

# Modelovanje kompozitnih ultrazvučnih pretvarača na osnovu 1D modela

Igor D. Jovanović  
Katedra za elektroniku  
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet  
Niš, Srbija  
igor.jovanovic@elfak.ni.ac.rs  
<https://orcid.org/0000-0001-7912-9154>

Dragan D. Mančić  
Katedra za elektroniku  
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet  
Niš, Srbija  
dragan.mancic@elfak.ni.ac.rs  
<https://orcid.org/0000-0001-9713-8337>

**Abstract**—Snažni kompozitni ultrazvučni pretvarač može biti predstavljen jednostavnim jednodimenzionalnim (1D) modelom, u vidu ekvivalentnog elektromehaničkog kola, ako se posmatraju samo debljinski rezonantni modovi. Ako se pri modelovanju koriste tipične vrednosti koeficijena materijala koje proizvođači keramika daju na osnovu standardnih merenja, dobijaju se rezultati koji se razlikuju u odnosu na eksperimentalne vrednosti i u oblastima oko prvog debljinskog moda, što onemogućava optimizaciju pretvarača. Standardnim merenjima dobijaju se piezoelektrični parametri koji se donekle razlikuju od njihovih aktuelnih vrednosti. Takođe, temperatura, vlažnost vazduha i proces starenja materijala imaju veliki uticaj na vrednosti koeficijena materijala, kao što su relativna dielektrična konstanta pritisnute keramike i piezoelektrične konstante. Karakterizacija keramike korišćena u kompozitnom pretvaraču modelovanom uz pomoć 1D teorije sastoji se u određivanju elemenata modela. U ovom radu prikazan je način određivanja navedenih parametara na osnovu merene ulazne električne impedanse pretvarača i 1D modela pretvarača. Korišćena je metoda za nelinearnu neograničenu optimizaciju koja sadrži višedimenzionalni Nelder-Mead „simplex“ algoritam.

**Ključne reči**—Kompozitni ultrazvučni pretvarač, ekvivalentno elektromehaničko kolo, 1D model, simplex algoritam

## I. UVOD

Značajna oblast energetske elektronike odnosi se na projektovanje i izradu snažnih ultrazvučnih sistema koji se primenjuju u različitim granama industrije. Specifične osobine, kao i fizički i hemijski efekti primene ultrazvuka na različite procese, uticali su na širenje područja njegove primene u industriji. Osnovne ideje primene ultrazvuka razrađene su i proširene u pionirskom radu lorda Rayleigh-a objavljenog 1896. godine u knjizi Theory of Sound [1]. Krajem 19. veka beleži se porast primena ultrazvuka u procesima podvodnog skeniranja, nedestruktivnog testiranja i biomedicinskog snimanja.

Konstantan razvoj ultrazvučne tehnike uticao je na intenzivnu primenu snažnih ultrazvučnih sistema u industriji. Ultrazvučni sistemi velikih snaga sastoje se od elektromehaničkih pretvarača i odgovarajućih izvora napajanja koji rade u zadatom frekvencijskom opsegu.

Osnovni deo elektromehaničkih pretvarača je konvertor električne u mehaničku energiju, odnosno u vibraciono kretanje, i obrnuto. Materijali koji se koriste kao izvori ultrazvuka moraju biti u stanju da pod dejstvom pobude vrše kompresije (sabijanja) i ekspanzije (širenja). Uopšteno, materijali sa ovim osobinama se prema vrsti pobude dele na materijale koji se pobuđuju magnetnim poljem (elektrodinamički, elektromagnetni i magnetostruktivni) i na one koji se pobuđuju električnim poljem

(piezoelektrični, dielektrični i elektrostruktivni) [2]. Magnetostruktivni materijali se koriste kao aktuatori ultrazvučnih pretvarača, jer poseduju veliku gustinu snage i veliku brzinu odziva. Ograničenost primena magnetostruktivnih materijala proizilazi iz nemogućnosti precizne kontrole aktuatora usled prisustva inherentnog histerezisa. Sa druge strane, piezoelektrični materijali se zbog brzog odziva, velikog elektromehaničkog faktora sprege i velikih piezoelektričnih konstanti, najčešće primenjuju za realizaciju snažnih elektrostruktivnih pretvarača. Za potrebe istraživanja prikazanog u ovom radu korišćeni su materijali koji poseduju piezoelektrične osobine.

