



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Igor D. Jovanović

**NOVI KOMPOZITNI ULTRAZVUČNI
PRETVARAČI VELIKE SNAGE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2018.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Igor D. Jovanović

**NEW POWER COMPOSITE ULTRASONIC
TRANSDUCERS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2018.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: Prof. dr Dragan Mančić, redovni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu

Naslov: Novi kompozitni ultrazvučni pretvarači velike snage

Rezime: U disertaciji su prikazani projektovanje, razvoj i realizacija dve nove strukture kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage. Predloženi kompozitni pretvarači kao novinu sadrže srednju metalnu masu, tako da se umesto klasične strukture Langevin-ovog pretvarača (reflektor - aktivni piezokeramički blok - emitor) dobija sledeća struktura: reflektor - aktivni piezokeramički blok - srednja masa - aktivni piezokeramički blok - emitor. Aktivni blokovi se sastoje od jednog ili više parova piezokeramičkih prstenova, koji su mehanički spojeni redno i sa suprotno su orijentisanim polarizacijama. Razlika između predloženih struktura je u tome što je kod prve strukture srednja masa spojena sa krajnjim metalnim nastavcima pomoću dva centralna zavrtnja, dok je u drugoj strukturi prednaprezanje izvršeno jednim centralnim zavrtnjem, koji povezuje samo krajnje metalne nastavke i ne dodiruje srednju masu. Upotrebom predloženog kompozitnog pretvarača kod kojeg srednja masa nije u direktnom kontaktu sa zavrtnjem mogu se izbeći problemi vezani za impedansno prilagođenje potrošača. Predloženim strukturama se povećava i ukupna izlazna ultrazvučna snaga pretvarača. Ukoliko se opterećenje veže preko akustičkog talasovoda, kompozitni pretvarači mogu u radnoj sredini proizvesti debljinske, radijalne, fleksione, ivične, torzione i druge vibracione modove.

U cilju modelovanja predloženih kompozitnih pretvarača razvijeni su jednodimenzionalni modeli i aproksimativni trodimenzionalni matrični modeli. Najpre su razvijeni generalni jednodimenzionalni modeli koji uključuju sve sastavne delove pretvarača. Takođe, razvijen je i jednodimenzionalni model koji ne uključuje uticaj centralnog zavrtnja. Zanemarivanjem uticaja centralnog zavrtnja, takav jednodimenzionalni model je prema svojoj strukturi pogodan za istovremenu analizu rada oba predložena kompozitna ultrazvučna pretvarača. Zbog kompleksnosti predloženih struktura, trodimenzionalni matrični elektromehanički modeli celih kompozitnih pretvarača razvijeni su korišćenjem modularnih rešenja trodimenzionalnog modela piezokeramičkih prstenova i trodimenzionalnog modela pasivnih metalnih nastavaka. Prednost novorazvijenih trodimenzionalnih modela pretvarača ogleda se u mogućnosti predviđanja debljinskih i radijalnih modova oscilovanja, kao i njihove međusobne sprege. Neznatnom modifikacijom trodimenzionalnih modela moguće je odrediti bilo koju prenosnu funkciju posmatranog kompozitnog pretvarača. U disertaciji je, pored analize osnovnog debljinskog rezonantnog moda, posebna pažnja posvećena obliku i položaju viših rezonantnih modova, kao i uticaju različitih parametara na njihove karakteristike. Poređenjem

eksperimentalnih merenja ulazne električne impedanse realizovanih novih kompozitnih pretvarača i odgovarajućih simulacionih rezultata dobijenih u programskom paketu Matlab/Simulink, potvrđena je preciznost predloženih trodimenzionalnih modela u poređenju sa jednodimenzionalnim modelima.

Naučna oblast:	Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Elektronika
Ključne reči:	Kompozitni ultrazvučni pretvarač, jednodimenzionalni model, trodimenzionalni model, snažan ultrazvuk, optimizacija piezoelektričnih pretvarača
UDK:	((621.314.5:591.58)+62-52):004.4
CERIF klasifikacija:	T170 Elektronika
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor: Dr. Dragan Mančić, full professor, Faculty of Electronic Engineering Niš

Title: New power composite ultrasonic transducers

Abstract: The dissertation presents the design, development and realization of two novel structures of high-power composite ultrasonic transducers. The proposed composite transducers as a novelty contain a central metal mass, so instead of the classical structure of the Langevin's transducer (back mass - active piezoceramic block - front mass) the following structure is obtained: back mass - active piezoceramic block - central mass - active piezoceramic block - front mass. Active blocks contain one or more pairs of piezoceramic rings, which are mechanically connected in series and have opposite polarized orientations. The difference between the proposed structures is that in the first structure, the central mass is connected to the metal endings with two central bolts, while in the second structure the prestressing is achieved with a single central bolt, which connects only metal endings and is not in contact with the central mass. With the proposed composite transducer without the direct contact between the central mass and the bolt, problems related to impedance adjustment with a mechanical load can be avoided. The proposed structures also increase the total output ultrasonic power of the transducers. If the mechanical load is connected via an acoustic transmission line, composite transducers can produce thickness, radial, flexion, edge, torsion and other vibration modes in the working environment.

In order to model the proposed composite transducers, one-dimensional models and approximate three-dimensional matrix models are developed. Firstly, general one-dimensional models, which include all the constituent parts of the transducers, have been developed. Also, a one-dimensional model, which does not include impact of the central bolt, has been developed. A one-dimensional model, which neglects the central bolt impact, is, according to its structure, suitable for simultaneous operation analysis of both proposed composite ultrasonic transducers. Due to the complexity of the proposed structures, the three-dimensional matrix electromechanical models of complete composite transducers were developed using modular solutions of the three-dimensional model of piezoceramic rings and the three-dimensional model of passive metal endings. The advantage of the newly developed three-dimensional models of the transducers is reflected in the possibility of predicting the thickness and radial oscillation modes, as well as their mutual couplings. With a minor modification of the three-dimensional models it is possible to determine any transfer function of the observed composite transducer. In the dissertation, in addition to the analysis of the basic thickness resonant mode, special emphasis is devoted to the shape and position of higher resonant modes, as well as

to the impact of various parameters on their characteristics. By comparing the experimental measurements of the input electrical impedance, of the realized novel composite transducers, and the corresponding Matlab/Simulink simulation results, the accuracy of the proposed three-dimensional models compared to the one-dimensional models was confirmed.

Scientific Field:	Electrical Engineering and Computer Science
Scientific Discipline:	Electronics
Key Words:	Composite ultrasonic transducer, one-dimensional model, three-dimensional model, high-power ultrasound, Piezoelectric transducers optimization
UDC:	((621.314.5:591.58)+62-52):004.4
CERIF Classification:	T170 Electronics
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

Najiskrenije se zahvaljujem svom mentoru prof. dr Draganu Mančiću, redovnom profesoru Elektronskog fakulteta u Nišu na ukazanom poverenju, nesebičnom zalaganju, stručnoj pomoći i podršci kako u toku studija tako i prilikom izrade doktorske disertacije.

Srdačno se zahvaljujem prof. dr Milanu Radmanoviću, redovnom profesoru Elektronskog fakulteta u Nišu na idejama, korisnim sugestijama i savetima koji su značajno doprineli kvalitetu doktorske disertacije.

Zahvaljujem se mr Miodragu Prokiću na predlozima i savetima koji su mi pomogli pri realizaciji eksperimentalnog dela istraživanja prikazanog u doktorskoj disertaciji.

Neizmernu zahvalnost dugujem svojoj supruzi Branki i ćerki Eleni na podršci i razumevanju.

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	GENERISANJE ULTRAZVUČNIH TALASA	13
2.1	Piezoelektrični efekat	14
2.2	Piezoelektrični materijali	19
2.2.1	Piezokeramike	19
2.2.2	Piezopolimeri	20
2.2.3	Piezokristali	20
2.2.4	Piezokompoziti	21
2.3	Piezoelektrični pretvarači velike snage	22
2.3.1	Ograničenja pri projektovanju klasičnih ultrazvučnih pretvarača velike snage	24
2.3.2	Kompozitni ultrazvučni pretvarači velike snage	26
3	MODELOVANJE SASTAVNIH DELOVA ULTRAZVUČNIH PRETVARAČA. 31	
3.1	Jednodimenzionalno modelovanje piezokeramika	32
3.1.1	Matematička analiza talasne jednačine prostiranja longitudinalnih talasa	32
3.1.2	Mason-ov model piezokeramika	38
3.1.3	KLM model piezokeramika	41
3.2	Jednodimenzionalno modelovanje metalnih cilindričnih rezonatora	43
3.3	Trodimenzionalni model piezokeramičkog prstena opterećenog na svim konturnim površinama ...	46
3.4	Trodimenzionalni matrični model metalnih prstenova	51
4	MODELOVANJE KOMPOZITNIH ULTRAZVUČNIH PRETVARAČA VELIKE SNAGE	54
4.1	Novi jednodimenzionalni modeli kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage	55
4.2	Novi trodimenzionalni matrični modeli kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage	60
4.3	Efektivni elektromehanički faktor sprege kompozitnih pretvarača	67
5	POREĐENJE NUMERIČKIH I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA	73
5.1	Analiza kompozitnog pretvarača tipa A	75
5.2	Analiza kompozitnih pretvarača tipa B	95
6	ZAKLJUČAK	114
7	LITERATURA	119

1 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. Ultrazvučni talasi koristili su se kao efikasno sredstvo za detekciju objekata potopljenih u toku Prvog svetskog rata. U naučno-istraživačkim radovima publikovanim u posleratnim godinama zapaža se promena pravca istraživanja od skeniranja velikih podvodnih površina okeana, do skeniranja malih regiona od interesa.

Koncept ultrazvučnog testiranja metala prvi je predložio Sokolov 1928. godine, iako je nedostatak odgovarajuće opreme za primopredaju kratkih ultrazvučnih impulsa do ranih 1940-tih za posledicu imao veoma lošu rezoluciju. Posle perioda Drugog svetskog rata naučnici u Sjedinjenim Američkim Državama i Japanu istraživali su mogućnost primene ultrazvuka u medicinskoj dijagnostici. Važan napredak na polju medicinske dijagnostike primenom ultrazvuka ostvaren je od strane doktora George Ludwig-a, koji je prvi snimio i opisao razliku brzina prolaska zvuka kroz različita tkiva i organe kod životinja. S obzirom da se radi o nedestruktivnom i nejonizujućem zračenju kratkog dometa, poslednjih godina veliki broj naučnih radova o značaju primene ultrazvuka u medicini vezuje se za njegovu dijagnostičku i terapijsku upotrebu.

Na osnovu frekvencijskog opsega ultrazvuka i na osnovu njegovog intenziteta, odnosno

gustine ultrazvučne snage koja se predaje prenosnom medijumu u zoni zračenja, mogu se izdvojiti tri područja primene ultrazvuka: područje ultrazvuka niskih frekvencija (područje snažnog ultrazvuka), područje ultrazvuka visokih frekvencija i područje dijagnostičkog ultrazvuka.

Primena ultrazvuka u medicinskoj dijagnostici je neinvazivna metoda sa snagama manjim od 100 mW/cm^2 i frekvencijama u opsegu od 1 MHz do 10 MHz, tako da ultrazvučni talasi ne utiču na fizička i hemijska svojstva tkiva. U terapijske svrhe koristi se niskofrekvencijsko dozirano ultrazvučno zračenje, pri čemu se za dubinsko grejanje koriste snage od oko 1 W/cm^2 , za lečenje onkoloških oboljenja se koristi ultrazvuk snage od nekoliko desetina W/cm^2 , dok se ultrazvuk velike snage (oko 1 kW/cm^2) kao impulsna metoda koristi za modifikaciju tkiva [2].

Kod primene ultrazvuka visokih frekvencija iz opsega od 100 kHz do 1 MHz, male su snage zračenja. Naime, ultrazvuk navedenih karakteristika nema uticaj na fizičke i hemijske osobine materijala. Danas se ultrazvuk visokih frekvencija često primenjuje u procesima koji uključuju monitoring kristalizacije lipida u hrani, karakterizaciju jestivih ulja i masti, karakterizaciju emulzije i suspenzije, monitoring rastvaranja i kristalizacije ugljenih hidrata i gelova. Korišćenje ultrazvuka na visokim frekvencijama je nedestruktivno i može se upotrebljavati i kod neprovidnih materijala visoke gustine, u čemu se ogleda njegoova prednost u odnosu na ostale metode za ispitivanje i karakterizaciju materijala.

U ovoj disertaciji se upotreba pojma ultrazvuka velike snage (snažan ultrazvuk, ultrazvuk visokog intenziteta) odnosi na uspostavljanje ultrazvučnog polja koje direktno izaziva fizičke, hemijske i termičke promene u ciljnom objektu, ili regionu, usled izlaganja energiji oscilacija. Radna frekvencija ima direktan uticaj na karakteristike ultrazvučnog polja visokog intenziteta. U primenama snažnog ultrazvuka koriste se znatno niže frekvencije (od 10 kHz do 1 MHz), sa gustom snage i od nekoliko kW/cm^2 . Najčešće korišćeni opseg frekvencija snažnog ultrazvuka je od 20 kHz do 60 kHz. Izuzetak iz ovakve kategorizacije su sonari kod kojih se snažan ultrazvuk koristi za prenos informacija. Takođe, fokusirani ultrazvuk visokog intenziteta koristi se i u različitim oblastima savremene medicine.

U disertaciji je najpre dat sveobuhvatan pregled primena snažnog ultrazvuka od prvobitnog ultrazvučnog čišćenja do naprednih sonohemijskih tehnika, kao i tehnika ultrazvučne prerade hrane i vode koje se danas koriste.

Najstarija primena snažnog ultrazvuka u industriji je ultrazvučno čišćenje. Zbog velike efikasnosti metod ultrazvučnog čišćenja koristi se i u današnje vreme u brojnim granama industrije - od proizvodnje poluprovodnika, do proizvodnje delova motora. Često se usled interakcije ultrazvučnih talasa velikog intenziteta sa prenosnim medijumom javljaju jake oscilacije akustičkog pritiska, što uključuje efekat kavitacije u tečnoj sredini, efekat koagulacije u gasnoj sredini i termičko delovanje. Osnovna prednost ultrazvučnog čišćenja nad tradicionalnim metodama je korišćenje efekta kavitacije za čišćenje nepristupačnih delova predmeta. Ova prednost se povećava u slučaju generisanja kavitacije uniformno u celoj zapremini tečnosti za čišćenje ili samo u ciljanim regionima [3].

Ultrazvučno čišćenje je efikasnije u primeni na čvrstim materijalima, kao što su metal, staklo, keramika i plastika, koji imaju mnogo veću akustičku impedansu u poređenju sa tečnim prenosnim medijumom. Prednost se ogleda u pojačavanju pritiska po površini čvrstog materijala. Tipične gustine snage koje se koriste u većini primena ultrazvučnog čišćenja su dosta manje u poređenju sa drugim primenama snažnog ultrazvuka. Npr. gustine snage za ultrazvučno čišćenje su $0.5-3 \text{ W/cm}^2$, zavarivanje plastike $10-50 \text{ W/cm}^2$, bušenje $10-100 \text{ W/cm}^2$ i $600-6000 \text{ W/cm}^2$ kod zavarivanja metala.

Opseg frekvencija koji se koristi u ultrazvučnom čišćenju je najčešće od 20 kHz do 50 kHz u zavisnosti od namene. Na primer, ultrazvučno čišćenje na 25 kHz biće snažnije od čišćenja na 50 kHz zbog intenzivnije kavitacije. Međutim, ultrazvučno čišćenje na 25 kHz može oštetiti neke osetljivije delove predmeta koji se čisti, dok se čišćenje na frekvencijama višim od 50 kHz predlaže za primenu na sitnim predmetima, npr. u poluprovodničkoj industriji. Takođe, ne preporučuje se prekomerna upotreba ultrazvuka na nižim frekvencijama zbog postojanja mogućnosti emitovanja energije i u zvučnom opsegu [4].

Ultrazvučno čišćenje se često primenjuje i kod poroznih materijala. Kod tekstilnih materijala ultrazvučno čišćenje pruža značajnu prednost u odnosu na konvencionalne metode pranja [5]. Pravilnim izborom ultrazvučne kade obezbeđuje se ciljana intenzivna kavitacija. Poslednjih godina se u literaturi često sreću eksperimentalne primene ultrazvučnog čišćenja. Jedan od primera je i čišćenje trupa brodova radi postizanja većeg stepena ekonomičnosti u odnosu na konvencionalno čišćenje koje se odvija na suvom, i koje se neretko ponavlja na godišnjem nivou. U literaturi [6] prikazana je metoda ultrazvučnog čišćenja brodova, pri čemu je eksperimentalno potvrđeno povećanje efikasnosti čišćenja uz korišćenje sistema za pozicioniranje i orijentaciju samog ultrazvučnog pretvarača. Ultrazvučno čišćenje se takođe

primenjuje i kod čišćenja hrastovih buradi za skladištenje alkohola, gde se pokazalo čak tri puta efikasnijim od standardnih industrijskih metoda. Uočeno je i da se snažnim ultrazvukom postiže uniformno delovanje koje ne utiče na promene unutrašnje strukture drveta, produžavajući na taj način njegov vek [7].

Međutim, da bi ultrazvučni pritisak u tečnosti bio uniformno raspoređen, u primenjenim metodama se koriste najmanje po dva ultrazvučna pretvarača pobuđivana na različitim frekvencijama [8], ili pretvarači koji se mogu istovremeno pobuditi različitim električnim signalima.

