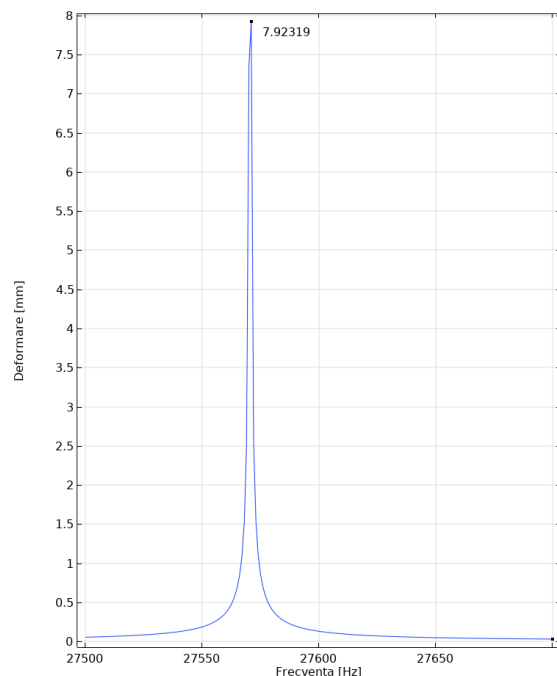
	Frecvența naturală, f_n [Hz]	Frecvența de rezonanță, f_r [Hz]
Fără masă	8956,3	27992
	27981	
	37915	
	40192	
	47441	
	54782	
Cu masă	8840	27576
	27571	
	36636	
	40163	
	46581	
	54338	

Se constată că frecvențele naturale, respectiv cele de rezonanță, scad atunci când se consideră sonotrodul atașat de capătul superior al traductorului US.

În Fig. 4 este reprezentată deformarea tijei de acționare în funcție de frecvență pentru ambele variante, cu și fără masa sonotrodului.



a. fără masa sonotrodului, $d_{max} = 9,29$ mm.



b. cu masa sonotrodului, $d_{max} = 7,92$ mm.

Fig. 4. Deformarea tijei de acționare în funcție de frecvență.

Efectul sonotrodului care se atașează de capătul superior al traductorului piezoelectric, apăsă pe acesta, determină scăderea deformării maxime ale tijei de acționare. Tija de acționare

se va deforma și va acționa asupra sonotrodului care va transmite și focaliza mai departe unda de ultrasunet.

Pentru realizarea studiului tranzitoriu, în regim cvasi-staționar, se consideră o tensiune sinusoidală la frecvența de rezonanță $f_{r2} = 27,576$ kHz și amplitudinea de 400 V pentru alimentarea straturilor piezoceramice. Alimentarea straturilor PZT-5H se realizează prin condiție pe frontieră, pe suprafețele straturilor (Fig. 2,a). În Fig. 6 este prezentată tensiunea de alimentare sinusoidală a straturilor, respectiv deformarea tije de acționare.

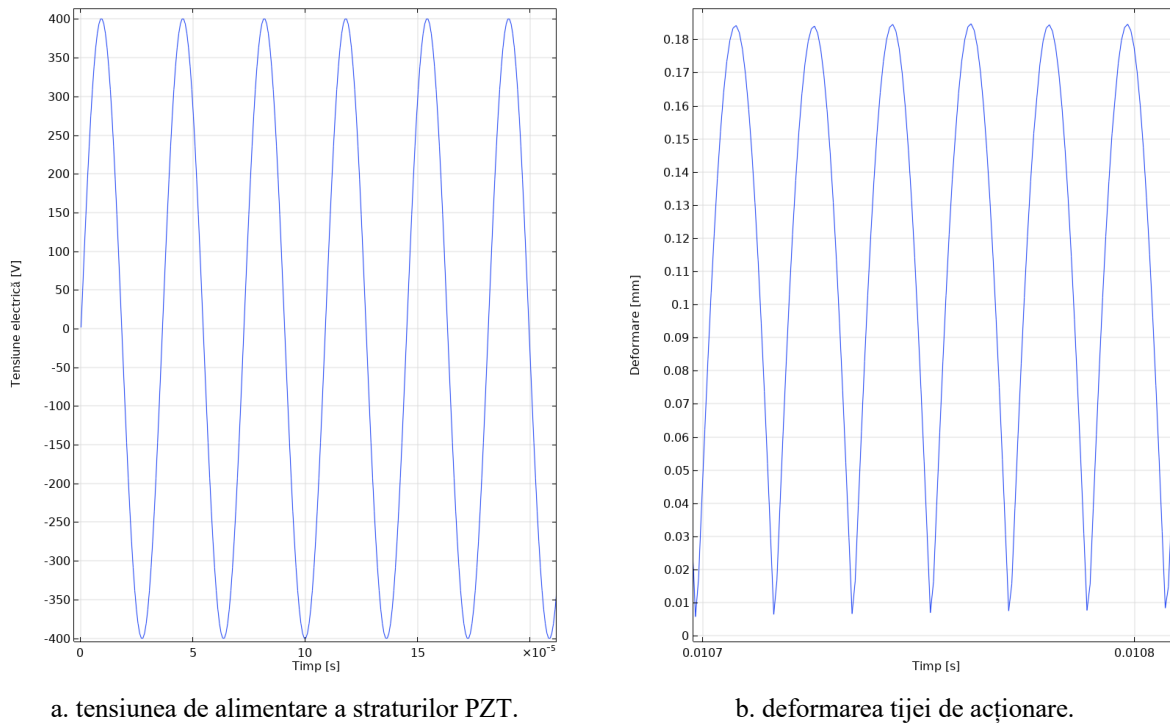


Fig. 5. Tensiunea de alimentare și deformarea tije traductorului ultrasonic.