Inovacije u industrijskoj primeni snažnog ultrazvuka odnose se kako na procese projektovanja, tako i na razvoj i izradu efikasnih ultrazvučnih pretvarača [3]. Geometrija mehaničke strukture, kao i način pobude pretvarača, važni su parametri u procesu projektovanja snažnih ultrazvučnih pretvarača. U literaturi se predlažu različite strukture pretvarača, pri čemu se neretko sendvič struktura smatra osnovnim načinom projektovanja snažnih ultrazvučnih pretvarača. Ultrazvučni sendvič pretvarači koji osciluju u debljinskom (longitudinalnom, ekstenzionom ili aksijalnom) pravcu, nazivaju se Langevin-ovi sendvič pretvarači [4]. Ovaj tip pretvarača karakteriše odgovarajuća mehanička struktura (pasivni metalni nastavak - aktivni piezokeramički blok - pasivni metalni nastavak), kao i uzak radni opseg primene u okviru frekvencijske karakteristike njegove ulazne električne impedanse. Aktivni piezokeramički blok čini jedan ili više parova piezokeramičkih prstenova. Pasivni metalni nastavci (rezonatori) su: reflektor koji predstavlja zadnji deo pretvarača i emitor koji prenosi oscilacije od izvora do radne sredine. Za metalne nastavke najčešće se koriste materijali različite gustine kako bi se povećale amplitude oscilacija na radnoj površini emitora, i smanjile amplitude oscilacija na površini reflektora. Sprega između piezokeramičkih prstenova i metalnih nastavaka, kao i povećanje otpornosti na istezanje piezokeramike, postignuti su mehaničkim prednaprežanjem strukture u longitudinalnom pravcu pomoću centralnog zavrtnja.

Nedostatak sendvič pretvarača je u tome što mehaničko spajanje opterećenja sa pretvaračem stvara značajna prigušenja i slabljenja oscilacija. Za povećanje gustine snage u zoni zračenja potrebno je primeniti nove piezokeramičke materijale, povećati aksijalne i poprečne dimenzije pretvarača, koristiti nove akustičke nastavke ili projektovati nove pretvarače.

U ovom radu biće prikazano modelovanje kompozitnog pretvarača sa strukturom dobijenom mehaničkom serijskom vezom dva Langevin-ova pretvarača.

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije [broj granta 451-03-65/2024-03/200102].

## II. STRUKTURA KORIŠĆENIH KOMPOZITNIH PRETVARAČA

Predloženi kompozitni pretvarač (Sl. 1) karakteriše odgovarajuća mehanička struktura sa srednjom masom od metala, postavljenom između dva aktivna piezokeramička bloka i dva krajnja metalna nastavka (reflektor - aktivni piezokeramički blok - srednja masa - aktivni piezokeramički blok - emitor). Prednaprezanje strukture ostvareno je centralnim zavrtnjem koji nije u kontaktu sa srednjom masom. Zbog uzajamno suprotne polarizacije piezokeramičkih prstenova u aktivnim blokovima koji su povezani na isti izvor napajanja, srednja masa osciluje u ciklusima, u skladu sa kompresijom i ekspanzijom aktivnih blokova. Negativni efekti vezani za impedansno i frekvencijsko prilagođenje, kao i za mehaničko spajanje opterećenja, mogu se izbeći upotrebom predloženog kompozitnog pretvarača kod koga srednja masa nije u direktnom kontaktu sa zavrtnjem.

Osnova velikog broja jednodimenzionalnih (1D) modela opisanih u literaturi za modelovanje, projektovanje i optimizaciju ultrazvučnih pretvarača je Mason-ov model [5]. Ovaj model je predstavljen kao pasivno elektromehaničko ekvivalentno kolo čija se primena zasniva na ideji da je brzina prostiranja ultrazvučnih talasa ekvivalentna električnoj struji, dok je mehanička sila ekvivalentna električnom naponu.

Korišćenjem 1D modela u početnoj fazi projektovanja kompozitnih pretvarača, ostvaruju se brojne prednosti koje se ogledaju u većem stepenu fleksibilnosti, kao i većoj brzini optimizacije pretvarača u slučaju nepoznavanja vrednosti velikog broja parametara modela.

Dodatno, analitička optimizacija pretvarača može se ostvariti ekvivalentnim elektromehaničkim kolima za osnovni debljinski mod oscilovanja (radni mod) pretvarača bez opterećenja [6], ili opterećenog pretvarača [7]. Za potrebe prepoznavanja prirode rezonantnih modova koji se pobuđuju, analitički pristup modelovanju može se primeniti i sa dvodimenzionalnim (2D) modelima (gde oni obuhvataju samo radijalne rezonantne modove) i trodimenzionalnim (3D) modelima (koji mogu obuhvatiti debljinske, radijalne, fleksione, ivične, torzione i druge rezonantne modove). U većini slučajeva koji se javljaju u praksi, kada su pretvarači slabo ili znatno mehanički opterećeni, vibracioni modovi (radijalni ili debljinski) nisu izolovani već spregnuti. Tada je bolje koristiti ili složenije modele (npr. 3D modele) ili eksperimentalno odrediti elemente ekvivalentnog

elektromehaničkog kola 1D modela pošto primarna informacija o tipu posmatranog vibracionog moda nije potrebna.

U ovom radu analiziran je eksperimentalni metod za određivanje parametara ekvivalentnog električnog kola kompozitnog ultrazvučnog pretvarača.