Cilj istraživanja u ovoj disertaciji je projektovanje kompozitnih pretvarača koji se mogu istovremeno pobuditi različitim električnim signalima. Značaj projektovanja ovakvih pretvarača ogleda se u postizanju većeg stepena fleksibilnosti i efikasnosti pri radu, što ih čini pogodnim za primenu u različitim granama industrije.

Važna industrijska primena snažnog ultrazvuka, uspešno korišćena više od pola veka, je spajanje termoplastičnih ili metalnih elemenata korišćenjem ultrazvučne energije. Proces ultrazvučnog zavarivanja je brzo napredovao od faze razvoja, u šezdesetim godinama prošlog veka, preko upotrebe u industriji igračaka i električnih aparata u ranim sedamdesetim godinama prošlog veka [9], sve do upotrebe u poluprovodničkoj industriji [10]. Sam proces ultrazvučnog zavarivanja je brz, ekološki čist, bez potrošnih i otpadnih materijala. Takođe, navedeni proces se lako automatizuje za serijsku proizvodnju delova kod kojih plastika zamenjuje metal i staklo kao glavni resurs ili za proizvodnju delova od metala različitih karakteristika.

Zavarivanje plastike prvenstveno je termalni proces, jer se lokalne temperature oko spojeva povećavaju do nivoa dovoljnog za spajanje usled mehaničkih naprežanja materijala tretiranih snažnim ultrazvukom. Međutim, za razliku od konvencionalnih tehnika, porast temperature je lokalizovan samo oko spojeva, tako da ne postoji opasnost od deformacija ostalih delova plastičnog elementa. Ova prednost se delimično ostvaruje zbog toga što termoplastične materijale karakterišu dobre prenosne osobine akustičke energije kao i mala termička provodnost. Pored toga, usled delovanja jakog ultrazvuka toplota se generiše isključivo na spoju delova materijala, tako da je moguće postići varove i na mestima koja su nepristupačna za konvencionalne metode zavarivanja. Završni proces u proizvodnji električnih uređaja može biti zavarivanje delova koji sadrže već ugrađenu elektroniku, i stoga ultrazvučno zavarivanje

predstavlja pogodnu tehniku u savremenoj proizvodnji.

U ultrazvučnom zavarivanju, kao i u većini primena ultrazvučnog čišćenja, koristi se opseg frekvencija oko 20 kHz, pri čemu se kod zavarivanja funkcionalnost delovanja ultrazvuka ne oslanja na efekat kavitacije. Ultrazvučno zavarivanje podrazumeva primenu i do deset puta veće gustine snage u zoni zračenja u odnosu na ultrazvučno čišćenje. Optimizacija u primeni ove tehnologije postiže se inovacijama u projektovanju sonotrode (metalni krajnji nastavak ultrazvučnog pretvarača) [11].

Ultrazvučno zavarivanje metala, za razliku od polimera, ostvaruje se čvrstom vezom na spoju delova metala i snažnim ultrazvučnim smičućim silama, dok pravac prostiranja oscilacija mora biti normalan u odnosu na površinu spoja. Ultrazvučno zavarivanje je naročito korisno kod zavarivanja delova od materijala različitih fizičkih i hemijskih osobina, što ima veliki potencijal za primenu u proizvodnji kompozitnih materijala [12].

Poslednjih godina primetna je komercijalizacija procesa ultrazvučne integracije - *Ultrasonic Consolidation* (UC), poznate i kao ultrazvučna aditivna proizvodnja - *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM). Integralni deo ultrazvučne aditivne proizvodnje je ultrazvučno zavarivanje. U ovom procesu se dobija ultrazvučno zavarena kompozitna celina od slojevito naređanih materijala različitih karakteristika (npr. metalnih listova i folija nemetala) pod pritiskom. Iako se još uvek preduzimaju opsežna istraživanja ka automatizaciji i optimizaciji procesa i alata, prednost dobijanja kompozitnih celina navedenim postupkom ogleda se u odsustvu varnica, topljenja i curenja materijala [13].

Ultrazvučne bušilice, za razliku od konvencionalnih sistema za bušenje, ne sadrže zupčanike i rotirajuće elemente, i mogu se prilagoditi radu u širokom temperaturnom opsegu. Alat za bušenje ne zahteva oštrenje, tako da efikasnost bušenja ne zavisi od vremena upotrebe alata. Velika prednost ultrazvučnih sistema za bušenje je i mogućnost korišćenja alata sa poprečnim presekom različitog oblika (kružni, pravougaoni, šestougaoi). Pored toga, konvencionalni sistemi za bušenje zahtevaju veliku silu u smeru bušenja. Na primer, za bušenje tvrdog materijala klasičnom bušilicom potrebna je sila od 100 N do 150 N. Pri tome se pri radu javlja obrtni moment veći i od 30 Nm, kao i tangencijalne sile koje prelaze 100 N i koje se ne javljaju kod upotrebe ultrazvučnih bušilica kod kojih je potrebna sila manja od 10 N [14]. Drugim rečima, pri ultrazvučnom bušenju dovoljna je sopstvena težina ultrazvučnog sistema. Ako se umesto alata za bušenje u obliku šipke koristi alat u obliku cevi, dobija se uređaj za

bušenje i uzimanje uzoraka. Ultrazvučne bušilice prave otvore prečnika neznatno većeg od prečnika samog alata za bušenje, pa se mogućnost narušavanja integriteta uzorka smanjuje na minimum [15].

Prednost ultrazvučnog sečenja različitih materijala, od primene u konditorskoj industriji, preko metalurgije, do primene u medicini, nad konvencionalnim mehanizmima za sečenje prvenstveno se ogleda u velikoj preciznosti, maloj količini otpada, velikoj brzini sečenja i manjem generisanju toplotne energije. Poslednjih godina ultrazvučno sečenje postaje nezaobilazan proces u medicini, naročito u oralnoj hirurgiji gde beleži značajan porast broja primena u ultrazvučnoj osteotomiji [16].

Najčešći opseg frekvencija ultrazvučnog sečenja je između 20 kHz i 40 kHz, pri čemu je radni mod prvi debljinski mod oscilovanja ultrazvučnog pretvarača. Glavni nedostatak u ovoj primeni je radni vek samog sečiva, koji proizilazi iz neprilagođenosti po impedansi između sečiva i materijala koji se seče, pri čemu se javljaju izraženi efekti spregnutih modova, kao i nelinearni odzivi. Ultrazvučni pretvarači pobuđeni snagom većom od snage praga linearnog odziva dovode do nepredvidljivih oscilacija unapred prilagođenih sečiva. Nelinearni odziv otežava eksploataciju ultrazvučnih sistema složenih geometrija, koje karakteriše veliki broj modova oscilovanja [17]. Ultrazvučni sistem pobuđen u blizini rezonantne frekvencije može pokazati i efekte koje prouzrokuju jedan ili više viših rezonantnih modova koji su u sprezi sa radnim modom [18]. Dakle, na odziv sistema utiče više rezonantnih modova. Dejstva ovakve sprege modova se ispoljavaju visokim nivoom buke, bržim starenjem komponenata i lošim radnim karakteristikama. Nelinearni odziv mehaničkih sistema kakvi su ultrazvučni sistemi velikih snaga se usled inherentnih izvora nelinearnosti javlja čak i kod najprostijih ultrazvučnih sistema [19]. Zbog kompleksnosti ultrazvučnog sistema teško je u fazi projektovanja predvideti njegov nelinearni odziv. Prema tome, usled nelinearnog ponašanja ultrazvučnog sistema i njegovih sastavnih delova, ultrazvučna obrada i sečenje su nedovoljno iskorišćeni u industriji. Potreba za prevazilaženjem navedenih nedostataka rezultirala je razvojem novih tehnika projektovanja ultrazvučnih sistema i alata. Nove tehnike projektovanja za dobijanje pouzdanih snažnih ultrazvučnih sistema obezbeđuju uniformne oscilacije i prihvatljive nivoe naprežanja u metalnim nastavcima ili sečivima. Ove tehnike se uglavnom baziraju na smanjenju broja rezonantnih modova pravilnom upotrebom metalnih nastavaka sa tačno definisanim karakteristikama [20].

Novija istraživanja u oblasti primene snažnog ultrazvuka usmerena su ka optimizaciji dizajna

metalnih nastavaka modelovanjem numeričkim i analitičkim metodama, kao i upotrebom preciznih uređaja za merenje vibracija, mehaničkih pomeraja i naprezanja [21]. Rezultat navedenih istraživanja je razvoj nove generacije ultrazvučnih medicinskih noževa koji imaju približno uniformne oscilacije i uzrokuju minimalni porast temperature pri radu [22].

Poslednjih godina snažan ultrazvuk frekvencije od 20 kHz do 100 kHz intenzivno se primenjuje u hemiji, u okviru sonochemije. S obzirom na talasnu dužinu koja prevazilazi dimenzije molekula, osnovni princip sonochemije je interakcija ultrazvučnog talasa sa materijom koja se ne odvija na molekularnom nivou, već podrazumeva korišćenje ekstremnih hemijskih i fizičkih efekata koji nastaju u interakciji ultrazvuka sa materijom u celini.

Sinteza polimera je u početku bila primarna oblast primene ultrazvuka u hemiji [23]. S obzirom da proces polimerizacije podrazumeva konstantno usavršavanje postojećih materijala, kao i povećanje stepena ekonomičnosti i efikasnosti primenjenih metoda, primena sonochemije u navedenoj oblasti je u stalnom porastu. Na polimere mogu uticati i hemijski i fizički efekti ultrazvuka. Kada je reč o fizičkim efektima ultrazvuka, oni su uglavnom izazvani strukturnim i morfološkim promenama materijala usled strujanja uzrokovanih interakcijom ultrazvuka sa tečnošću, odnosno, procesom intenzivnog mešanja, kao i lokalnim zagrevanjem tečnosti. Takođe, ultrazvuk u sonochemiji se koristi i za dobijanje novih katalitičkih materijala [24], u biotehnologiji za modifikaciju aktivnosti enzima i ćelija [25], kao i za biohemijske tretmane u zaštiti životne sredine [26].

Posebna pažnja u ovoj disertaciji je usmerena ka primenama ultrazvuka niskih frekvencija i velike snage, gde snažni ultrazvučni pretvarači ostvaruju veliku efikasnost u praktičnoj primeni. Iako se ultrazvuk na visokim frekvencijama često koristi u oblastima sonochemije (na primer kod procesa oksidacije u preradi hrane, na frekvencijama oko 1 MHz) [27], u nastavku je posebna pažnja usmerena na oblasti primene ultrazvuka niskih frekvencija u prehrambenoj industriji i tretmanu voda, koje su u stalnom porastu.

Prva upotreba snažnog ultrazvuka u prehrambenoj industriji zabeležena je u procesu dobijanja emulzija. Naime, fizički i/ili hemijski efekti ultrazvučnih talasa mogu menjati svojstva materije (fizički integritet, ubrzanje procesa hemijskih reakcija) putem generisanja snažnog pritiska, velike snage smicanja, kao i pojave lokalnih gradijenata temperature u propagacionom medijumu. Na taj način se u procesima fermentacije, sterilizacije i pasterizacije ostvaruje pozitivan efekat delovanja snažnog ultrazvuka na modifikaciju

karakteristika namirnica, sa minimalnim uticajem na hranljive sastojke tokom obrade [28]. Takođe, ultrazvučna snaga u kombinaciji sa termičkim i hemijskim tehnikama pri preradi hrane smanjuje broj patogenih bakterija [29]. Dodatno, primena snažnog ultrazvuka u procesu zamrzavanja [30], kao i u procesima koji uključuju zagrevanje hrane [31], štedi energiju i obezbeđuje minimalan gubitak kvaliteta namirnica.

U procesu prerade pijaćih i otpadnih voda, radi postizanja većeg stepena efikasnosti konvencionalnih procesa koristi se snažan ultrazvuk u predfazi prerade. Na taj način se obezbeđuje efikasno uklanjanje i/ili transformacija organskih zagađivača, kao i ograničavanje reproduktivne sposobnosti mikroorganizama [32]. Takođe, snažnim ultrazvukom u kombinaciji sa drugim fizičkim i hemijskim metodama ostvaruje se dekontaminacija vode u uslovima brzog protoka [33].

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 magnetnostriktivni) i na one koji se pobuđuju električnim poljem (piezoelektrični, dielektrični i elektrostrikcioni) [34]. Magnetostriktivni materijali se koriste kao aktuatori ultrazvučnih pretvarača, jer poseduju veliku gustinu snage i veliku brzinu odziva. Ograničenost primena magnetostriktivnih 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 elektrostrikcioni pretvarača.

Za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji korišćeni su materijali koji poseduju piezoelektrične osobine. U drugom poglavlju prikazane su najvažnije karakteristike ultrazvučnih sistema velikih snaga sa stanovišta izbora elemenata pretvarača i same konstrukcije pretvarača, uključujući i efikasnost primene ovakvih sistema u industriji.

Inovacije u industrijskoj primeni snažnog ultrazvuka odnose se kako na procese

projektovanja, tako i na razvoj i izradu efikasnih ultrazvučnih pretvarača [35]. 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 [36]. 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.

Osnovni zadatak istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji odnosi se na procese projektovanja, razvoja i realizacije dve nove strukture kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage. U drugom poglavlju prikazana je prva struktura kompozitnog pretvarača dobijena mehaničkom serijskom vezom dva Langevin-ova pretvarača. Predloženi kompozitni pretvarač 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). Prednaprežanje strukture je ostvareno pomoću dva centralna zavrtnja koja povezuju srednju masu sa krajnjim metalnim nastavcima. Takođe, u drugom poglavlju prikazana je i druga struktura novorealizovanog kompozitnog pretvarača koja je dobijena nadogradnjom prve strukture. Prednaprežanje strukture je u ovom drugom slučaju ostvareno jednim 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.

U trećem poglavlju ove disertacije prikazani su matematički principi dobijanja Mason-ovog modela i KLM modela piezokeramike, izvedenih iz pojednostavljenih jednačina koje opisuju piezoelektrični efekat i talasne jednačine, korišćenjem jednodimenzionalne analize. Naime, osnova velikog broja jednodimenzionalnih modela opisanih u literaturi za modelovanje, projektovanje i optimizaciju ultrazvučnih pretvarača je Mason-ov model [37]. 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. Prema Mason-u, u jednodimenzionalnoj analizi se problemi vezani za rešavanje sistema talasnih jednačina u elektromehaničkim sistemima mogu prevazići primenom teorije električnih mreža. Međutim, ovaj model ima nekoliko nedostataka od kojih su najuočljiviji: prisustvo negativne kapacitivnosti, nedostatak jasne razlike između električnih i mehaničkih delova sistema, kao i kompleksnost modela koji uključuje ceo višeslojni pretvarač. U cilju rešavanja ovih nedostataka razvijeno je alternativno ekvivalentno kolo, KLM model, čija primena omogućava jasniji opis ponašanja piezokeramike pri oscilovanju [38]. U trećem poglavlju prikazana je i jednodimenzionalna analiza oscilovanja metalnih cilindričnih rezonatora, koja se takođe oslanja na tehnike razvijene u teoriji električnih mreža.

Poseban cilj istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji odnosi se na prepoznavanje korisnih rezonantnih modova u ukupnom frekvencijskom opsegu, kao osnovnog uslova za primenu efikasnih ultrazvučnih pretvarača.

Za potrebe prepoznavanja prirode rezonantnih modova koji se pobuđuju, analitički pristup modelovanju može se primeniti i sa dvodimenzionalnim modelima (gde oni obuhvataju samo radijalne rezonantne modove) i trodimenzionalnim modelima (koji mogu obuhvatiti debljinske, radijalne, fleksione, ivične, torzione i druge rezonantne modove).

Novi predloženi kompozitni ultrazvučni pretvarači su modelovani korišćenjem

aproksimativnih trodimenzionalnih matričnih modela prikazanih u literaturi [39], u programskom paketu Matlab/Simulink¹. Pomoću ovih modela koji opisuju i debljinske i radijalne modove, kao i njihovu međusobnu spregu, piezoelektrični elementi su prikazani kao mreže sa pet pristupa (jednim električnim i četiri mehanička pristupa koji odgovaraju njihovim konturnim površinama). Pasivni metalni nastavci prikazani su kao mreže sa četiri ili tri pristupa u zavisnosti od toga da li su u obliku prstena ili diska sa odgovarajućim mehaničkim veličinama na pristupima (sile i brzine na cilindričnim površinama, i sile i brzine na kružno-prstenastim površinama). Takođe, u trećem poglavlju prikazana je detaljna analiza korišćenih aproksimativnih trodimenzionalnih matričnih modela piezokeramičkog prstena opterećenog na svim konturnim površinama, i metalnog nastavka cilindričnog oblika sa ili bez otvora.

U četvrtom poglavlju prikazani su generalni jednodimenzionalni modeli predloženih kompozitnih pretvarača, koji uključuju sve sastavne delove pretvarača. Kod pretvarača sa malim aksijalnim dimenzijama prisustvo zavrtnja je značajno prilikom određivanja rezonantne frekvencije, dok se kod pretvarača sa većim aksijalnim dimenzijama uticaj zavrtnja može zanemariti. U cilju dokazivanja ispravnosti prikazanog postupka modelovanja pretvarača predloženim generalnim jednodimenzionalnim modelima, u četvrtom poglavlju prikazan je i jednodimenzionalni model koji ne uključuje uticaj centralnog zavrtnja. Zbog zanemarivanja uticaja centralnog zavrtnja, takav jednodimenzionalni model je prema svojoj strukturi odgovarajući za istovremenu analizu rada oba predložena kompozitna ultrazvučna pretvarača.