Regimul cvasi-staționar se atinge după aproximativ 200 de perioade. Se constată necesitatea reglării amplitudinii tensiunii de alimentare a straturilor din material activ.

5. CONCLUZII

În prezenta lucrare se analizează câmpul electric – deformare mecanică pentru un traductor piezoelectric de ultrasunet. Nu se consideră studiul presiunii acustice și a focalizării undei de ultrasunet în această lucrare și va fi obiectul cercetărilor viitoare.

Se studiază un model cu o geometrie simplificată, bidimensională și cu simetrie axială. Se realizează un studiu al frecvențelor proprii, naturale, apoi se realizează un studiu în frecvență pentru determinarea frecvenței de rezonanță. La frecvența de rezonanță determinată la pasul anterior, se aplică o tensiune de alimentare sinusoidală ale straturilor piezoceramice pentru realizarea studiului în regim cvasi-staționar.

Se constată scăderea frecvenței de rezonanță și a deformării maxime ale tije de acționare atunci când se consideră și masa sonotrodului care urmează a se atașa sursei piezoelectrice de ultrasunet. Deformările obținute sunt de ordinul milimetrilor, iar în regim cvasi-staționar se constată necesitatea reglării amplitudinii tensiunii de excitație ale straturilor piezoelectrice. S-a utilizat o amplitudine de 400 V pentru toate cazurile și studiile efectuate.

Se studiază numeric doar interacțiunea câmp electric – câmp de deformare, câmpul acustic, respectiv focalizarea undei de ultrasunet, nu este analizat în această lucrare.

Mențiuni

Simulările numerice au fost realizate în Laboratorul de Surse și Conversie a Energiei, în cadrul Facultății de Inginerie Electrică, Universitatea Națională de Științe și Tehnologie Politehnica București.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XIX, ediția 2023.

BIBLIOGRAFIE

- [1] F.A.S. Lopez, M.A.M. Betancourt, E.C. Salazar, *Application of ultrasound in medicine Part II: the ultrasonic transducer and its associated electronics*, Tecciencia, **8**, 15, pp. 14–26, 2013.
- [2] E. Graham, M. Hedges, S. Leeman, P. Vaughan, *Cavitational bio-effects of 1.5 MHz*, Ultrasonics, **18**, 5, pp. 224–228, 1980.
- [3] S.L. Peshkovsky, A.S. Peshkovsky, *Matching a transducer to water at cavitation: acoustic horn design principles*, Ultrason., Sonochem, **14**, pp. 314–322, 2007.
- [4] X. Lu, J. Hu, H. Peng, Y. Wang, *A new topological structure for the Langevin-type ultrasonic transducer*, Ultrasonics, **75**, pp. 1–8, 2017.
- [5] K.-L. Kuo, *Design of rotary ultrasonic milling tool using FEM simulation*, Journal of Materials Processing Technology, **201**, pp. 48–52, 2008.
- [6] C. Hou, Z. Li, C. Fei, T. Zhao, X. Sun, J. Zhang, D. Chen, Y. Yang, *Composite ultrasound transducer for multi-size of tweezer manipulation*, Applied Acoustics, **198**, pp. 599–604, 2022.
- [7] C. Hou, Z. Li, C. Fei, T. Zhao, X. Sun, J. Zhang, D. Chen, Y. Yang, *Composite ultrasound transducer for multi-size of tweezer manipulation*, Applied Acoustics, **198**, 2022.
- [8] B. Zhu, C. Fei, C. Wang, Y. Zhu, X. Yang, H. Zheng, Q. Zhou, K.K. Shung, *Self-focused AlScN film ultrasound transducer for individual cell manipulation*, ACS Sensors, **2**, 1, pp. 172–177, 2017.
- [9] D. Baresch, J. Thomas, R. Marchiano, *Observation of a single-beam gradient force acoustical trap for elastic particles: acoustical tweezer*, Phys. Rev. Lett., **116**, 2, 2016.
- [10] M. Toa, A. Whitehead, *Ultrasonic Sensing Basics*, Application Note, Texas Instruments, SLAA907D, 2019, revised 2021.
- [11] M. Karafi, S. Kamali, *A continuum electro-mechanical model of ultrasonic Langevin transducers to study its frequency response*, Applied Mathematical Modelling, **92**, pp. 44–62, 2021.
- [12] Y. Sun, J. Tao, F. Guo, F. Wang, J. Dong, L. Jin, S. Li, X. Huang, *AZ31B magnesium alloy matching layer for Lens-focused piezoelectric transducer application*, Ultrasonics, **127**, 2023.