## III. EKVIVALENTNO ELEKTROMEHAČKO KOLO KOMPOZITNOG ULTRAZVUČNOG PRETVARAČA

Kompozitni ultrazvučni pretvarači velike snage u najjednostavnijem obliku su u ovom radu predstavljeni 1D modelima koji predstavljaju mreže sa jednim električnim i dva mehanička pristupa.

Na Sl. 1 prikazana je struktura modelovanih i realizovanih kompozitnih ultrazvučnih pretvarača korišćenih za eksperimentalna merenja. Na istoj slici prikazan je i 1D model realizovan pomoću ekvivalentnog elektromehaničkog kola.

Elementi elektromehaničkog kola koji odgovaraju izotropnim i asimetričnim metalnim delovima napravljenim od različitih materijala izračunavaju se kao:

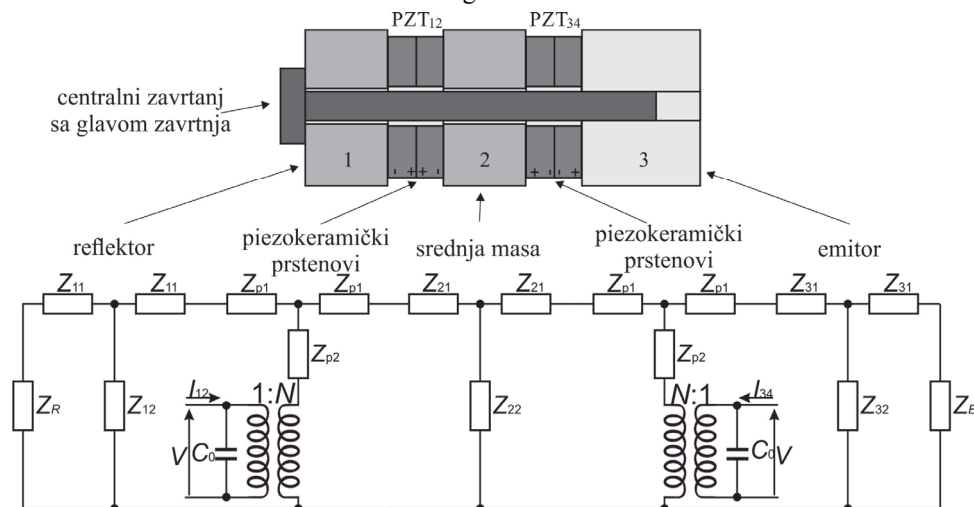
$$Z_{i1} = jZ_{ci} \operatorname{tg} \frac{k_i l_i}{2}, \quad Z_{i2} = \frac{-jZ_{ci}}{\sin(k_i l_i)} \quad (1)$$

gde su karakteristične impedanse odgovarajućih metalnih elemenata  $Z_{ci} = \rho_i v_i P_i$  i odgovarajući talasni brojevi  $k_i = \omega / v_i$  (za  $i=1, 2, i 3$ , Sl. 1 1). Dodatno,  $\rho_i$  su gustine,  $l_i$  i  $P_i$  su dužine i površine poprečnih preseka. Brzine prostiranja longitudinalnih ultrazvučnih talasa kroz odgovarajuće elemente,  $v_i$ , proporcionalne su količniku Youngovog modula elastičnosti ( $E_{yi}$ ) i gustine materijala  $\rho_i$ .

Elementi kola koji odgovaraju piezokeramičkim prstenovima (PZT<sub>12</sub> i PZT<sub>34</sub> na Sl. 1) određuju se na sledeći način:

$$Z_{p1} = jZ_{cp} \operatorname{tg} \frac{nk_p l_p}{2}, \quad Z_{p2} = \frac{-jZ_{cp}}{\sin(nk_p l_p)} \quad (2)$$

gde su  $Z_{cp} = \rho_p v_p P_p$  i  $k_p = \omega / v_p$  karakteristične impedanse i odgovarajući talasni brojevi, respektivno. Sa  $\rho_p$ ,  $l_p$ ,  $P_p$  i  $v_p$  predstavljene su gustina, debljina, površina poprečnog preseka piezokeramika i brzina prostiranja longitudinalnih ultrazvučnih talasa, respektivno.



Sl. 1 Elektromehaničko ekvivalentno kolo realizovanih kompozitnih pretvarača

Brzina prostiranja longitudinalnih ultrazvučnih talasa je obrnuto proporcionalna proizvodu piezoelektrične konstante  $s_{33}$  i gustine keramike. Broj piezokeramičkih prstenova koji se nalaze u odgovarajućem aktivnom sloju pretvarača obeležen je sa  $n$ , dok su ulazni električni naponi i struje obeleženi sa  $V, I_{12}$  i  $I_{34}$ . Modeli se sastoje od kapacitivnosti  $C_0 = n\epsilon_{33}^S P_p / l_p$  i idealnih transformatora sa prenosnim odnosima  $N = h_{33} C_0 / n$ . Piezoelektrična svojstva aktivnih slojeva pretvarača predstavljena su piezoelektričnim konstantama  $h_{33}$  i  $s_{33}$ , kao i relativnom dielektričnom konstantom pritisnute keramike  $\epsilon_{33}^S$ .