U četvrtom poglavlju prikazani su razvoj i implementacija modularnih rešenja trodimenzionalnih modela piezokeramičkih prstenova i trodimenzionalnih modela pasivnih metalnih delova pretvarača u programskom paketu Matlab/Simulink. U disertaciji su prikazani i razvijeni i trodimenzionalni modeli celih kompozitnih pretvarača, koji su dobijeni primenom procedure za dobijanje ekvivalentnih kola pri modularnom pristupu modelovanju. Značaj primene novorazvijenih modela ogleda se u jednostavnosti određivanja bilo koje prenosne funkcije posmatranog kompozitnog pretvarača u širokom frekventijskom opsegu. Takođe, pri modelovanju pretvarača se pored uticaja debljinskih i radijalnih modova svakog sastavnog dela pretvarača mogu uzeti u obzir i uticaji spoljašnje sredine.

¹ <http://www.mathworks.com/>

U cilju optimizacije strukture predloženih kompozitnih pretvarača, u četvrtom poglavlju prikazana je i analiza zavisnosti efektivnog elektromehaničkog faktora sprege u funkciji promena dimenzija sastavnih delova pretvarača. Navedena analiza je obavljena korišćenjem predloženog trodimenzionalnog modela na osnovu izračunate karakteristike zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije. Elektromehanički faktor sprege je najkorisniji parametar koji u potpunosti karakteriše konverziju energije u pretvaraču. Njime je moguće za dati rezonantni mod i datu geometriju sastavnih delova kompozitnog piezoelektričnog pretvarača proceniti sposobnost pretvarača da konvertuje električnu u mehaničku energiju i obrnuto. Takođe, na kraju četvrtog poglavlja date su preporuke za optimalan odnos dimenzija sastavnih delova pretvarača pri upotrebi dostupnih piezokeramičkih prstenova sa unapred definisanim karakteristikama i dimenzijama.

U petom poglavlju prikazane su eksperimentalne i modelovane zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije. Na osnovu rezultata projektovanja primenom predloženih trodimenzionalnih modela realizovani su novi kompozitni pretvarači. Ispravnost korišćenja predloženih modela u postupku projektovanja pretvarača potvrđena je simulacijama u programskom paketu Matlab/Simulink, i eksperimentalnim merenjima ulazne električne impedanse realizovanih kompozitnih pretvarača.

Za razliku od dosadašnjih pristupa u projektovanju ultrazvučnih sendvič pretvarača, u ovoj disertaciji je, pored analize osnovnog debljinskog rezonantnog moda, posebna pažnja posvećena obliku i položaju viših rezonantnih modova, kao i uticaju različitih parametara na njihove karakteristike. U cilju identifikacije prirode rezonantnih modova oscilovanja, u petom poglavlju je prikazana detaljna analiza uticaja dimenzija svih sastavnih delova pretvarača, kao i analiza uticaja akustičkog opterećenja na svim spoljašnjim površinama pretvarača na promenu ulazne električne impedanse pomoću predloženih trodimenzionalnih modela.

2 GENERISANJE ULTRAZVUČNIH TALASA

Snažan ultrazvuk predmet je istraživanja od 1917. godine, kada je Langevin realizovao ultrazvučni pretvarač sa kvarcom kao pobudnim materijalom [36]. Period intenzivnog razvoja i primene ultrazvuka poklapa se sa periodom razvoja akustike. Prvi naučni rad iz oblasti akustike publikovan je 1729. godine (ser Isac Newton - *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*). Godine 1826. švajcarski fizičar i inženjer Jean-Daniel Colladon i francuski matematičar Jacques Charles François Sturm odredili su brzinu zvuka u vodi sa velikim stepenom preciznosti [40]. 1840. godine James Prescott Joule je proučavajući pojave elektriciteta i magnetizma otkrio pojavu magnetostrikcije u materijalima. Navedena naučna istraživanja su imala pozitivan uticaj na razvoj ultrazvuka, iako se prava revolucija u primeni ultrazvuka dogodila nešto kasnije (1881. godine), kada su braća Jacques i Pierre Curie pronašli i objasnili piezoelektrični efekat, omogućavajući na taj način brži razvoj ultrazvučnih pretvarača [41]. Lewis Fry Richardson patentira prvi aktivni sonar 1912. godine, pri čemu su se do tog perioda koristili nedovoljno precizni pasivni sonari [40]. Kanadski pronalazač Reginald Aubrey Fessenden je 1914. godine projektovao i konstruisao prvi snažni elektroakustički pretvarač, koji je služio i kao prijemnik i kao predajnik [42]. Krajem dvadesetog veka naučna istraživanja vezana za snažan ultrazvuk zasnivala su se na osnovama fizičke akustike, matematike i elektronike [43].

Za generisanje snažnog ultrazvuka koriste se elektroakustički pretvarači. Svaki elektroakustički pretvarač sadrži materijale koji mogu pod dejstvom odgovarajuće pobude vršiti procese sabijanja i širenja. Predmet analize u ovoj disertaciji su piezoelektrični materijali u vidu piezokeramičkih prstenova polarizovanih po debljini (sa polarizacijom u pravcu z -ose), i sa metalizovanim ravnim kružno-prstenastim površinama na koje se dovodi naizmenični pobudni napon.

2.1 Piezoelektrični efekat

Delovanjem mehaničkog opterećenja u određenom pravcu na piezoelektrični materijal generiše se elektrostatičko naelektrisanje na površini materijala, što je pojava poznata kao piezoelektrični efekat. Suprotno tome, dovodenjem električnog napona na odgovarajuće površine piezoelektričnog materijala javlja se mehaničko naprezanje i pomeranje tačaka samog piezoelektričnog materijala. Ova pojava se naziva inverzni (obrnuti) piezoelektrični efekat. Zbog navedenih pojava piezoelektrični materijali spadaju u klasu aktivnih materijala koji se brzo adaptiraju na uticaj promena iz okolne sredine [44]. Piezoelektrični, elektrostriktivni i magnetostriktivni materijali su neki od primera aktivnih materijala koji se danas koriste. Kod materijala sa anizotropnom strukturom piezoelektrični efekat zavisi od pravca delovanja električnog polja, odnosno mehaničke deformacije materijala.

Kompleksna struktura piezoelektričnih materijala može se predstaviti velikim brojem parametara (koeficijenata). Broj parametara kojima se karakterišu piezoelektrični materijali zavisi od vrste i načina primene materijala. U procesu proizvodnje, piezoelektrični materijali se zagrevaju do visokih temperatura i izlažu jakom jednosmernom električnom polju. Na taj način, piezoelektrične materijale pored sprege električnih i mehaničkih efekata karakterišu i termički efekti.

Za opis ponašanja piezoelektričnih materijala koriste se konstitutivne jednačine [45]. Kod nepiezoelektričnog dielektričnog materijala, dielektrični pomeraj D ($C \cdot m^{-2}$) je direktno proporcionalan proizvodu jačine električnog polja E ($V \cdot m^{-1}$) i dielektrične konstante ε ($F \cdot m^{-1} = C \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$). Električna polarizacija izazvana mehaničkom deformacijom kod piezoelektričnog materijala srazmerna je piezoelektričnoj konstanti napona e ($C \cdot m^{-2}$). Primenom Hooke-ovog zakona elastičnosti pokazuje se da je relativna deformacija elastičnog tela u određenim granicama direktno proporcionalna mehaničkom naponu T ($N \cdot m^{-2}$) koji na njega deluje. Upotrebom ovih relacija, sprega električnih i mehaničkih efekata piezoelektričnih materijala može se izraziti u tenzorskom obliku preko sledećih veličina: D dielektrični pomeraj, T mehanički napon, E električno polje, S mehanička deformacija. Navedene veličine međusobno povezuju sledeći koeficijenti materijala u matricnom obliku: elastična deformacija s , dielektrična konstanta ε , piezoelektrične konstante h i e , piezoelektrični koeficijent naelektrisanja d , kao i piezoelektrični naponski koeficijent g :

$$\begin{aligned} [S]_{1 \times 6} &= [s^E]_{6 \times 6} [T]_{1 \times 6} + [d]_{3 \times 6} [E]_{1 \times 3}, \\ [D]_{1 \times 3} &= [d]_{6 \times 3} [T]_{1 \times 6} + [\varepsilon^T]_{3 \times 3} [E]_{1 \times 3}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} [T]_{1 \times 6} &= [c^E]_{6 \times 6} [S]_{1 \times 6} - [e]_{3 \times 6} [E]_{1 \times 3}, \\ [D]_{1 \times 3} &= [e]_{6 \times 3} [S]_{1 \times 6} + [\varepsilon^S]_{3 \times 3} [E]_{1 \times 3}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} [S]_{1 \times 6} &= [s^D]_{6 \times 6} [T]_{1 \times 6} + [g]_{3 \times 6} [D]_{1 \times 3}, \\ [E]_{1 \times 3} &= -[g]_{6 \times 3} [T]_{1 \times 6} + [\beta^T]_{3 \times 3} [D]_{1 \times 3}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} [T]_{1 \times 6} &= [c^d]_{6 \times 6} [S]_{1 \times 6} - [h]_{3 \times 6} [D]_{1 \times 3}, \\ [E]_{1 \times 3} &= -[h]_{6 \times 3} [S]_{1 \times 6} + [\beta^S]_{3 \times 3} [D]_{1 \times 3}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

U izrazima (2.1) - (2.4) predstavljeni su konstitutivni skupovi piezoelektričnih jednačina. Prikazani skupovi jednačina su međusobno identični i mogu se dobiti manipulacijom matrica koeficijenata. Za analizu ponašanja piezoelektričnog materijala uz korišćenje poznate matrice koeficijenata potrebno je odabrati samo jedan skup konstitutivnih jednačina. U kombinaciji sa talasnom jednačinom, izrazi (2.1) - (2.4) predstavljaju polazne jednačine za analizu ponašanja piezoelektričnih materijala [46].

Piezoelektrična konstanta je u jednačinama prikazana na četiri načina, pri čemu se do svakog pojedinačnog izraza može doći konverzijom na sledeći način:

$$d = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_T = \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E, \quad e = - \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S = \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_T, \quad (2.5)$$

$$g = \left(\frac{\partial S}{\partial D} \right)_T = - \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_D, \quad h = - \left(\frac{\partial T}{\partial D} \right)_S = - \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_D.$$

Indeksi u parcijalnim izvodima označavaju da se odgovarajuća veličina smatra konstantnom ili jednakom nuli.

Za rešavanje konstitutivnih jednačina potrebna su 63 različita koeficijenta (36 konstanti elastičnosti, 18 piezoelektričnih i 9 dielektričnih konstanti). Međutim, potreban broj koeficijenata se značajno smanjuje u zavisnosti od vrste piezoelektričnog materijala.

U ovoj disertaciji korišćene su trajno polarizovane keramike koje imaju heksagonalni kristalni sistem, koga karakteriše deset međusobno nezavisnih koeficijenata. Preostalih 53 koeficijenta

su međusobno jednaki ili jednaki nuli, što se može videti u razvijenom obliku jednačine (2.1) [47]:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Iz prethodnih izraza može se zaključiti da se detaljan opis piezoelektričnog materijala može predstaviti primenom odgovarajućih koeficijenata.

Jedan od načina predstavljanja slabljenja ultrazvučnih talasa u materijalu je preko imaginarnog dela pojedinih koeficijenata piezoelektričnog materijala datih u kompleksnom obliku, od kojih se svaki koeficijent odnosi na specifičan izvor slabljenja. Takođe, jedan od mogućih načina predstavljanja slabljenja ultrazvučnih talasa u materijalu je preko koeficijenata slabljenja, koji se dobijaju merenjem prostiranja ultrazvučnih talasa uz pretpostavku da slabljenje ultrazvučnih talasa raste sa rastojanjem i da je linearno zavisno od frekvencije [48]. Rezultati dobijeni na ovaj način mogu biti od velike koristi pri analizi ponašanja materijala ako se posle niza merenja izvrši dodatno podešavanje polaznih koeficijenata slabljenja.

Alternativni pristup predstavljanju slabljenja ultrazvučnih talasa u materijalu podrazumeva odvojeno posmatranje električnih i mehaničkih gubitaka. Električni gubici se izražavaju faktorom gubitaka $\text{tg}\delta$, gde je δ ugao u kompleksnoj ravni između vektora impedanse piezoelektričnog materijala na nerezonantnoj frekvenciji (tipično 1 kHz) i negativnog dela imaginarne ose. Na ovaj način se piezoelektrični materijal na nerezonantnoj frekvenciji može predstaviti kao redna veza idealnog kondenzatora i otpornika čija otpornost predstavlja ekvivalentne električne gubitke u materijalu [44]. Faktor gubitaka jednak je recipročnoj vrednosti električnog faktora dobrote Q_E . Mehanički gubici se najčešće prikazuju preko vrednosti mehaničkog faktora dobrote Q_M (koji se određuje primenom impedansne spektroskopije i jednačina zasnovanih na ekvivalentnim električnim kolima).

Elektromehanički faktor sprege piezoelektričnog materijala objedinjuje sve elastične, piezoelektrične i dielektrične konstante materijala. Elektromehaničkim faktorom sprege procenjuje se sposobnost da se u pretvaraču za dati rezonantni mod i datu geometriju pretvarača konvertuje električna energija u mehaničku energiju, i obrnuto. Elektromehanički faktor sprege k ($0 < k < 1$) se definiše kao odnos gustine međusobne elastične i dielektrične energije U_m , i geometrijske sredine gustine elastične energije U_e i gustine dielektrične energije U_d [49]:

$$k = \frac{U_m}{\sqrt{U_e U_d}}. \quad (2.7)$$

Ukupna gustina energije u materijalu definiše se kao:

$$U = \frac{1}{2}[S][T] + \frac{1}{2}[D][E]. \quad (2.8)$$

Elektromehanički faktor sprege jedan je od najvažnijih koeficijenata piezoelektričnog materijala i izražava korisni rad u svakom ciklusu konverzije energije [50]. Najčešće se navode faktori sprege pomoću oznake k_{mn} , gde m predstavlja indeks kristalografske ose duž koje je povezano opterećenje, dok n predstavlja indeks kristalografske ose duž koje je materijal pobuđen. Na primer, k_{31} je elektromehanički faktor sprege oscilacija transversalno pobuđenog dugog štapa i odnosi se na piezoelektrični materijal sa elektrodama normalnim u odnosu na z -osu. Postoji veliki broj elektromehaničkih faktora sprege sa različitim vrednostima i stepenima složenosti u odnosu na geometriju i pravce polarizacije i pobude materijala. U praksi se najčešće koriste faktor sprege longitudinalno pobuđenog dugog štapa k_{33} (u pravcu z -ose, $T_3=0$), i faktor sprege debljinskih oscilacija kod tanke ploče k_t (deformacije u xy -ravni jednake su nuli).

Za određivanje elektromehaničkog faktora sprege k_{33} , piezokeramičkih prstenova koji osciluju u debljinskom pravcu, uvode se sledeće aproksimacije: izotropna struktura piezoelementa, polarizacija duž z -ose i skraćeno indeksiranje tenzora mehaničkog napona s obzirom na simetriju u odnosu na z -osu.

S obzirom da je posmatrani materijal polarizovan duž z -ose i da se električni napon dovodi na metalizovane kružno-prstenaste površine, važi da je $E_1=E_2=0$ i $D_1=D_2=0$. Tako se jednačina (2.1) transformiše u konačan oblik [47]:

$$\begin{aligned}
S_1 &= s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3, \\
S_2 &= s_{12}^E T_1 + s_{11}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3, \\
S_3 &= s_{13}^E T_1 + s_{13}^E T_2 + s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3, \\
D_3 &= d_{31} T_3 + d_{31} T_3 + d_{33} T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Ako na bočnim površinama ne deluje spoljašnja sila (ostvarena su naprezanja samo u debljinskom pravcu), važi da je $T_1=T_2=0$ i izraz (2.9) dobija oblik:

$$\begin{aligned}
S_1 &= s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3, \\
S_2 &= s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3, \\
S_3 &= s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3, \\
D_3 &= d_{33} T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3.
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Kombinacijom zadnja dva izraza, ukupna gustina energije predstavlja se na sledeći način:

$$U = \frac{1}{2} S_3 T_3 + \frac{1}{2} D_3 E_3 = \frac{1}{2} s_{33}^E T_3^2 + 2 \frac{1}{2} d_{33} E_3 T_3 + \frac{1}{2} \varepsilon_{33}^T E_3^2 = U_e + 2U_m + U_d. \tag{2.11}$$

Kombinacijom jednačina (2.7) i (2.11) dobija se elektromehanički faktor sprege za piezoelektrične prstenove sa oscilacijama u pravcu z -ose:

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E}}. \tag{2.12}$$

Na sličan način se dobija i faktor sprege debljinskih oscilacija kod tanke ploče [51]:

$$k_t = h_{33} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^E}{c_{33}^D}}. \tag{2.13}$$

U praksi se k_t najčešće koristi i najlakše ga je eksperimentalno odrediti iz frekvencijske karakteristike električne impedanse materijala [52].