Piezokeramički prstenovi, zajedno sa srednjom masom, su mehanički redno povezani sa emitorskim i reflektorskim nastavkom. Emitorski i reflektorski nastavci su zatvoreni akustičkim impedansama  $Z_E$  i  $Z_R$ . U posmatranom slučaju impedanse  $Z_E$  i  $Z_R$  su zanemarljive zato što se odnose na slobodne neopterećene pretvarače koji osciluju u vazduhu.

Na osnovu prikazane šeme ekvivalentnog kola, čiji se elementi izračunavaju na osnovu (1) i (2), ulazna električna impedansa pretvarača može se odrediti kao:

$$Z_e = \frac{Z_{12} Z_{34}}{N^2 (Z_{12} + Z_{34}) + j2\omega C_0 Z_{12} Z_{34}} \quad (3)$$

gde je  $\omega = 2\pi f$  kružna učestanost, a ulazne električne impedanse odgovarajućih aktivnih slojeva pretvarača su  $Z_{12} = V/I_{12}$  i  $Z_{34} = V/I_{34}$ .

Ulazne električne impedanse aktivnih slojeva se dobijaju na osnovu izraza:

$$Z_{12} = \frac{Z_{e5} - \frac{Z_{e2}}{Z_{e3}} Z_{e6}}{Z_{e4} - \frac{Z_{e1}}{Z_{e3}} Z_{e6}}, \quad Z_{34} = \frac{Z_{e3} - \frac{Z_{e6}}{Z_{e5}} Z_{e2}}{Z_{e1} - \frac{Z_{e4}}{Z_{e5}} Z_{e2}} \quad (4)$$

U poslednjim izrazima se novouvedene ekvivalentne impedanse dobijaju na sledeći način:

$$\begin{aligned} Z_{e1} &= 1 + \frac{Z_{p1} + Z_{21} + Z_{22}}{Z_{e7}} + \frac{Z_{22}}{Z_{e8}}, \\ Z_{e2} &= Z_{22} + Z_{p2} + Z_{p1} + Z_{21} + \frac{Z_{p2}(Z_{22} + Z_{p1} + Z_{21})}{Z_{e7}}, \\ Z_{e3} &= Z_{22} + \frac{Z_{p2} Z_{22}}{Z_{e8}}, \quad Z_{e5} = Z_{22} + \frac{Z_{p2} Z_{22}}{Z_{e7}}, \\ Z_{e4} &= 1 + \frac{Z_{p1} + Z_{21} + Z_{22}}{Z_{e8}} + \frac{Z_{22}}{Z_{e7}}, \\ Z_{e6} &= Z_{22} + Z_{p2} + Z_{p1} + Z_{21} + \frac{Z_{p2}(Z_{22} + Z_{p1} + Z_{21})}{Z_{e8}}, \\ Z_{e7} &= \frac{(Z_R + Z_{11})Z_{12}}{Z_R + Z_{11} + Z_{12}} + Z_{11} + Z_{p1}, \\ Z_{e8} &= \frac{(Z_E + Z_{31})Z_{32}}{Z_E + Z_{31} + Z_{32}} + Z_{31} + Z_{p1}. \end{aligned} \quad (5)$$

#### IV. ODREĐIVANJE PARAMETARA EKVIVALENTNOG ELEKTROMEHANIČKOG KOLA

Za identifikaciju parametara sa Sl. 1 korišćen je višedimenzionalni Nelder-Mead „simplex“ algoritam [8].

Generalno gledano sve razvijene optimizacione metode se mogu podeliti na determinističke i stohastičke. Osnovna razlika između determinističkih i stohastičkih metoda je to što kod stohastičkih metoda mogu se kreirati i tačke koje strogo ne poboljšavaju funkciju cilja, takođe, mogu i učestvovati u procesu pretraživanja [9]. Većina klasičnih ili konvencionalnih metoda su determinističke. Neke od determinističkih metoda koriste informacije o gradijentu i označavaju se kao gradijentne (npr. Newton-Raphson algoritam). Ove metode koriste informacije o vrednostima funkcija i njenim izvodima (prvog i drugog) kako bi se pretraga kretala ka optimalnoj vrednosti. Sa druge strane postoje metode koje ne koriste informacije o gradijentu, već samo vrednosti funkcije cilja (Hooke-Jeeves pattern search i Nelder-Mead downhill simplex) [10].

Metoda prikazana u ovom radu koristi koncept simpleksa, koji je poseban višedimenzionalni geometrijski oblik u prostoru (npr. linija u jednodimenzionalnom prostoru, trougao u dvodimenzionalnom prostoru, tetraedar u trodimenzionalnom prostoru i tako dalje). Metoda aproksimira lokalno optimalno rešenje problema krećući se u iteracijama stranicama geometrijske figure od početnog rešenja ka postizanju konačnog optimalnog rešenja [11].