Pored toga, parametri piezoelektričnog materijala koji se često koriste pri projektovanju

pretvarača su: karakteristična akustička impedansa Z , brzina prostiranja ultrazvučnih talasa v i gustina materijala ρ . Od posebnog značaja u praksi je karakteristična akustička impedansa koja se izračunava kao proizvod gustine materijala i brzine prostiranja ultrazvučnih talasa [53], i izražava se u Rayl, ili češće MRayl, pri čemu važi odnos $1 \text{ Rayl} = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} = 10 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ [54].

2.2 Piezoelektrični materijali

Piezoelektrični efekat je svojstvo grupe materijala, otkriveno tokom proučavanja uticaja pritiska na generisanje električnog napona na kristalima poput kvarca, tormalina i Rošelove soli. Prva grupa piezoelektrika otkrivena je pronalaskom kalijum dihidrogen fosfata (KDP). Ograničene performanse ovih materijala su sprečavale komercijalizaciju njihove primene sve do pojave materijala sa najvišim performansama na bazi olova, odnosno do otkrića barijum-titanata i olovo- cirkonijum-titanata (PZT) [45].

Piezoelektrični materijali koji se danas najviše koriste za generisanje ultrazvuka mogu se podeliti u četiri grupe: piezokeramike, piezopolimeri, piezokristali i piezokompoziti.

2.2.1 Piezokeramike

Najčešće korišćeni piezokeramički materijal za izradu snažnih ultrazvučnih pretvarača je olovo-cirkonijum-titanat (PZT). Kristalografski, PZT je perovskit sa heksagonalnom simetrijom. Matrica koeficijenata materijala je simetrična u odnosu na glavnu dijagonalu, tako da veći broj koeficijenata ima iste vrednosti, ili su jednaki nuli, što smanjuje broj nezavisnih koeficijenta na 11 [55], a što je ilustrovano izrazom (2.6).

Poslednjih godina je PZT dostupan u različitim geometrijskim oblicima. Najjednostavnija klasifikacija PZT keramike prema feroelektričnim svojstvima je podela na meku i tvrdu piezokeramiku. Meku piezokeramiku je relativno lako polarizovati, čime se dobijaju: veliki elektromehanički faktor sprege, velike piezoelektrične i dielektrične konstante, i mali mehanički faktor dobrote. Najznačajniji predstavnik meke piezokeramike je PZT5H. Izražene piezoelektrične karakteristike PZT5H keramike obezbeđuju njenu veću osetljivost na oscilacije, što je čini pogodnom za senzorske primene.

Tvrda piezokeramika ima suprotna svojstva od meke keramike, teže se polariše, što je čini pogodnom za veća mehanička opterećenja i veće napone napajanja. Ako se uzme u obzir i visoka Kirijeva temperatura, tvrda piezokeramika je posebno pogodna za primene sa velikom izlaznom snagom. Najznačajniji predstavnici tvrde piezokeramike su PZT4 i PZT8 keramike. Nešto manje dielektrične i mehaničke gubitke ima PZT8 keramika, što je čini pogodnom za izradu pretvarača kojima se generišu velike gustine snage u zoni zračenja.

Na tržištu postoji veliki broj različitih piezokeramika neophodnih za ispunjenje specifičnih zahteva pojedinih aplikacija. Jedna od piezokeramika koju karakteriše visoka Kirijeva temperatura, mala akustička impedansa i mali mehanički faktor dobrote je olovni metaniobat, PbNbO_3 . Keramika PbNbO_3 je pogodna za realizaciju širokopoljnih ultrazvučnih pretvarača i za rad na povišenim temperaturama.

Za istraživanje prikazano u ovoj disertaciji korišćeni su prstenovi napravljeni od PZT4 i PZT8 piezokeramičkog materijala sa parametrima i konstantama materijala prikazanim u petom poglavlju (tabela 5.1).

2.2.2 Piezopolimeri

Najčešće korišćeni piezopolimer je poliviniliden fluorid (PVDF). Kristalografski on nema izraženu simetriju, jer se polarizacija umesto primenom električnog polja postiže istezanjem. Poliviniliden fluorid se može predstaviti sa 17 nezavisnih koeficijenata materijala. Piezopolimere karakteriše mala akustička impedansa, mali mehanički faktor dobrote i veliki piezoelektrični naponski koeficijent, što ih čini pogodnim za izradu širokopoljnih sonara i medicinskih dijagnostičkih uređaja [50].

2.2.3 Piezokristali

Prvi piezoelektrični materijali koji su počeli da se primenjuju bili su piezokristali, koji su kasnije u velikoj meri zamenjeni piezoelektričnom keramikom. Međutim, litijum-niobat LiNbO_3 [56] i aluminijum-nitrid AlN [57] su dva piezokristala sa posebnim svojstvima koja ih čine atraktivnim za specifične primene. U kristalografskom smislu, LiNbO_3 ima trigonalnu simetriju i može se predstaviti pomoću 12 nezavisnih elektroelastičnih koeficijenata. Piezokristal LiNbO_3 ima manju simetriju od PZT, ali veću simetriju od PVDF. Pogodan je za

primene pri visokim temperaturama (do 1200°C), ima male gubitke i veliku brzinu prostiranja longitudinalnih talasa, što ga čini posebno pogodnim za primene pri visokim frekvencijama. Piezokristal AlN ima istu kristalografsku simetriju kao PZT i donekle slične karakteristike kao LiNbO₃. Međutim, AlN u odnosu na PZT i LiNbO₃ se odlikuje velikom inertnošću, i primenjuje se u vidu kristala tankog filma pri minimalno invazivnom ili nedestruktivnom testiranju materijala.

2.2.4 Piezokompoziti

Piezoelektrični kompozitni materijali (piezokompoziti) imaju specifične osobine kao što su: poboljšani dinamički odziv, visoka osetljivost na slabe hidrostatičke promene i velika otpornost na mehanička oštećenja. Takođe, lakše se mehanički oblikuju od same PZT keramike. Piezokompoziti pokazuju piezoelektrična svojstva ako se prave od piezokeramika i polimera.

Piezokompoziti se sastoje uglavnom od dve komponente (tzv. dvofazni piezokompoziti). Dvofazne piezokompozite čine piezokeramika (najčešće PZT) i polimer. Polimer može biti piezoelektrični materijal (najčešće PVDF) ili pasivni materijal (najčešće epoksidna smola). Kompozitna struktura pruža mogućnost izrade raznih geometrijskih oblika piezokompozita. Takođe, pravilnim izborom kompozitnih slojeva mogu se ostvariti veliki faktor sprege u pravcu prostiranja talasa, male akustičke impedanse za lakše prilagođenje po impedansi sa prenosnim medijumom, kao i veća osetljivost i efikasnost. Nedostaci piezokompozita su: visoka cena proizvodnje, ograničena maksimalna radna temperatura, kao i male vrednosti relativne dielektrične konstante, što otežava prilagođenje po impedansi sa električnim generatorom [58].

2.3 Piezoelektrični pretvarači velike snage

Poslednjih godina uočen je konstantan porast primena snažnog ultrazvuka zahvaljujući inovacijama u postupcima projektovanja i izrade efikasnih ultrazvučnih pretvarača. Prvi ultrazvučni pretvarači napravljeni od piezokeramičkog materijala imali su jednoslojnu strukturu [59]. Jednoslojni pretvarač sadržao je samo ploču od piezokeramičkog materijala koja osciluje u osnovnom debljinskom rezonantnom modu. Pretvarači slične strukture se i danas koriste za generisanje ultrazvuka visokih frekvencija i malih snaga u zoni zračenja. Osnovni nedostatak ovih pretvarača ogleda se u potrebi za impedansnim prilagođenjem. Takođe, i pri korišćenju piezokompozitnog materijala koga karakteriše mala akustička impedansa, neophodan je sloj za prilagođenje. Da bi ovakav pretvarač oscilovao na nižim frekvencijama, ili sa većim amplitudama, potrebno je višestruko povećati debljinu upotrebljene piezokeramike. Piezokeramički materijal ima veću mehaničku otpornost pri kompresionom pritisku nego pri istezanju. Otpornost sastavnih delova pretvarača na mehanička naprezanja i istezanja na frekvencijama ispod 100 kHz, najčešće se povećava mehaničkim prednaprežanjem. Prednaprežanjem strukture postiže se održavanje piezokeramičkog materijala u stanju kompresije, čime se povećava i pouzdanost pretvarača.

Za generisanje velikih ultrazvučnih snaga koristi se posebna slojevita struktura (sendvič struktura) u kojoj piezoelektrični materijal osciluje istovremeno sa ostalim slojevima. Na ovaj način se kod pretvarača koji radi na nižim frekvencijama održava ulazna električna impedansa na zadovoljavajućem nivou. Prednaprežanje se može ostvariti jednim centralnim zavrtnjem ili sa više zavrtnjeva koji deluju po obodu strukture. Maksimalna sila mehaničkog prednaprežanja zavisi od kompozitne strukture keramike i od orijentacije mehaničkog napona. Male dimenzije pretvarača koji rade na frekvencijama iznad 100kHz isključuju korišćenje zavrtnja, tako da je neophodno obratiti pažnju na dozvoljene maksimalne vrednosti mehaničkih napona u dinamičkim uslovima.

Polutalasni ultrazvučni pretvarači sa sendvič strukturom koji osciluju u debljinskom pravcu nazivaju se Langevin-ovi sendvič pretvarači [36]. U ovoj strukturi radna frekvencija zavisi ne samo od rezonantne frekvencije piezoelektričnog materijala, već i od rezonantnih frekvencija ostalih pasivnih delova.

U Langevin-ovom pretvaraču piezoelektrični materijal ima mali procentualni udeo u ukupnoj

zapremeni pretvarača. Ovaj tip pretvarača karakteriše odgovarajuća mehanička struktura (reflektor - aktivni piezokeramički blok - emitor). Aktivni piezokeramički blok čine jedan ili više parova piezokeramičkih prstenova. Sprega između piezokeramičkih prstenova i metalnih nastavaka, kao i povećanje otpornosti na istežanje piezokeramike, postignuti su mehaničkim prednaprežanjem strukture u longitudinalnom pravcu pomoću centralnog zavrtnja. Iako je znatno viši obrtni moment potreban pri korišćenju jednog centralnog zavrtnja, preporučuje se njegova upotreba pre nego upotreba velikog broja perifernih zavrtnjeva. Prednost je u tome što je primenjeni mehanički napon ravnomernije raspoređen po poprečnom preseku, čime se postiže veća efikasnost pretvarača [60]. Zavrtnaj se bira na osnovu statičkih i dinamičkih parametara (mehaničkog napona i trenja).

Na osnovu potrebne izlazne ultrazvučne snage određuje se neophodan broj PZT piezokeramičkih prstenova u pretvaraču. Maksimalna snaga koja se može dobiti od jednog PZT prstena ne zavisi samo od kvaliteta piezokeramičkog materijala, već i od njegovih dimenzija i obično je između 10 W/cm^2 i 30 W/cm^2 . PZT prstenovi su na tržištu dostupni u različitim dimenzijama. U praksi se uglavnom koriste PZT prstenovi sa dužinom spoljašnjeg prečnika manjom od 50 mm, dužinom unutrašnjeg prečnika manjom od 20 mm i debljinom manjom od 6.5 mm [60]. Ovakav izbor dimenzija PZT prstenova koji se koriste za izradu snažnih ultrazvučnih pretvarača predstavlja kompromis između dobijanja maksimalne ultrazvučne snage i minimalne pojave parazitnih ivičnih oscilacija.

Efikasnost u prenosu energije između piezokeramike i metalnih nastavaka postiže se odgovarajućim izborom metalnih nastavaka. Maksimalna efikasnost u prenosu energije postiže se kada dva kontaktna materijala imaju iste akustičke impedanse [61]. 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. U praksi je najčešće akustička impedansa piezokeramike jednaka geometrijskoj sredini akustičnih impedansi materijala emitora i reflektora [62].

Pored gustine materijala, važni parametri pri odabiru materijala za metalne nastavke pretvarača su: termička provodljivost, mehanička čvrstoća materijala, kao i osetljivost na koroziju. Najčešće korišćeni materijali u praksi za izradu sendvič strukture su čelik-PZT-aluminijum (ili duraluminijum), dok je najefikasnija, ujedno i najskuplja varijanta titan-PZT-magnezijum [63].

2.3.1 Ograničenja pri projektovanju klasičnih ultrazvučnih pretvarača velike snage

Primenom snažne pobude ultrazvučnog pretvarača, u njegovim sastavnim delovima javljaju se mehanički naponi velikih intenziteta, zbog kojih se u određenim delovima strukture mogu javiti defekti i otkazi. U zavisnosti od konstrukcije pretvarača, otkazi najčešće nastaju u keramičkim elementima ili u vezivnim delovima između dva elementa (ukoliko su korišćeni).

Maksimalna izlazna snaga sendvič pretvarača ograničena je fizičkim osobinama materijala od kojih je napravljen, kao i akustičkim karakteristikama potrošača. Na maksimalnu izlaznu snagu pretvarača najviše utiču sledeće osobine piezokeramike: dinamička čvrstoća keramike, parazitni dielektrični gubici, parazitni mehanički gubici, kao i depolarizacija keramike usled indukovanog jakog električnog polja i/ili usled velikog porasta temperature [45].

Kao što je objašnjeno u poglavlju 2.2.1, pri izradi snažnih ultrazvučnih pretvarača najčešće se koriste PZT4 i PZT8 piezokeramički prstenovi, sa malim mehaničkim i dielektričnim gubicima u materijalu. Veliki mehanički faktor dobrote ovih materijala omogućava postizanje velikih izlaznih amplituda. Potrebno je da se snaga električnog generatora koji pobuđuje ultrazvučni pretvarač definiše na osnovu broja upotrebljenih PZT prstenova. U slučaju upotrebe veće snage pobudnog generatora od predviđene, mogu se javiti veće amplitude oscilacija kod neopterećenog pretvarača, što povećava naprezanje zavrtnja. Takođe, u radnim uslovima značajno opada efikasnost pretvarača.

Jačina električnog polja dovoljna da polariše PZT4 i PZT8 keramiku na sobnoj temperaturi je >1000 kV/m [64]. Maksimalni napon kojim se može napajati ultrazvučni pretvarač jednoznačno je određen karakteristikama keramike. U literaturi [65] se za keramike od barijum-titanata maksimalna jačina električnog polja ograničava na 200 kV/m, a za PZT na 400 kV/m, dok se u literaturi [35] javljaju duplo manje granične vrednosti jačine električnog polja za PZT keramiku (200 kV/m). Sa druge strane, primena veoma jakog električnog polja prouzrokuje velike dielektrične gubitke, što smanjuje efikasnost pretvarača (za PZT4 keramiku pri jačini električnog polja od 200 kV/m dielektrični gubici su 5 puta veći).

Porast temperature u keramici pri radu pretvarača definišu mehanički i dielektrični gubici. U praksi je neophodno temperaturu u keramici održavati ispod vrednosti Kirijeve temperature da ne bi došlo do gubitka piezoelektričnih osobina same keramike. Vrednosti Kirijevih

temperatura i maksimalne dozvoljene vrednosti temperatura su 320-330°C i 200°C za PZT4 keramiku, odnosno 300°C i 175°C za PZT8 keramiku, respektivno. U praksi se vrlo često pri porastu temperature javljaju trajna oštećenja pasivnih materijala, pre nego oštećenja same keramike (npr. oštećenja lepkova). Izborom keramike sa manjim gubicima može se smanjiti rizik od pregrevanja. Npr. faktori električnih gubitaka PZT4 i PZT8 keramika su isti, ali faktor mehaničkih gubitaka je i do 2.5 puta manji kod PZT8 keramike u odnosu na PZT4 keramiku, tako da je povoljnija upotreba PZT8 keramike u snažnim pretvaračima.

Kako pretvarači osciluju na rezonantnoj frekvenciji, postoji maksimalni nivo mehaničkog napona koji određuje početak otkaza usled zamora materijala. Mehanički napon se određuje karakteristikama metalnih rezonatora kao što su: geometrijski oblik, karakteristike metala (gustina, Young-ov modul elastičnosti), amplituda i frekvencija oscilovanja. Ograničenja u primeni snažnog ultrazvuka prisutna su zbog gubitaka usled elastičnih deformacija materijala. Veličina ovih gubitaka utiče na izbor materijala u cilju smanjenja zamora materijala. Takođe, otpornost materijala pri dinamičkom opterećenju i mehanički faktor prigušenja oscilacija u materijalu (prigušenje izazvano histerezisom ili silama trenja) važni su parametri pri izboru materijala za metalne nastavke.

Prisustvo kavitacije izaziva dodatna ograničenja u slučaju da je potrošač ili prenosni medijum u tečnom agregatnom stanju. U tečnostima postoji kontinualno propuštanje ultrazvučnih talasa sve dok je njihova amplituda mala [66]. Pojava kavitacije dovodi do velikog broja neželjenih dejstava. Prisustvo velikog broja mehurića u blizini mesta zračenja pretvarača drastično smanjuje izlaznu ultrazvučnu snagu i povećava unutrašnje gubitke usled apsorpcije ili rasejanja ultrazvučnih talasa [67]. Pojava kavitacije može se sprečiti povećanjem frekvencije, kao i smanjenjem intenziteta ultrazvuka.

Za razvoj primena snažnog ultrazvuka neophodni su ultrazvučni pretvarači sa većom amplitudom oscilacija i energetsom efikasnošću, kao i sa što manjim zagrevanjem tokom rada [68]. Veće amplitude oscilacija dovode do jačeg akustičkog pritiska npr. u tečnom prenosnom medijumu, i na taj način se ostvaruje jači efekat kavitacije [69]. Takođe, mali porast temperature u pretvaraču povećava radni vek pretvarača i smanjuje toplotu prenetu u tretirane uzorke [70].