U cilju karakterizacije piezokeramike analizirana je frekvencijska zavisnost modula ulazne električne impedanse realizovanih kompozitnih pretvarača. Zbog velikog opsega promene impedanse analizirana je funkcija slabljenja u decibelima ( $Z_{ul} = 20 \log |z_{ul}[\Omega]|$  [dB]).

Tipične vrednosti koeficijentata korišćenih piezokeramičkih prstenova koje proizvođači keramika daju na osnovu standardnih merenja prikazane su u tabeli 1, a u tabeli 2 su dati parametri materijala korišćenih za metalne nastavke. Vrednosti dimenzija pojedinačnih sastavnih delova realizovanih kompozitnih pretvarača date su u tabeli 3.

TABELA I. STANDARDNI PARAMETRI PIEZOKERAMIKA [12]

Simbol	Jedinica	PZT4	PZT8
$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$	-	635	600
$s_{33}^E$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	15.5	13.5
$h_{33}$	$10^8 \text{ V/m}$	26.8	26.4
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	7500	7600

Eksperimentalne karakteristike zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije za realizovane kompozitne pretvarače izmerene su Precision LCR Meter 6366 instrumentom (Sl. 2). Navedene eksperimentalne karakteristike upoređene su sa analognim karakteristikama dobijenim pomoću 1D modela sa Sl. 1, odnosno, jednačine (3) u programskom paketu Matlab/Simulink.

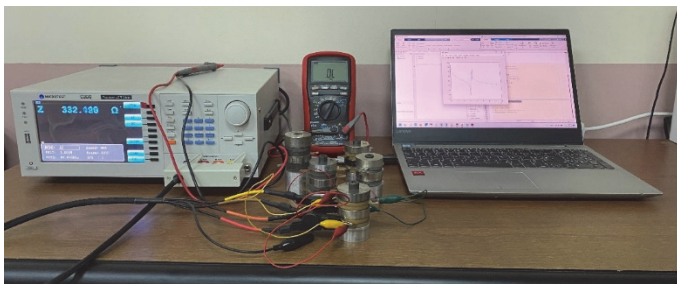
TABELA II. FIZIČKE OSOBINE MATERIJALA KOJI SE KORISTE ZA METALNE NASTAVKE

Veličina	$\rho$ [ $10^3 \text{ kg/m}^3$ ]	$E_V$ [ $10^{11} \text{ N/m}^2$ ]
Materijal		
Čelik	8050	1.95
Duraluminijum	2790	0.69

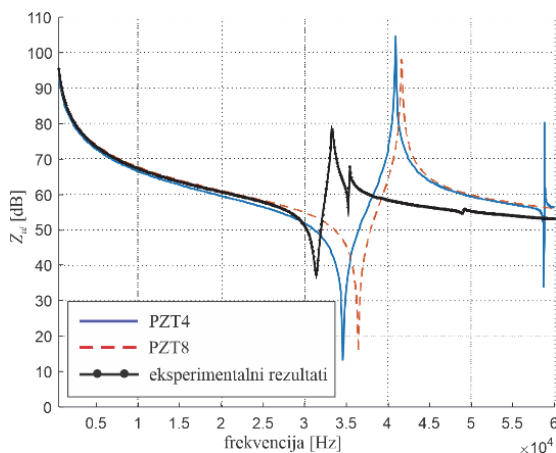
TABELA III. GEOMETRIJSKE DIMENZIJE SASTAVNIH DELOVA REALIZOVANIH KOMPOZITNIH PRETVARAČA KORIŠĆENIH U ANALIZI

Dimenzije (mm)	Pretvarač P1	Pretvarač P2	Pretvarač P3	Pretvarač P4
$l_p$	5	6.35	5	5
$l_1$	10	16	11	10
$l_2$	10	10	10	11
$l_3$	18	35	17.5	18
$2a_p$	38	38	38	38
$2a_1$	40	40	40	40
$2a_2$	40	40	40	40
$2a_3$	40	40	40	40
$2b_p$	13	13	13	15
$2b_1$	9	9	9	9
$2b_2$	9	9	9	9
$2b_3$	8	8	8	8

Na Sl. 3-5 su za svaki realizovani pretvarač prikazane širokopojasne karakteristike zavisnosti slabljenja od frekvencije dobijene merenjima i ekvivalentnim elektromehaničkim kolom u slučaju korišćenja standardnih parametara piezokeramike prikazanih u tabeli I.



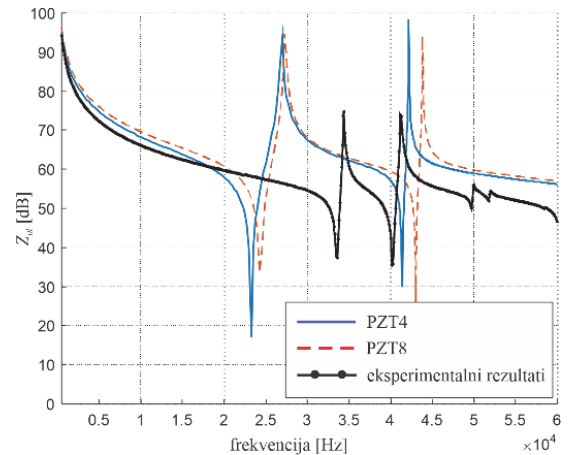
Sl. 2 Postavka eksperimenta: Precision LCR Meter 6366, Brymen BM869s multimetar, laptop računar i realizovani kompozitni pretvarači



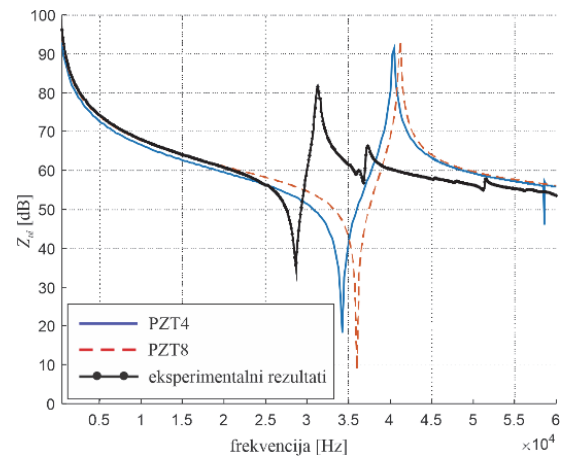
Sl. 3 Eksperimentalna i modelovane frekvencijske karakteristike slabljenja pretvarača P1 korišćenjem standardnih parametara

Očigledno je neslaganje izmerenih frekvencijskih karakteristika slabljenja sa modelovanim karakteristikama dobijenim korišćenjem standardnih koeficijenata koji odgovaraju PZT4 i PZT8 keramičkim prstenovima (Sl. 3-6). Za potrebe ovog rada koji je deo većeg istraživanja korišćeni su keramički prstenovi koji su duži vremenski period bili skladišteni u prostoriji sa velikom vlažnošću vazduha. Takođe, starenje materijala je dodatno uticalo na promenu karakteristika piezokeramike.

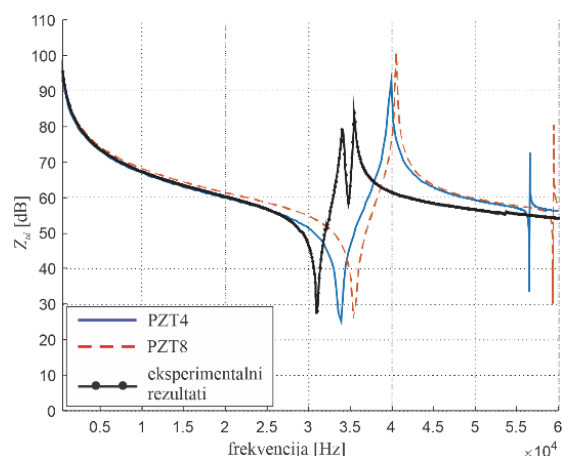
S obzirom da se prikazani pretvarači koriste u opsegu frekvencija oko prvog rezonantnog moda, izvršena je identifikacija parametara piezokeramike za frekvencijski opseg od interesa (Sl. 7-10), pri čemu su na slikama prikazane dobijene vrednosti parametara piezokeramike.



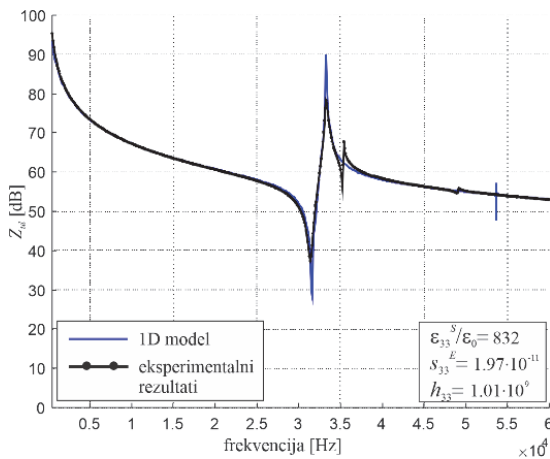
Sl. 4 Eksperimentalna i modelovane frekvencijske karakteristike slabljenja pretvarača P2 korišćenjem standardnih parametara



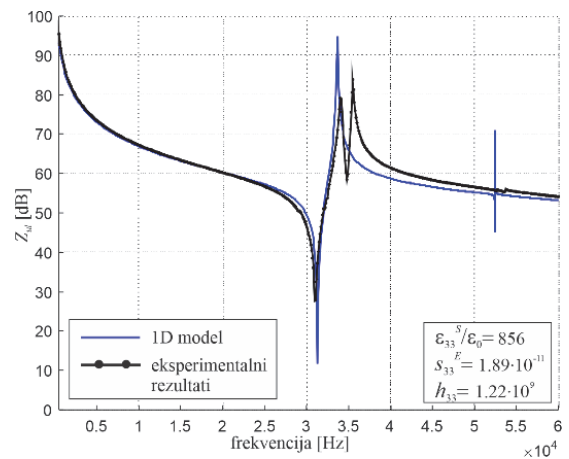
Sl. 5 Eksperimentalna i modelovane frekvencijske karakteristike slabljenja pretvarača P3 korišćenjem standardnih parametara