2.3.2 Kompozitni ultrazvučni pretvarači velike snage

Langevin-ovi ultrazvučni pretvarači mogu imati konstrukciju sa dva para, umesto sa jednim parom piezokeramičkih elemenata. Upotrebom četiri aktivna elementa postižu se veće izlazne snage. Međutim, može doći i do znatnog pada radne frekvencije pretvarača zbog povećanja aksijalnih dimenzija samog pretvarača, tako da je potrebno naknadno korigovanje dužina metalnih nastavaka.

Langevin-ove ultrazvučne pretvarače generalno karakteriše vrlo uzak frekvencijski propusni opseg. Nedostatak ovih pretvarača je u tome što mehaničko opterećenje, njegove akustičke karakteristike, kao i mehaničko spajanje opterećenja sa pretvaračem, stvaraju značajna prigušenja i slabljenja oscilacija. Da bi se ostvario optimalan transfer energije od pretvarača do opterećenja, neophodne su primene složenih tehnika projektovanja za rezonantno i impedansno prilagođenje sa opterećenjem. Za povećanje gustine snage u zoni zračenja potrebno je primeniti nove piezokeramičke materijale [71], [72], ili povećati aksijalne i poprečne dimenzije pretvarača.

U osnovi velikog broja snažnih ultrazvučnih pretvarača nalazi se sendvič struktura sa posebnim akustičkim nastavcima (konusnim, eksponencijalnim, stepenastim i dr.), koji se mogu koristiti za pojačavanje oscilacija pretvarača [73], [74], [75], [76]. U literaturi se može naći veliki broj primena u kojima se koriste novi akustički nastavci za povećanje snage u zoni zračenja [60], [77], [78], [79], [80]. Projektovanje akustičkih nastavaka zasniva se na analizi longitudinalnih oscilacija višeelementnih nastavaka u obliku šipki, koji imaju cilindrične elemente i/ili elemente promenljivih preseka [81]. U literaturi [69], zbirno su predstavljeni principi rada pojedinih metalnih rezonatora. Radi postizanja većeg stepena efikasnosti pri radu predloženo je korišćenje metalnog nastavka u obliku zvona sa velikim pojačanjem. Takođe, u analizi odnosa između amplitude oscilacija i geometrijskih dimenzija ultrazvučnog pretvarača u literaturi [82], [83], [84], [85], su predložene optimizovane metode za povećanje izlaznog akustičkog zračenja. Povećanje gustine snage u zoni zračenja može se postići i projektovanjem novih pretvarača [86], [87], [88], [89].

Rezonantnu frekvenciju sendvič pretvarača određuju parametri materijala, geometrijske dimenzije i spoljašnja sredina. Nakon završetka procesa projektovanja i teorijske optimizacije, realizuje se pretvarač čija je rezonantna frekvencija već određena, pri čemu bi njeno naknadno podešavanje bilo teško izvodljivo. Nemogućnost brze promene rezonantne frekvencije

sendvič pretvarača može imati negativne posledice u pojedinim primenama pretvarača. Na primer, u tradicionalnom ultrazvučnom čišćenju pretvarač se koristi na jednoj rezonantnoj frekvenciji, tako da se u ultrazvučnoj kadi javljaju stojeći talasi. U tačkama maksimuma amplituda ultrazvučnog pritiska efekat čišćenja je maksimalan, dok je u čvorovima ultrazvučnog pritiska efekat čišćenja minimalan. Kako bi se poboljšao efekat čišćenja, delove koji se čiste treba dodatno mehanički pomerati. Međutim, ako se u ultrazvučnoj kadi mogu proizvesti ultrazvučni talasi različitih frekvencija, stojeći talasi se neće pojaviti, tako da je ultrazvučni pritisak u tečnosti uniformno raspoređen. Sa druge strane, trebalo bi obratiti pažnju na postojanje optimalne frekvencije za pojedine ultrazvučne primene. Na primer, u ultrazvučnim sonohemijskim reakcijama brzina reakcije je zavisna od frekvencije [90]. U cilju proučavanja ove frekvencijske zavisnosti potrebno je razviti višefrekvencijski i frekvencijsko podesivi pretvarač. Danas, u cilju generisanja ultrazvuka sa različitim frekvencijama koristi se više sendvič pretvarača sa različitim rezonantnim frekvencijama.

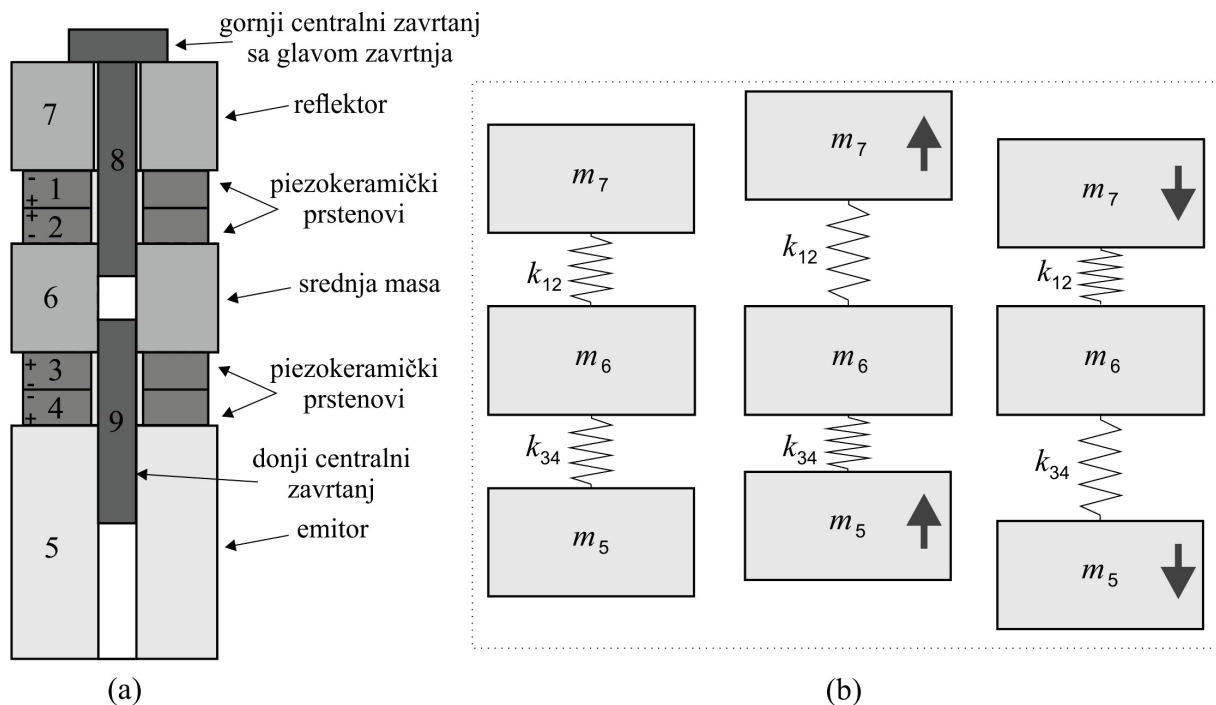
Jedna od metoda za promenu rezonantne frekvencije sendvič pretvarača koristi električna kola za prilagođenje između električnog generatora i pretvarača. U ovom postupku se redna induktivnost kola za prilagođenje može koristiti i kao komponenta za podešavanje rezonantne frekvencije. Odgovarajućim povećanjem redne induktivnosti rezonantna frekvencija pretvarača se smanjuje [91]. Navedenom metodom se dolazi do skromnog povećanja propusnog opsega pretvarača koji rade na frekvencijama od nekoliko desetina kHz [92]. Kontrolisanje sile prednaprezanja može takođe promeniti rezonantnu frekvenciju sendvič pretvarača [93].

U industriji postoji veliko interesovanje za projektovanje širokopoljnih i frekvencijsko podesivih piezoelektričnih pretvarača primenom dve grupe piezoelektričnih keramičkih elemenata. Jedna grupa piezoelemenata se koristi kao aktivni element koji je povezan sa električnim generatorom, a druga grupa piezoelemenata se koristi kao kontrolni element povezan sa kalemom ili kondenzatorom [94], [95]. Kada se promeni induktivnost ili kapacitivnost, rezonantna frekvencija cele strukture postaje promenljiva ili podesiva u širokom opsegu frekvencija. Opseg promena rezonantne frekvencije pretvarača zavisi od delova pretvarača koji se nalaze između aktivnih grupa piezoelemenata (pasivna grupa piezoelemenata, elektrode, izolatori) [96]. Zbog toga je važno da se aktivne grupe piezoelemenata u pretvaraču nalaze između pasivnih grupa piezoelemenata, što je moguće ostvariti u sendvič strukturi sa više parova piezokeramika.

U ovoj disertaciji prikazani su projektovanje, razvoj i realizacija dve nove strukture

kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage, sa prednostima koje će biti navedene u nastavku.

Prva struktura kompozitnog pretvarača (tip A), prikazana na slici 2.1(a), nastala je na osnovu hibridnog magnetostrikciono-piezoelektričnog sendvič pretvarača sa konusnim nastavcima [97], i bidirekcionog simetričnog sendvič pretvarača sa identičnim metalnim konusnim nastavcima [98]. Kompozitni pretvarač sadrži srednju masu (6) postavljenu između dva aktivna sloja pretvarača (1, 2 i 3, 4), i dva krajnja metalna nastavka (5 i 7) povezana sa srednjom masom pomoću dva centralna zavrtnja (8 i 9). Zbog uzajamno suprotne polarizacije aktivnih piezoelemenata povezanih na isto napajanje, srednja masa u ovakvoj konstrukciji osciluje na način prikazan na slici 2.1(b).

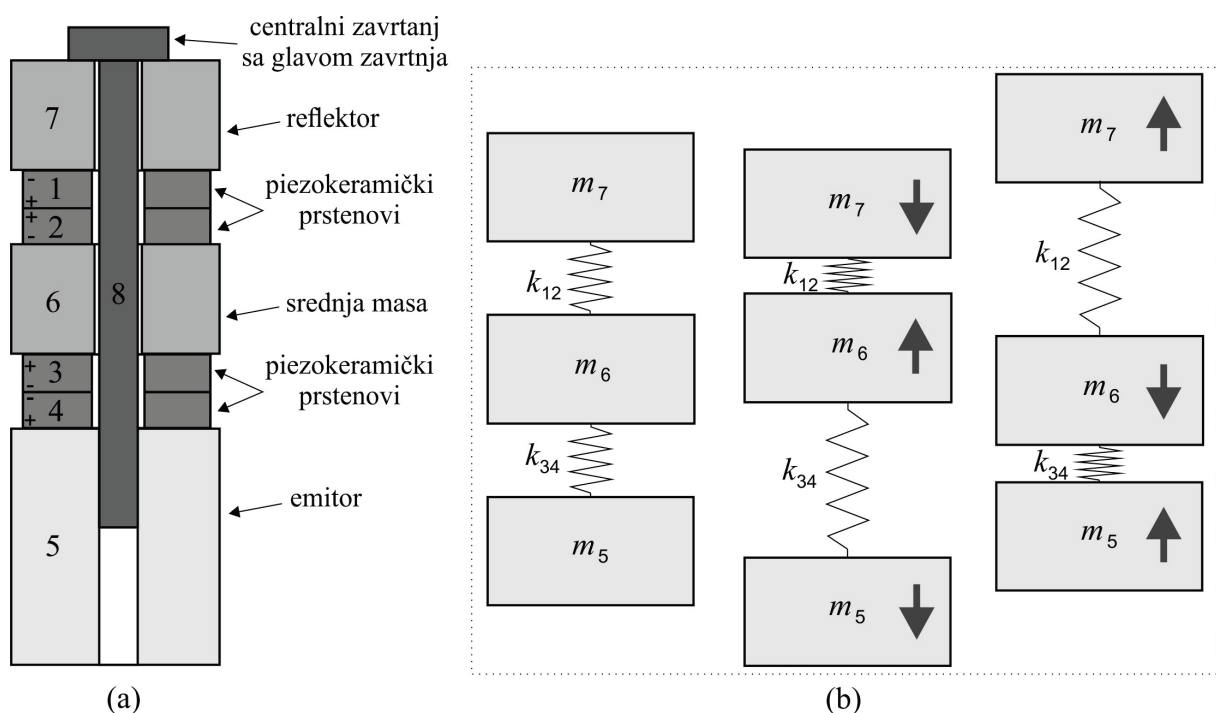


Slika 2.1. (a) Struktura kompozitnog pretvarača (tip A), (b) blokovski prikaz najjednostavnije oscilatorne strukture pretvarača tipa A

U najjednostavnijem obliku, predloženi kompozitni pretvarač predstavlja jednostavnu mehaničku kombinaciju dva Langevin-ova pretvarača. S obzirom da metalni nastavci u predloženoj strukturi nisu od istog materijala, kompozitni pretvarač nije bidirekcion. Predloženi pretvarač karakteriše odgovarajuća mehanička struktura sa srednjom masom od metala postavljenom između dva aktivna suprotno polarisana piezokeramička bloka, i dva krajnja metalna nastavka (reflektor - aktivni piezokeramički blok - srednja masa - aktivni piezokeramički blok - emitor). Predloženi kompozitni pretvarač ima veću fleksibilnost pri

radu u odnosu na konvencionalne pretvarače, koja se ogleda u mogućnosti nezavisne pobude gornjeg i donjeg aktivnog sloja različitim signalima.

Druga predložena struktura kompozitnog pretvarača (tip B) dobijena je nadogradnjom prve strukture posle niza sveobuhvatnih analiza rada i ponašanja prvog kompozitnog pretvarača sa i bez opterećenja. Pretvarač tipa B predstavlja specijalni, snažni, unidirekciono kompozitni ultrazvučni pretvarač (slika 2.2(a)). Prednaprezanje strukture između reflektora (7) i emitora (5) ostvareno je jednim centralnim zavrtnjem (8) koji nije u kontaktu sa srednjom masom (6). Gornji (1, 2) i donji (3, 4) aktivni slojevi su međusobno električno suprotno polarisani, i prilikom montaže se mehanički vezuju redno, sa suprotnim polaritetima. Zbog uzajamno suprotne polarizacije aktivnih slojeva, gornji aktivni sloj vrši aksijalnu kompresiju. Sinhronizovano sa kompresijom gornjeg aktivnog sloja, donji aktivni sloj vrši aksijalnu ekspanziju, i obrnuto, tako da srednja masa osciluje na način prikazan na slici 2.2(b). Pretvarač sa metalnim rezonatorom postavljenim između aktivnih slojeva se često u literaturi naziva i *Hammer* pretvaračem [99].



Slika 2.2. (a) Struktura kompozitnog pretvarača (tip B), (b) blokovski prikaz najjednostavnije oscilatorne strukture pretvarača tipa B

Brzina pomeranja ravni čvora oscilacija kod kompozitnog pretvarača tipa A jednaka je nuli usled međusobno suprotnih širenja i skupljanja krajnjih nastavaka. Ravan koja deli srednju masu na polovinu predstavlja čvornu ravan oscilovanja. Međutim, kod kompozitnog pretvarača tipa B srednja masa uvek osciluje. Zbog navedenih oscilacija srednje mase tačan

položaj čvorne ravni oscilovanja se ne može eksplicitno odrediti u vremenu, tako da predloženi pretvarač tipa B predstavlja nesimetričnu kompozitnu strukturu.

Upotrebom predloženog kompozitnog pretvarača kod koga srednja masa nije u direktnom kontaktu sa zavrtnjem (tip B) može se izbeći veći deo problema vezanih za impedansno i frekvencijsko prilagođenje, kao i za mehaničko spajanje opterećenja.

Ovakvim strukturama se povećava i ukupna izlazna ultrazvučna snaga pretvarača. Ako se opterećenje veže preko akustičkog talasovoda, kompozitni pretvarači mogu u opterećenju proizvesti debljinske, radijalne, fleksione, ivične, torzione i druge vibracione modove [100]. Generisanje navedenih modova je važno kod primena za tretiranje tečnosti, kod kojih se mora održati brz protok.

3 MODELOVANJE SASTAVNIH DELOVA ULTRAZVUČNIH PRETVARAČA

Modeli koji uključuju računarske simulacije postali su osnovni deo procesa projektovanja pretvarača. Za modelovanje i analizu rada ultrazvučnih pretvarača najčešće se koriste elektromehanička ekvivalentna kola, čija se primena zasniva na ideji da je brzina prostiranja talasa ekvivalentna električnoj struji, dok je mehanička sila ekvivalentna električnom naponu. Danas se veliki broj pretvarača projektuje sa jednim dominantnim rezonantnim modom, što može dodatno pojednostaviti modele i opravdati njihovu upotrebu.

U slučaju da su aksijalne dimenzije ultrazvučnih pretvarača koji osciluju u debljinskom modu veće od radijalnih dimenzija, može se primeniti jednodimenzionalna analiza u procesu modelovanja pretvarača. Iako je ovakav odnos dimenzija uobičajen kod većine snažnih ultrazvučnih pretvarača, u procesu modelovanja pretvarača sa kompleksnom strukturom (npr. kompozitni pretvarači) važno je predvideti ponašanje pretvarača u svim pravcima prostiranja oscilacija. U tom slučaju potrebno je koristiti trodimenzionalne modele. Dodatno, pri modelovanju piezoelektričnih pretvarača, polazi se od pretpostavke da će se ultrazvuk generisati ili detektovati na unapred određenoj površini pretvarača, koja je u direktnom kontaktu sa potrošačem ili prenosnim medijumom. Površina pretvarača od interesa može biti elektroda na samom piezoelektričnom materijalu, ali se najčešće posmatrana površina nalazi na metalnom nastavku ili na nastavku za prilagođenje.