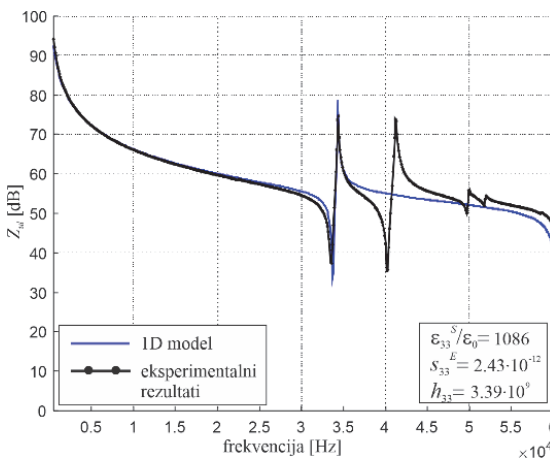
Sl. 6 Eksperimentalna i modelovane frekvencijske karakteristike slabljenja pretvarača P4 korišćenjem standardnih parametara



Sl. 7 Eksperimentalna i modelovana frekventijska karakteristika slabljenja pretvarača P1 sa izračunatim parametrima piezokeramike

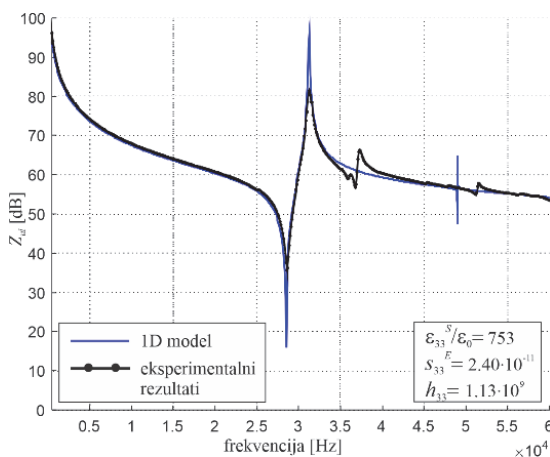


Sl. 10 Eksperimentalna i modelovana frekventijska karakteristika slabljenja pretvarača P4 sa izračunatim parametrima piezokeramike



Sl. 8 Eksperimentalna i modelovana frekventijska karakteristika slabljenja pretvarača P2 sa izračunatim parametrima piezokeramike

Važno je odgovarajućim modelom predvideti sve debljinske modove, kao i modove bliske radnom modu, koji mogu uticati na ponašanje pretvarača pri radu. Sa druge strane, 1D teorijom se ne može predvideti postojanje kako radijalnih modova tako i njihove eventualne sprege sa radnim debljinskim modom. U tom slučaju je potrebno primeniti složenije 3D modele.



Sl. 9 Eksperimentalna i modelovana frekventijska karakteristika slabljenja pretvarača P3 sa izračunatim parametrima piezokeramike

Kod pretvarača P1 (Sl. 7) i P4 (Sl. 10) prvi rezonantni modovi su sa novim koeficijentima modelovani sa velikom tačnošću. Izmerena karakteristika slabljenja kod navedenih modova nije idealna na frekvencijama bliskim 35 kHz. Potrebno je ispitati da li je došlo do velikog međusobnog neslaganja karakteristika keramičkih prstenova u donjem i u gornjem aktivnom sloju, ili se pojava lokalnog minimuma na izmerenoj karakteristici desila usled postojanja drugog, bliskog moda (npr. radijalnog).

Kod pretvarača P2 (Sl. 8) prvi rezonantni mod je modelovan sa velikom tačnošću sa novim koeficijentima. U ovom pretvaraču se u blizini radnog moda javlja najverovatnije radijalni mod na frekvencijama bliskim 40 kHz. Na karakteristici slabljenja ovog pretvarača mogu se uočiti još dva moda na frekvencijama bliskim 50 kHz koji nisu predviđeni prikazanim modelom. S obzirom na trend karakteristike slabljenja na kraju posmatranog opsega, može se očekivati još jedan debljinski mod na frekvenciji iznad 60 kHz. Može se očekivati da će sa novim koeficijentima i navedeni mod biti modelovan sa zanemarljivom greškom.