Navedeni pretvarači se mogu modelovati matematičkom analizom na osnovu izraza (2.1) - (2.4) definisanih u poglavlju 2.1, i uz pomoć odgovarajućih fizičkih zakona. U ovoj disertaciji su prikazani modeli koji se zasnivaju na primeni konstitutivnih jednačina

piezoelektričnog efekta. Ovim modelma se mogu analizirati višeslojne strukture koje uključuju kako piezoelektrične materijale, tako i metalne nastavke.

3.1 Jednodimenzionalno modelovanje piezokeramika

Jednodimenzionalni modeli piezokeramika omogućavaju brzo predviđanje performansi, kao i dobar uvid u ponašanje kako piezoelemenata, tako i celog pretvarača tokom rada. Upotrebom ekvivalentnih elektromehaničkih kola pri modelovanju piezokeramika ne dobija se veći broj informacija u odnosu na broj informacija dobijenih primenom konstitutivnih piezoelektričnih jednačina. Međutim, na ovaj način se omogućava bolja vizuelizacija prostiranja talasa u strukturi celog pretvarača [67].

U ovom poglavlju prikazani su jednodimenzionalni modeli piezokeramika koji uključuju samo debljinske modove oscilovanja, dok su radijalne oscilacije zanemarene. Dodatno, ovi modeli uzimaju u obzir piezoelektrična i anizotropna svojstva pobudnih piezokeramika [101].

Jednodimenzionalni model piezokeramika koji se i danas koristi kao osnova većeg broja složenijih modela je Mason-ov model. Ovaj model predstavlja pasivno električno kolo u blizini osnovne rezonantne frekvencije piezokeramike [37]. KLM model predstavljen je složenijim električnim kolom u odnosu na Mason-ov model, i obezbeđuje jasniji opis ponašanja piezokeramike [38], [102]. Razvoj navedenih modela je detaljnije objašnjen u nastavku ove disertacije. Jednostavnost i brzina izračunavanja performansi celih pretvarača korišćenjem navedenih modela predstavljeni su upotrebom ekvivalentnih električnih kola sa transmisionim linijama (vodovima) [103], ili matričnim prenosnim funkcijama [104], [105].

3.1.1 Matematička analiza talasne jednačine prostiranja longitudinalnih talasa

Konstitutivne jednačine za piezoelektrični materijal se pri zanemarivanju poprečnih dimenzija u izrazu (2.4), mogu napisati u sledećem obliku:

$$E = -hS + \frac{D}{\epsilon^S}, \quad (3.1)$$

$$T = c^D S - hD, \quad (3.2)$$

gde se mehanički napon T može odrediti deljenjem ukupne ekstenziona ili kompresiona sile F sa poprečnom površinom P , $T=F/P$.

Primenom II Njutnovog zakona koji definiše silu kao proizvod mase i ubrzanja, i koristeći masu kao proizvod zapremine i gustine, mehanički napon se izražava kao:

$$T = \rho l \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3.3)$$

gde je ρ gustina, l debljina piezoelektričnog materijala i u komponenta mehaničkog pomeraja tačaka koje osciluju. Diferenciranjem zadnje jednačine po z -osi dobija se [106]:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (3.4)$$

Izražavajući Hook-ov zakon u sledećem obliku:

$$T = c^D \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (3.5)$$

gde je koeficijent proporcionalnosti predstavljen koeficijentom tenzora konstanti elastičnosti c^D , dobija se:

$$c^D \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (3.6)$$

Uvođenjem brzine prostiranja longitudinalnih talasa u tankom cilindru $v^2=c/\rho$, izraz (3.6) se može pisati kao:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (3.7)$$

U jednodimenzionalnim modelima su od interesa samo mehaničke deformacije po z -osi:

$$S = \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (3.8)$$

Diferenciranjem izraza (3.2) po z -osi dobija se:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = c^D \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - h \frac{\partial D}{\partial z}. \quad (3.9)$$

Divergencija dielektričnog pomeraja po z-osi definiše se kao:

$$\nabla D = \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (3.10)$$

Rešavanjem jednačine (3.7) u opštem slučaju se dobija jednačina nestacionarnog talasnog kretanja u vidu linearne diferencijalne jednačine drugog reda sa dve nezavisne promenljive (po z-osi i po vremenu). Ukoliko se posmatra višeslojna struktura (paketni piezokeramički ultrazvučni pretvarač prikazan na slici 3.1(a)), rešenje ove hiperboličke parcijalne diferencijalne jednačine (determinanta je $4v^2 > 0$) se može napisati u opštem obliku za sloj n u višeslojnoj strukturi:

$$u_n = \alpha_n e^{-j\omega\Delta t_n} + \beta_n e^{j\omega\Delta t_n}. \quad (3.11)$$

Amplitude mehaničkog pomeraja tačaka u smeru prostiranja talasa označene su sa α_n , a u suprotnom smeru od smera prostiranja talasa sa β_n , na površini n -tog sloja. Vreme prolaska ultrazvučnog talasa kroz n -ti piezoelektrični sloj jednako je količniku debljine sloja i brzine prostiranja talasa, $\Delta t_n = l_n/v_n$.

Za dobijanje analitičkog izraza za električni napon V_n na n -tom piezoelektričnom sloju jednačina (3.1) se može pisati u sledećem obliku:

$$E_n = -h_n \frac{\partial u_n}{\partial z} + \frac{Q_n}{P\epsilon_n^S}, \quad (3.12)$$

za $D = Q_n/P$ i statičku kapacitivnost n -tog sloja $C_{0n} = \epsilon_n^S P/l_n$.

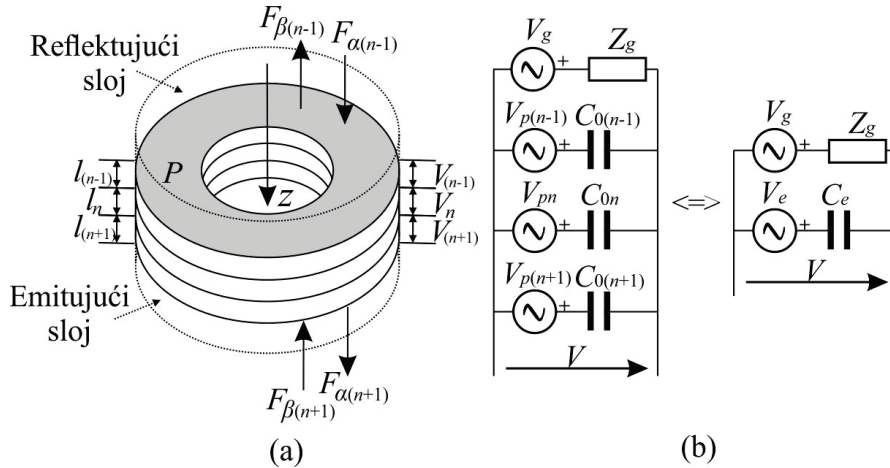
$$V_n = -h_n \int_0^{l_n} \frac{\partial u_n}{\partial z} dz + \frac{Q_n}{P\epsilon_n^S} \int_0^{l_n} dz = -h_n [\alpha_n (e^{-j\omega\Delta t_n} - 1) + \beta_n (e^{j\omega\Delta t_n} - 1)] + \frac{Q_n}{C_{0n}}. \quad (3.13)$$

Mehanički pomeraj tačaka u_n u jednačini (3.13), korisnije je predstaviti preko sila koje deluju na površine normalne na z-osu $F_{\alpha n}$ i $F_{\beta n}$ [103]:

$$V_n = -\frac{h_n}{j\omega Z_{cn}} (F_{\alpha n} + F_{\beta n}) (1 - e^{-j\omega\Delta t_n}) + \frac{Q_n}{C_{0n}}, \quad (3.14)$$

gde se specifična akustička impedansa Z_{cn} i amplitude mehaničkog pomeraja predstavljaju kao:

$$Z_{cn} = \frac{c_n^D P}{v_n}, \quad \alpha_n = -\frac{F_{\alpha_n}}{j\omega Z_{cn}} \quad \text{i} \quad \beta_n = \frac{F_{\beta_n}}{j\omega Z_{cn}} e^{-j\omega\Delta t_n}. \quad (3.15)$$



Slika 3.1. (a) Izgled višeslojne strukture paketnog piezokeramičkog ultrazvučnog pretvarača, (b) ekvivalentno kolo paralelno pobuđene višeslojne strukture prikazane pod (a)

Opšta analiza višeslojne strukture paketnog pretvarača uključuje više piezoelektričnih slojeva koji se ponašaju kao izvori ili kao senzori oscilacija, međusobno električno povezanih redno, paralelno ili njihovom kombinacijom. U disertaciji su analizirane složenije redno-paralelne kombinacije električnog povezivanja piezoelektričnih slojeva. Međutim, u ovom poglavlju analiza je ograničena na najčešće korišćeno električno povezivanje piezoelektričnih slojeva u praksi, na analizu jednoslojnih ili višeslojnih struktura koje su mehanički redno vezane i električno paralelno pobuđene (slika 3.1). Sa slike 3.1(b) se vidi da napon paralelne veze svih aktivnih slojeva V čine doprinosi napona na osnovu piezoelektričnog efekta V_{pn} i količine nagomilanog naelektrisanja na kapacitivnostima C_{0n} . Ekvivalentna kapacitivnost paralelne veze N piezoelektričnih slojeva C_e , kao i ukupna količina naelektrisanja Q_e , koja zavisi od napona električnog generatora V_g , i njegove impedanse $j\omega Z_g$, mogu se predstaviti izrazima [103]:

$$C_e = \sum_{n=1}^N C_{0n}, \quad Q_e = \frac{V_g - V}{j\omega Z_g}. \quad (3.16)$$

Kada se ekvivalentno kolo sa slike 3.1(b) posmatra kao kapacitivni razdelnik napona, ekvivalentni napon generisan piezoelektričnim efektom se može izračunati na sledeći način:

$$V_e = \frac{V_g}{1 + j\omega Z_g C_e} - \frac{j\omega Z_g C_e}{1 + j\omega Z_g C_e} \sum_{n=1}^N \frac{C_{0n}}{C_e} \frac{h_n}{j\omega Z_{cn}} (F_{\alpha_n} + F_{\beta_n}) (1 - e^{-j\omega \Delta t_n}) \quad (3.17)$$

Ako struktura ima samo jedan aktivni sloj, tada se napon na njemu izračunava izrazom:

$$V = \frac{1}{1 + j\omega Z_g C_0} \left[V_g - j\omega Z_g C_0 \frac{h_n}{j\omega Z_c} (F_{\alpha} + F_{\beta}) (1 - e^{-j\omega \Delta t}) \right] \quad (3.18)$$

Za dobijanje analitičkih izraza za sile koje deluju na površinama piezokeramika, potrebno je vektor relativne mehaničke deformacije S u jednačini (3.2) predstaviti kao izvod mehaničkih pomeraja u po z -osi (3.8), i iskoristiti izraze za dobijanje amplituda mehaničkog pomeraja (3.15):

$$F_n = c_n^D P \frac{j\omega}{v_n} \left(\frac{F_{\alpha_n}}{j\omega Z_{cn}} e^{-j\omega \Delta t_n} + \frac{F_{\beta_n}}{j\omega Z_{cn}} \right) - h_n Q_n \quad (3.19)$$

Jednačina (3.19) predstavlja izraz za silu na sastavu između dva sloja u paketnom piezokeramičkom ultrazvučnom pretvaraču, u opštem obliku. Granični uslovi se mogu izraziti na osnovu neprekidnosti sile i mehaničkog pomeraja tačaka na dodirnim površinama [103]:

$$F_n|_{z=l_n} = F_{n+1}|_{z=0} \quad \text{i} \quad u_n|_{z=l_n} = u_{n+1}|_{z=0} \quad (3.20)$$

Pri prelasku ultrazvučnog talasa iz jednog u drugi sloj menja se brzina prostiranja. Za eksplicitnu analizu sila koje deluju na graničnim površinama između dva sloja, potrebno je definisati koeficijente transmisije i refleksije pri prolasku ultrazvučnog talasa iz jednog u drugi sloj:

$$T_{n+1}^n = \frac{2Z_{cn}}{Z_{c(n+1)} + Z_{cn}} \quad \text{i} \quad R_{n+1}^n = \frac{Z_{cn} - Z_{c(n+1)}}{Z_{c(n+1)} + Z_{cn}} \quad (3.21)$$

Komponente mehaničkih sila koje deluju na graničnim površinama, uz definisane granične uslove i uvažavanje transmisije i refleksije ultrazvučnog talasa, mogu se predstaviti sledećim izrazima:

$$\begin{aligned} F_{\alpha_n} = & \frac{1}{1 - T_{n-1}^n K_n} \left[F_{\alpha_{(n-1)}} T_{n-1}^n (e^{-j\omega \Delta t_{(n-1)}} - K_{n-1}) - F_{\beta_{(n-1)}} T_{n-1}^n K_{n-1} + \right. \\ & + F_{\beta_n} (R_n^{n-1} e^{-j\omega \Delta t_n} + T_{n-1}^n K_n) + \\ & \left. + \frac{T_{n-1}^n V}{2} (h_n C_{0n} - h_{n-1} C_{0(n-1)}) \right], \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
F_{\beta_n} = & \frac{1}{1-T_{n+1}^n K_n} \left[F_{\beta_{(n+1)}} T_{n+1}^n \left(e^{-j\omega\Delta t_{(n+1)}} - K_{n+1} \right) - F_{\alpha_{(n+1)}} T_{n+1}^n K_{n+1} + \right. \\
& + F_{\alpha_n} \left(R_n^{n+1} e^{-j\omega\Delta t_n} + T_{n+1}^n K_n \right) + \\
& \left. + \frac{T_{n+1}^n V}{2} \left(h_n C_{0n} - h_{n+1} C_{0(n+1)} \right) \right], \tag{3.23}
\end{aligned}$$

gde je $K_n = h_n^2 C_{0n} \frac{1 - e^{-j\omega\Delta t_n}}{2j\omega Z_{cn}}$.

Indeksi u jednačinama (3.22) i (3.23) označavaju da se za prvi sloj ($n=1$), i poslednji sloj ($n=N$), veličine sa indeksima $n-1=0$ i $n+1=N+1$ odnose na sloj reflektora i sloj emitora, respektivno.

Komponente mehaničkih sila na površinama neopterećenog paketnog pretvarača, kojeg čini samo jedan piezokeramički sloj (uticaj spoljašnjih sila na pretvarač je jednak nuli, $F_{\alpha 0}=F_{\beta 2}=0$) izračunavaju se kao:

$$F_{\alpha_1} = \frac{1}{1-T_0^1 K} \left[F_{\alpha_0} T_0^1 + F_{\beta_1} \left(R_1^0 e^{-j\omega\Delta t_1} + T_0^1 K \right) + \frac{T_0^1 V}{2} h C_0 \right], \tag{3.24}$$

$$F_{\beta_1} = \frac{1}{1-T_2^1 K} \left[F_{\beta_2} T_2^1 + F_{\alpha_1} \left(R_1^2 e^{-j\omega\Delta t_1} + T_2^1 K \right) + \frac{T_2^1 V}{2} h C_0 \right], \tag{3.25}$$

gde je $K = h^2 C_0 \frac{1 - e^{-j\omega\Delta t_1}}{2j\omega Z_c}$.

Pri izračunavanju sila koje deluju na pasivne slojeve pretvarača (materijale koji nemaju piezoelektrična svojstva) potrebno je usvojiti da je $h=0$.

Izrazima (3.17), (3.22) i (3.23) moguće je formirati sistem jednačina koji opisuje elektromehaničku strukturu prikazanu na slici 3.1. Rešavanjem ovog sistema jednačina dobijaju se numerički rezultati koji predstavljaju mehaničke sile u svakom od slojeva paketnog pretvarača. Uz poznavanje karakteristika električnog generatora, moguće je izračunati i ulaznu električnu impedansu samog pretvarača.

3.1.2 Mason-ov model piezokeramika

Mason-ov model piezokeramika predstavlja osnovu za veliki broj jednodimenzionalnih modela opisanih u literaturi za modelovanje, projektovanje i optimizaciju ultrazvučnih pretvarača [37]. Osnova Mason-ovog originalnog pristupa modelovanju je upotreba teorije električnih mreža u elektromehaničkim sistemima za rešavanje talasnih jednačina. Ovakav pristup modelovanju ultrazvučnih pretvarača je važan zbog kompleksnosti rada samog pretvarača, za čiju analizu su potrebna posebna znanja iz oblasti elektronike, nauke o materijalima i mehanike.

Mason-ov model piezokeramika predstavlja analogno električno kolo ekvivalentno piezokeramici sa dimenzijama pogodnim za jednodimenzionalnu analizu. Takođe, Mason-ov model uzima u obzir primenjeno električno polje i elastične oscilacije.

Polazeći od konstitutivnih jednačina za piezoelektričnu keramiku (3.1) i (3.2), i talasne jednačine za prostiranje longitudinalnih talasa po debljini (3.7), izvedene su jednačine koje povezuju električni napon i struju kroz piezokeramički prsten, sa mehaničkim brzinama i silama koje deluju na njegovim površinama. Posmatrani piezokeramički prsten pobuđuje se preko metalizovanih kružno-prstenastih površina i osciluje po debljini.

Mehanički pomeraji tačaka koje osciluju u slučaju pobude prostim harmonijskim oscilacijama mogu se predstaviti sledećim izrazom:

$$u = (\alpha \sin kz + \beta \cos kz)e^{j\omega t}, \quad (3.26)$$

gde je $k=\omega/v_z$ talasni broj, $v_z=\sqrt{c_{33}^D/\rho}$ brzina ultrazvučnih talasa u debljinskom pravcu, $\omega=2\pi f$ kružna frekvencija, c_{33}^D koeficijent tenzora konstanti elastičnosti, ρ gustina piezokeramike, i α i β amplitude mehaničkog pomeraja tačaka u debljinskom pravcu. Mehanički pomeraji tačaka u debljinskom pravcu se mogu izraziti i preko brzina koje se javljaju na kružno-prstenastim površinama piezokeramike v_1 i v_2 , u slučaju harmonijskog oscilovanja:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{z=0} = v_1 e^{j\omega t}, \quad (3.27)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{z=l} = -v_2 e^{j\omega t}. \quad (3.28)$$

Relativne mehaničke deformacije u slučaju pobude harmonijskim oscilacijama izražavaju se promenom vektora mehaničkih pomeraja tačaka duž z -ose. U tom slučaju jednačine koje opisuju električno polje (3.1) i mehanički napon (3.2) za prostoperiodične oscilacije imaju sledeći oblik:

$$E = \frac{-h_{33}}{j\omega} \left[k \left(\frac{-v_2}{\sin kl} - \frac{v_1}{\tan kl} \right) \cos kz - \frac{h_{33}v_1}{j\omega} k \sin kz \right] e^{j\omega t} - \frac{I}{j\omega P \epsilon_{33}^S}, \quad (3.29)$$

$$T = \frac{c_{33}^D}{j\omega} \left[k \left(\frac{-v_2}{\sin kl} - \frac{v_1}{\tan kl} \right) \cos kz - v_1 k \sin kz \right] e^{j\omega t} - \frac{h_{33}I}{j\omega P \epsilon_{33}^S}. \quad (3.30)$$

U prethodnim jednačinama h_{33} i ϵ_{33}^S predstavljaju piezoelektričnu konstantu i relativnu dielektričnu konstantu keramike, respektivno.

Posmatranjem vremenski nezavisnog dela jednačine (3.30) i usvajanjem orijentacije mehaničkih sila prikazane na slici 3.2(a), mogu se predstaviti sledeći granični uslovi:

$$F_1 = -PT \Big|_{z=0}, \quad (3.31)$$

$$F_2 = -PT \Big|_{z=l}. \quad (3.32)$$

Jednačine koje opisuju primenjene ili generisane mehaničke sile na kružno-prstenastim površinama piezokeramike i napon na elektrodama piezokeramičkog prstena su:

$$F_1 = \frac{Z_c}{j} \left(\frac{v_1}{\tan kl} + \frac{v_2}{\sin kl} \right) + \frac{h_{33}I}{j\omega}, \quad (3.33)$$

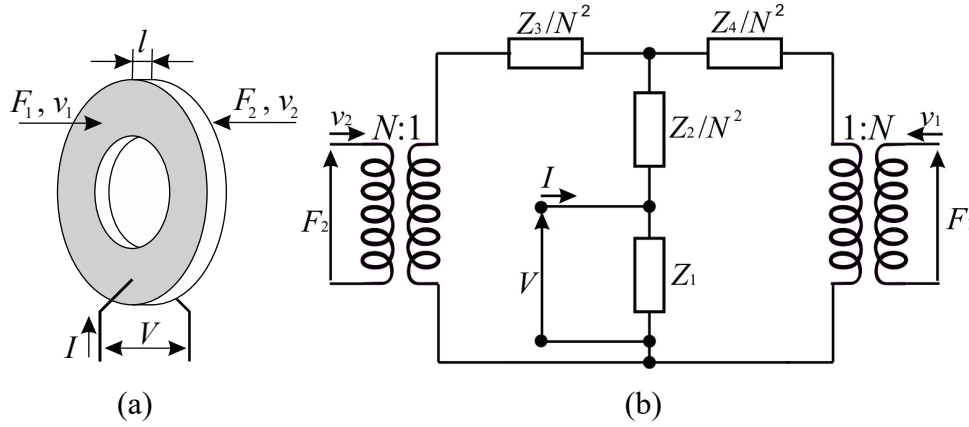
$$F_2 = \frac{Z_c}{j} \left(\frac{v_1}{\sin kl} + \frac{v_2}{\tan kl} \right) + \frac{h_{33}I}{j\omega}, \quad (3.34)$$

$$V = \frac{h_{33}}{j\omega} v_1 + \frac{h_{33}}{j\omega} v_2 + \frac{I}{j\omega C_0}, \quad (3.35)$$

pri čemu se karakteristična impedansa računa kao $Z_c = \rho v_z P$.

Jednačine (3.33) - (3.35) su dovoljne za opisivanje opšteg ponašanja piezokeramičkog prstena. Međutim, u cilju pojednostavljivanja izračunavanja veza u elektromehaničkom sistemu pogodno je uvesti ekvivalentno električno kolo. Kao što je napomenuto, Mason je

predstavio takvo ekvivalentno kolo koje je pogodno za simulaciju rada piezoelektrične keramike u obliku šipke, koja osciluje po dužini normalno na smer primenjenog električnog polja. Kasnije, predložene su određene modifikacije za modelovanje piezoelektrične keramike drugih geometrijskih oblika, uključujući i keramičke diskove [45], [107].



Slika 3.2. (a) Piezokeramički prsten sa usvojenim konvencijama za smerove sila, brzina, napona i struje, (b) opšti oblik Mason-ovog ekvivalentnog kola za prikazani piezokeramički prsten u debljinskom modu oscilovanja

Na slici 3.2(b) prikazano je Mason-ovo ekvivalentno kolo u opštem obliku, sa impedansama koje su podeljene sa N^2 (gde je $N=h_{33}C_0$), zbog kasnijeg pojednostavljivanja kola. Generisani električni naponi i struje u dve grane kola se transformišu u odgovarajuće mehaničke sile i brzine preko idealnih elektromehaničkih transformatora sa prenosnim odnosima $N:1$. Računanjem napona V_1 , V_2 i V u funkciji struja I_1 , I_2 i I i zamenom u izraze za mehaničke sile i brzine dobija se:

$$F_1 = (N^2 Z_1 + Z_2 + Z_4)v_1 + (N^2 Z_1 + Z_2)v_2 + NZ_1 I, \quad (3.36)$$

$$F_2 = (N^2 Z_1 + Z_2)v_1 + (N^2 Z_1 + Z_2 + Z_3)v_2 + NZ_1 I, \quad (3.37)$$

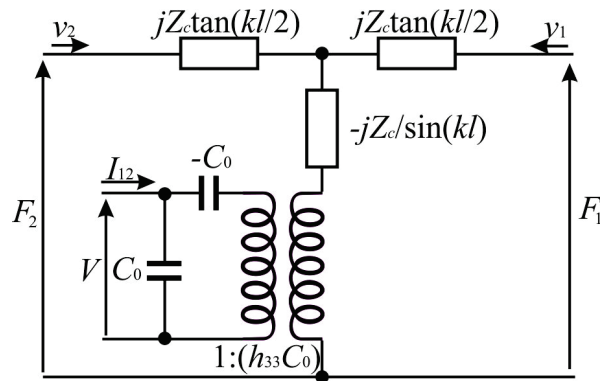
$$V = NZ_1(v_1 + v_2) + Z_1 I. \quad (3.38)$$

Poređenjem jednačina koje opisuju rad kola sa slike 3.2(b) i jednačina koje opisuju ponašanje piezokeramičkog materijala (3.33) - (3.35), može se uočiti njihova identičnost uz sledeće smene:

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_0}, \quad Z_2 = \frac{Z_c}{j \sin kl} - N^2 \frac{1}{j\omega C_0}, \quad (3.39)$$

$$Z_3 = jZ_c \tan \frac{kl}{2}, \quad Z_4 = jZ_c \tan \frac{kl}{2}.$$

Na ovaj način se ekvivalentno kolo sa slike 3.2(b), uz vrednosti parametara datih u jednačinama (3.39), može dalje pojednostaviti primenom jednog umesto dva idealna elektromehanička transformatora, kao i podelom impedanse Z_2 na kapacitivni i induktivni deo, kao što je predstavljeno na slici 3.3.



Slika 3.3. Mason-ovo ekvivalentno kolo za piezokeramički prsten u debljinskom modu oscilovanja

Postupak dobijanja ekvivalentnog kola sa slike 3.3 ne sadrži dodatne pretpostavke ili aproksimacije, osim onih koje su korišćene pri rešavanju konstitutivnih piezoelektričnih jednačina (električno i akustičko uniformno polje). Model se najčešće koristi za neopterećenu keramiku ili keramiku opterećenu jednom krajnjom masom (impedansom) [45], za analizu prelaznog odziva [46], određivanje konstanti materijala [108] i veliki broj drugih aplikacija.

3.1.3 KLM model piezokeramika

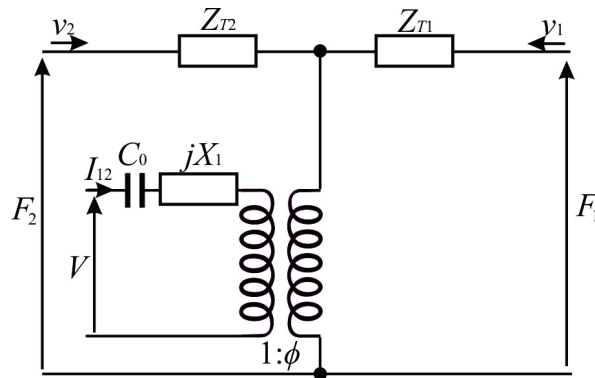
Mason-ov model i njegova Redwood-ova verzija [46], u kojoj su elementi T-mreže zamenjeni prenosnim vodom karakteristične impedanse Z_c , pokazuju sledeće nedostatke: prisustvo negativne kapacitivnosti, nedostatak jasne razlike između električnih i mehaničkih delova sistema, kao i moguću kompleksnost modela koji uključuje ceo višeslojni pretvarač, kakav je kompozitni pretvarač. U cilju rešavanja ovih nedostataka Krimholtz, Leedom i Matthaei su razvili alternativno ekvivalentno kolo (KLM model) [38].

Na slici 3.4 prikazano je KLM ekvivalentno kolo za piezokeramiku koja osciluje u debljinskom modu. Kolo se takođe sastoji od električnog izvora i komponenata koje su frekvencijsko zavisne, kao i idealnog elektromehaničkog transformatora koji je dalje priključen na polovinu akustičkog prenosnog voda brzine v_z , dužine l i karakteristične impedanse Z_c . Ako se prenosni vod optereti akustičkim impedansama $Z_1=F_1/v_1$ i $Z_2=F_2/v_2$

važe sledeće jednakosti:

$$Z_{T1} = Z_c \left[\frac{Z_1 \cos(kl/2) + jZ_c \sin(kl/2)}{Z_c \cos(kl/2) + jZ_1 \sin(kl/2)} \right], \quad (3.40)$$

$$Z_{T2} = Z_c \left[\frac{Z_2 \cos(kl/2) + jZ_c \sin(kl/2)}{Z_c \cos(kl/2) + jZ_2 \sin(kl/2)} \right]. \quad (3.41)$$



Slika 3.4. KLM ekvivalentno kolo za piezokeramiku u debljinskom modu oscilovanja

Reaktansa i prenosni odnos transformatora u kolu na slici 3.4 imaju sledeće vrednosti:

$$X_1 = Z_c \left(\frac{h_{33}}{\omega Z_c} \right)^2 \sin \left(\frac{l\omega}{v_z} \right), \quad \phi = \frac{\omega Z_c}{2h_{33}} \frac{1}{\sin \left(\frac{l\omega}{2v_z} \right)}. \quad (3.42)$$

Slično kao i kod Mason-ovog modela, KLM model je izveden iz talasne jednačine i jednačina koje opisuju piezoelektrični efekat. Ova dva modela su takođe uzajamno ekvivalentna, pri čemu i dalje važi sledeće: $Z_c = \rho v_z P$, $v_z = \sqrt{c_{33}^D / \rho}$ i $C_0 = \epsilon_{33}^S P / l$.

U KLM modelu prenosni odnos transformatora postaje funkcija frekvencije, ali su uloge električnih i mehaničkih (akustičkih) delova kola jasno razdvojene. Na ovaj način model omogućava uočavanje jasne razlike između električnog i mehaničkog ponašanja piezokeramike. Pored navedenog, model olakšava izračunavanje ulazne električne impedanse za proizvoljno opterećenje, kao i jednostavnu analizu uticaja impedanse električnog generatora na akustički prenosni vod, što nije slučaj kod Mason-ovog modela [67].

KLM model se najčešće koristi za modelovanje visokofrekvencijskih pretvarača [109], višeslojnih pretvarača [110], ili modelovanje linearnog [111] i dvodimenzionalnog niza pretvarača [112]. Na osnovu KLM modela nastali su i komercijalno dostupni softveri za

simulaciju rada ultrazvučnih pretvarača, od kojih je najpoznatiji PiezoCAD².

Za modelovanje ultrazvučnih pretvarača sa više parova piezokeramika, potrebno je u KLM modelu izvršiti korekciju vrednosti odgovarajućih parametara [113]. U navedenom slučaju, vrednosti ukupne električne kapacitivnosti i prenosnog odnosa idealnog transformatora zavise od broja piezoelemenata.

3.2 Jednodimenzionalno modelovanje metalnih cilindričnih rezonatora

U literaturi postoji niz istraživanja u kojima je na detaljan način prikazana analiza oscilovanja metalnih cilindričnih nastavaka (rezonatora) konačnih dužina [114]. Analiza oscilovanja metalnih cilindričnih rezonatora u ultrazvučnim pretvaračima zahteva poznavanje karakteristika metala u opsegu frekvencija u kojima se javljaju rezonantni modovi, kao i poznavanje prirode pobuđenih rezonantnih modova. Rezonatori se najčešće projektuju za oscilovanja u osnovnom debljinskom modu. Prilikom projektovanja rezonatora potrebno je uzeti u obzir veliki broj parametara, dok radna frekvencija i karakteristike metala najviše utiču na konačnu dužinu rezonatora.

Oscilovanje rezonatora može se predstaviti jednodimenzionalnom talasnom jednačinom prostiranja longitudinalnih talasa u talasovodu ako su poprečne dimenzije rezonatora male u poređenju sa talasnom dužinom. U literaturi postoje analitička rešenja izvedena za eksponencijalne, konusne i katenoidalne rezonatore, rezonatore profila Gauss-ove krive, kao i nekih profila sa pravougaonim poprečnim presekom [115], [116], [117]. Međutim, za pojedine oblike rezonatora nije moguće odrediti analitička rešenja, pa se za njihovu analizu koriste aproksimativne metode ili numeričke procedure.

Na slici 3.5 je prikazan polutaladni cilindrični rezonator sa konstantnim poprečnim presekom. Za rezonator od izotropnog materijala, sa uniformnim prostiranjem talasa na poprečnom preseku, bez gubitaka u rezonatoru, uključujući i uslov linearne elastičnosti, talasna jednačina prostiranja longitudinalnih talasa duž z -ose rezonatora je [67], [114]:

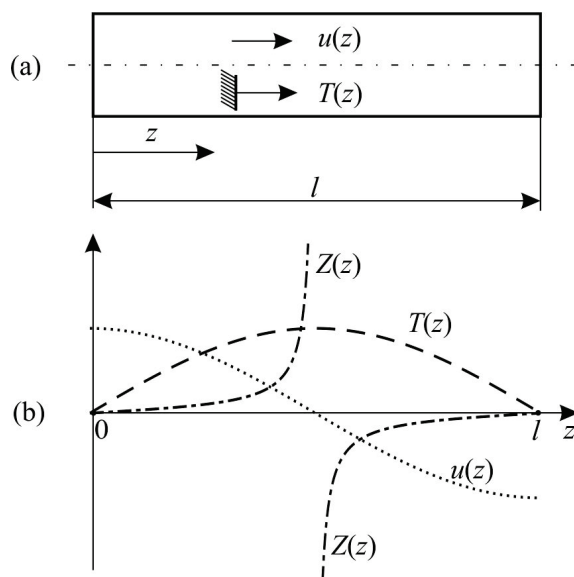
² <http://www.sonicconcepts.com/index.php/products-1/piezocad>

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (3.43)$$

gde je u mehanički pomeraj u z pravcu, u funkciji vremena t i koordinate z . Brzina prostiranja longitudinalnih talasa v_0 u tankom cilindru se uz poznavanje Young-ovog modula elastičnosti E_Y i gustine materijala ρ računa kao $v_0^2 = E_Y/\rho$. U slučaju harmonijskih oscilacija rešenje jednačine (3.43) iznosi:

$$u = (A_1 e^{-jk_0 z} + A_2 e^{jk_0 z}) e^{j\omega t} = u(z) e^{j\omega t}, \quad (3.44)$$

gde su A_1 i A_2 konstante, ω je kružna učestanost, a $k_0 = \omega/v_0$ je talasni broj.