Kod pretvarača P3 (Sl. 9) prvi rezonantni mod je modelovan sa velikom tačnošću sa novim koeficijentima, iako se blizu prvog rezonantnog moda nalazi radijalni mod. Kod ovog pretvarača su drugi i treći (debljinski) mod u sprezi, što se manifestuje karakterističnom greškom predviđanja trećeg moda (koji je drugi debljinski u pretvaraču). Rezonante frekvencije modelovanog moda se pomeraju od stvarnih vrednosti u slučaju sprege sa modovima koji se ne predviđaju modelom. Pomeranje se vrši ka frekvencijama spregnutog moda, pa je i u slučaju ovog pretvarača treći mod modelovan na 48 kHz a izmeren na 52 kHz.

## ZAKLJUČAK

U praksi se 1D modelovanje najčešće koristi zbog velike fleksibilnosti i efikasne implementacije modela. Fleksibilnost i efikasnost 1D modela dolaze do izražaja pri analizi rada pretvarača koja uključuje veliki broj parametara.

U radu je prikazan eksperimentalni metod za određivanje parametara piezokeramike na osnovu merenja frekventijske zavisnosti funkcije impedanse kompozitnog pretvarača. Analizirana je tačnost ovakvog metoda za širok opseg frekvencija, za izolovane i za spregnute modove. Uočena je dobra saglasnost dobijenih rezultata sa eksperimentalnim rezultatima.

Prikazani model ne uključuje uticaj centralnog zavrtnja, koji u ovakvoj strukturi, kao i kod pretvarača većih dimenzija, nije zanemarljiv, pa je neophodno navedeni uticaj uključiti u model u nastavku istraživanja.

Predloženi 1D model kompozitnih pretvarača ne uključuje mehaničke i električne gubitke u materijalu. Međutim, gubici se mogu analizirati ukoliko se piezoelektrične konstante i konstante elastičnosti metalnih delova pretvarača predstave u obliku kompleksnih brojeva, pri čemu njihovi imaginarni delovi predstavljaju gubitke. U tom sličaju bi se smanjile i razlike između minimalnih i maksimalnih vrednosti slabljenja za svaki modelovani rezonantni mod u odnosu na izmerene vrednosti slabljenja.

#### LITERATURA

- [1] L. Rayleigh, „Theory of Sound“, vol. 2, MacMillan & Co. Ltd. London, 1896.
- [2] G. Harvey, A. Gachagan, T. Mutasa, „Review of High Power Ultrasound-Industrial Applications and Measurement Methods“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 61, pp. 481-495, 2014.
- [3] D. Stansfield, „Underwater Electroacoustic Transducers“, Bath University Press, Bath, UK, 1991.
- [4] P. Langevin, French Patent Nos: 502913 (29.5.1920); 505703 (5.8.1920); 575435 (30.7.1924).
- [5] W. P. Mason, „Electromechanical transducers and wave filters“, Second edition, Van Nostrand, New York, 1948.
- [6] Z. Qiang, S. Shengjun, C. Weishan, „An electromechanical coupling model of a longitudinal vibration type piezoelectric ultrasonic transducer“, Ceramics International, vol. 41, no. 1, pp. S638-S644, 2015.
- [7] L. Shuyu, „Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers“, Ultrasonics, vol. 43, no. 5, pp. 365-373, 2005.
- [8] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, P. E. Wright, „Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions.“ SIAM Journal of Optimization. Vol. 9, Number 1, pp. 112–147, 1998.
- [9] I. M. Al-Harkan, T. B. Trafalis, „A hybrid scatter genetic tabu approach for continuous global optimization“, In: Pardalos, P.M., Migdalas, A., Burkard, R.: Combinatorial and Global Optimization, World Scientific Publishing Co., 2002.
- [10] M. Madić, „Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije“, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu, 2013.
- [11] J. Bonnans, J. Frederic, C. Gilbert, C. Lemarechal, C. A. Sagastizabal, „Numerical Optimization; Theoretical and Practical Aspects“, second ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [12] „Technical Publication TP-226“, Morgan Electro Ceramics.

#### ABSTRACT

A powerful composite ultrasonic transducer can be represented by a simple one-dimensional (1D) model, in the form of an equivalent electromechanical circuit, if only thickness resonant modes are considered. If the typical values of the material coefficients given by the ceramic manufacturers based on standard measurements are used in the modeling, the results that differ from the experimental values are obtained in the areas around the first thickness mode, which makes it impossible to optimize the transducer. Standard measurements yield piezoelectric parameters that differ somewhat from their actual values. Also, temperature, air humidity and the aging process of the material have a great influence on the values of the material coefficients, such as the relative dielectric constant of pressed ceramics and the piezoelectric constants. The characterization of the ceramics used in the composite transducer modeled with the help of 1D theory consists in the determination of the model elements. This paper presents the method of determining the mentioned parameters based on the measured input electrical impedance of the transducer and the 1D model of the transducer. A non-linear unconstrained optimization method containing a multidimensional Nelder-Mead "simplex" algorithm was used.

#### MODELING OF COMPOSITE ULTRASONIC TRANSDUCERS BASED ON 1D MODEL

Igor D. Jovanović, Dragan D. Mančić