Slika 3.5. (a) Polutaladni rezonator konstantnog poprečnog preseka debljine l , (b) funkcije mehaničkog pomeraja $u(z)$, mehaničkog napona $T(z)$ i mehaničke impedanse $Z(z)$ duž rezonatora [114]

Uz posmatranje vremenski nezavisnog dela jednačine (3.44), za mehanički pomeraj $u(z)$ kod polutalasnog rezonatora prikazanog na slici 3.5, i uz pretpostavku da su krajevi rezonatora sa nultim mehaničkim naponima:

$$\left. \frac{\partial u(z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (3.45)$$

$$\left. \frac{\partial u(z)}{\partial z} \right|_{z=l} = 0, \quad (3.46)$$

funkcija pomeraja $u(z)$ se može prikazati u sledećem obliku:

$$u(z) = u_{zm} \cos(k_0 z), \quad (3.47)$$

gde u_{zm} predstavlja maksimalnu amplitudu pomeraja na krajevima rezonatora. Primenom graničnih uslova dobija se jednačina ($k_0 l = \pi$) koja povezuje dužinu rezonatora l i rezonantnu frekvenciju f na sledeći način:

$$l = \frac{\pi}{k_0} = \frac{\pi v_0}{\omega} = \frac{v_0}{2f}. \quad (3.48)$$

Mehanički napon u z pravcu $T(z)$ je povezan sa mehaničkim pomerajem $u(z)$ i mehaničkim deformacijama u z pravcu $S(z)$ na sledeći način:

$$T(z) = E_Y S(z) = E_Y \frac{du(z)}{dz}. \quad (3.49)$$

Nakon sređivanja jednačine (3.49) dobija se funkcija zavisnosti mehaničkog napona duž z -ose cilindra, čiji je oblik prikazan na slici 3.5(b):

$$T(z) = -\omega \rho v_0 u_{zm} \sin(k_0 z). \quad (3.50)$$

Posmatrajući izraz (3.50) može se zaključiti da je maksimalni dozvoljeni mehanički napon pri oscilovanju u rezonantnom modu određen parametrima rezonatora, kao što su oblik i karakteristike materijala (gustina i Young-ov modul elastičnosti), amplitude mehaničkih pomeraja i frekvencija.

Čvorna ravan oscilovanja cilindra nalazi se na sredini cilindra (za $z=l/2$), gde je mehanički pomeraj tačaka jednak nuli.

Brzina pomeraja tačaka koje osciluju u z pravcu duž rezonatora definiše se sledećom jednačinom:

$$v = \frac{du}{dt} = j\omega u_{zm} \cos(k_0 z) e^{j\omega t} = v(z) e^{j\omega t}. \quad (3.51)$$

Posmatranjem vremenski nezavisnog dela jednačine (3.51), na rastojanju z , gde je osna sila istezanja definisana kao proizvod površine poprečnog preseka i mehaničkog napona ($F(z) = P \cdot T(z)$), može se definisati mehanička impedansa $Z_m(z)$ kao odnos sile $F(z)$ i brzine

pomeraja $v(z)$, za dati poprečni presek:

$$Z_m(z) = \frac{F(z)}{v(z)}. \quad (3.52)$$

Mehanička impedansa predstavlja najznačajniju karakteristiku u analizi prostiranja talasa u čvrstim materijalima. Kod posmatranog polutalasnog rezonatora mehanička impedansa ima nultu vrednost na slobodnim krajevima cilindra, dok u čvornoj ravni postaje beskonačna [114]:

$$Z_m(z) = j\rho P v_0 \tan(k_0 z). \quad (3.53)$$

Jednačina (3.53) je identična jednačini ulazne impedanse kratkospojenog voda karakteristične impedanse $Z_c = \rho P v_0$ i brzine v_0 .

Prikazani način modelovanja tankih metalnih rezonatora se često koristi za jednodimenzionalno modelovanje metalnih nastavaka u kompletnim ultrazvučnim pretvaračima. Međutim, ukoliko talasna dužina nije mnogo veća u odnosu na poprečne dimenzije rezonatora, prostiranje talasa neće biti uniformno, već izobličeno, usled pomeranja u radijalnom pravcu izazvanih Poisson-ovim efektom [67]. Takođe, jednodimenzionalni modeli piezokeramičkih prstenova i diskova nisu pogodni za određivanje rezonantnih frekvencija debljinskih oscilacija koje su u blizini rezonantnih frekvencija radijalnih oscilacija.

3.3 Trodimenzionalni model piezokeramičkog prstena opterećenog na svim konturnim površinama

U kompozitnim ultrazvučnim pretvaračima najčešće se koriste piezokeramički prstenovi umesto diskova, što je uslovljeno potrebom prednaprezanja kompozitne strukture pomoću centralnog zavrtnja. Za preciznu analizu ove vrste pretvarača neophodno je poznavanje rezonantnih frekvencija piezokeramičkih prstenova i u tu svrhu idealan bi bio trodimenzionalni model piezokeramičkog prstena koji uključuje spregu debljinskih oscilacija sa radijalnim oscilacijama. Pri tome, takvim modelom bi se mogao analizirati efekat mehaničkog opterećenja prstena u različitim pravcima.

Generalno, kompletna trodimenzionalna analiza preko konstitutivnih piezoelektričnih jednačina dovodi do skupa nelinearnih jednačina velikog stepena složenosti, zbog čega analitičko rešenje tih jednačina nije moguće pronaći [67]. Prvi korak u pravcu rešavanja takvog sistema predstavljen je preko aproksimativnog trodimenzionalnog elektromehaničkog modela [118]. Ovaj model omogućava analizu sprege između radijalnih i debljinskih modova oscilacija. Takođe, model je primenljiv za bilo koji odnos prečnika i debljine piezokeramičkih diskova. Međutim, međusobno se razlikuju debljinske i radijalne rezonantne frekvencije diska od frekvencija prstena istog prečnika i debljine. Zbog toga je uz primenu aproksimativne metode pri zadovoljavanju mehaničkih i električnih graničnih uslova [119] realizovan aproksimativni trodimenzionalni model piezokeramičkog prstena [120]. Navedenim modelom piezokeramičkog prstena, iz kojeg se može dobiti model piezokeramičkog diska, mogu se analizirati i radijalne i debljinske oscilacije, kao i njihova međusobna sprega [121]. Model sa velikom tačnošću predviđa dinamičko ponašanje piezokeramičkog prstena opterećenog na spoljašnjim površinama različitim mehaničkim opterećenjima. Pomoću ovog modela piezokeramički element je predstavljen u frekvencijskom domenu preko petoprilazne mreže, sa jednim električnim i četiri mehanička pristupa (po jedan pristup za svaku konturnu površinu).

Predmet analize u ovom poglavlju biće modelovanje piezokeramičkih prstenova polarizovanih po debljini, sa spoljašnjim poluprečnikom a , unutrašnjim poluprečnikom b , i debljinom $2h$, kao i sa potpuno metalizovanim kružno-prstenastim površinama na koje se dovodi naizmenični pobudni napon. Dimenzije prstena i polarno-cilindrični koordinatni sistem sa početkom u centru prstena, definisani su na slici 3.6(a). Svaka površina je opterećena akustičkom impedansom Z_i , gde su v_i i F_i brzine i sile na konturnim površinama P_i , za $i=1, 2, 3, 4$.

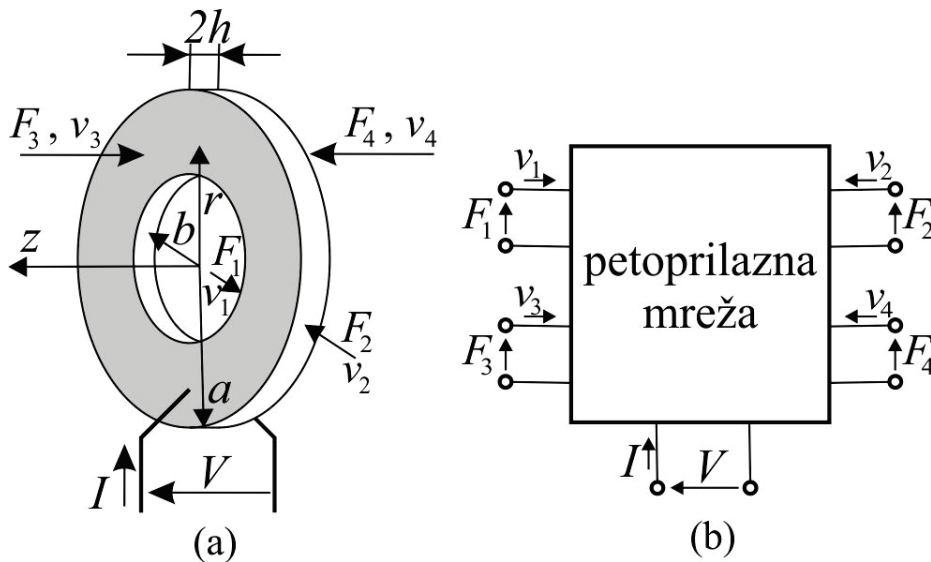
Piezokeramički materijali karakterišu se tenzorima njihovih elastičnih, piezoelektričnih i dielektričnih konstanti. Najčešće korišćeni skup konstitutivnih piezoelektričnih jednačina prikazuje tenzore mehaničkih napona T i električnog polja E unutar materijala u funkciji tenzora relativnih mehaničkih deformacija S i dielektričnog pomeraja D (3.54). U slučaju piezokeramičkog prstena sa slike 3.6(a) komponente električnog polja E_r i E_θ su jednake nuli na dvema kružno-prstenastim metalizovanim površinama i pretpostavlja se da su zanemarljive unutar materijala. Zbog osne simetrije trodimenzionalni model piezokeramičkog prstena dobijen je uz pretpostavku da pravce nespregnutih modova prostiranja talasa sa mehaničkim pomerajima u radijalnom i debljinskom pravcu u_r i u_z , predstavljaju koordinatne ose r i z , tako

da važi:

$$\begin{aligned}
 T_{rr} &= c_{11}^D S_{rr} + c_{12}^D S_{\theta\theta} + c_{13}^D S_{zz} - h_{31} D_z, \\
 T_{\theta\theta} &= c_{12}^D S_{rr} + c_{11}^D S_{\theta\theta} + c_{13}^D S_{zz} - h_{31} D_z, \\
 T_{zz} &= c_{13}^D S_{rr} + c_{13}^D S_{\theta\theta} + c_{33}^D S_{zz} - h_{33} D_z, \\
 E_z &= -h_{31} S_{rr} - h_{31} S_{\theta\theta} - h_{33} S_{zz} + D_z / \epsilon_{33}^S,
 \end{aligned}
 \tag{3.54}$$

gde su c_{ij}^D koeficijenti tenzora elastičnosti, ϵ_{33}^S je dielektrična konstanta prstena u pritisnutom stanju, i h_{ij} su elementi tenzora piezoelektričnih konstanti ($i, j=1, 2, 3$). Relacije između komponentata tenzora relativnih deformacija i vektora mehaničkih pomeraja su sledeće:

$$S_{rr} = \partial u_r / \partial r, \quad S_{\theta\theta} = u_r / r, \quad S_{zz} = \partial u_z / \partial z. \tag{3.55}$$



Slika 3.6. (a) Piezokeramički prsten opterećen na konturnim površinama, geometrija i dimenzije, (b) piezokeramički prsten predstavljen kao mreža sa pet pristupa [67]

Pretpostavljajući harmonijske oscilacije, komponente mehaničkog pomeraja u radijalnom i debljinskom pravcu predstavljene su preko dve ortogonalne talasne funkcije. S obzirom na navedenu pretpostavku granični uslovi ne mogu biti tačno zadovoljeni u svakoj tački na spoljašnjim površinama, već samo aproksimativno [120]:

$$\begin{aligned}
 u_r(r, t) &= [A J_1(k_r r) + B Y_1(k_r r)] e^{j\omega t}, \\
 u_z(z, t) &= [C \sin(k_z z) + D \cos(k_z z)] e^{j\omega t},
 \end{aligned}
 \tag{3.56}$$

gde su talasni brojevi $k_r = \omega / v_r$ i $k_z = \omega / v_z$, i fazne brzine $v_r = c_{11}^D / \rho$ i $v_z = c_{33}^D / \rho$, dva nespregnuta talasa u radijalnom i debljinskom pravcu, respektivno. U jednačinama (3.56) sa J_1 i Y_1

predstavljene su Bessel-ove funkcije prvog reda, prve i druge vrste, respektivno.

Konstante A , B , C i D u jednačinama (3.56) izračunavaju se primenom mehaničkih graničnih uslova koji podrazumevaju da su sve spoljašnje površine u kontaktu sa okolnom sredinom i da postoji kontinuitet brzina na tim površinama:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial u_r}{\partial t} \right|_{r=b} &= v_1 e^{j\omega t}, & \left. \frac{\partial u_r}{\partial t} \right|_{r=a} &= -v_2 e^{j\omega t}, \\ \left. \frac{\partial u_z}{\partial t} \right|_{z=h} &= -v_3 e^{j\omega t}, & \left. \frac{\partial u_z}{\partial t} \right|_{z=-h} &= v_4 e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (3.57)$$

Na osnovu primenjenih graničnih uslova (3.57) dobija se:

$$\begin{aligned} A &= \frac{A_1 v_1 + A_2 v_2}{j\omega}, & B &= \frac{B_1 v_1 + B_2 v_2}{j\omega}, \\ C &= -\frac{v_3 + v_4}{2j\omega \sin(k_z h)}, & D &= \frac{v_4 - v_3}{2j\omega \cos(k_z h)}, \end{aligned} \quad (3.58)$$

za sledeće vrednosti novouvedenih konstanti A_1 , A_2 , B_1 i B_2 :

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{Y_1(k_r a)}{J_1(k_r b)Y_1(k_r a) - J_1(k_r a)Y_1(k_r b)}, \\ A_2 &= \frac{Y_1(k_r b)}{J_1(k_r b)Y_1(k_r a) - J_1(k_r a)Y_1(k_r b)}, \\ B_1 &= \frac{J_1(k_r a)}{J_1(k_r a)Y_1(k_r b) - J_1(k_r b)Y_1(k_r a)}, \\ B_2 &= \frac{J_1(k_r b)}{J_1(k_r a)Y_1(k_r b) - J_1(k_r b)Y_1(k_r a)}. \end{aligned} \quad (3.59)$$

Spoljašnje ponašanje prstena se određuje iz uslova kontinuiteta mehaničkih napona i sila na njegovim spoljašnjim konturama. Da bi ortogonalne funkcije (3.56) zadovoljile navedene uslove smatra se da je sila na svakoj spoljašnjoj površini određena integralom mehaničkog napona na toj površini, tako da se može napisati:

$$\begin{aligned} 2\pi b \int_{-h}^h T_{rr}(b) dz &= -F_1, & 2\pi a \int_{-h}^h T_{rr}(a) dz &= -F_2, \\ 2\pi \int_b^a T_{zz}(h) r dr &= -F_3, & 2\pi \int_b^a T_{zz}(-h) r dr &= -F_4. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Ako se pored dosadašnje analize u obzir uzme i zavisnost struje I od dielektričnog pomeraja

D_z ($I=j\omega\pi(a^2-b^2)D_z$), dobija se linearni sistem jednačina, koji napisan u matricnom obliku opisuje spoljašnje ponašanje piezokeramičkog prstena povezujući električne (napon V i struja I) sa mehaničkim veličinama (sile F_i i brzine v_i) u frekvencijskom domenu [120]:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{13} & z_{15} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{23} & z_{25} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} & z_{34} & z_{35} \\ z_{13} & z_{23} & z_{34} & z_{33} & z_{35} \\ z_{15} & z_{25} & z_{35} & z_{35} & z_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ I \end{bmatrix}. \quad (3.61)$$

Elementi matrice (3.61) su sledeći:

$$\begin{aligned} z_{11} &= \frac{-4\pi h}{j\omega} \{c_{12}^D - c_{11}^D[1 - k_r b(A_1 J_0(k_r b) + B_1 Y_0(k_r b))]\}, \\ z_{12} &= \frac{-4\pi k_r b h c_{11}^D}{j\omega} [A_2 J_0(k_r b) + B_2 Y_0(k_r b)], \\ z_{13} &= \frac{2\pi b c_{13}^D}{j\omega}, \quad z_{15} = \frac{4\pi b h h_{31}}{j\omega P}, \\ z_{21} &= \frac{-4\pi k_r a h c_{11}^D}{j\omega} [A_1 J_0(k_r a) + B_1 Y_0(k_r a)], \\ z_{22} &= \frac{4\pi h}{j\omega} \{c_{12}^D - c_{11}^D[1 + k_r a(A_2 J_0(k_r a) + B_2 Y_0(k_r a))]\}, \\ z_{23} &= \frac{2\pi a c_{13}^D}{j\omega}, \quad z_{25} = \frac{4\pi a h h_{31}}{j\omega P}, \\ z_{33} &= \frac{c_{33}^D k_z P}{j\omega \operatorname{tg}(2k_z h)}, \quad z_{34} = \frac{c_{33}^D k_z P}{j\omega \sin(2k_z h)}, \quad z_{35} = \frac{h_{33}}{j\omega}, \\ z_{55} &= \frac{1}{j\omega C_0}, \end{aligned} \quad (3.62)$$

pri čemu je $P=\pi(a^2-b^2)$ površina prstena, $C_0=\epsilon_{33}^S P/(2h)$ je tzv. kapacitivnost pritisnute keramike.

Električni granični uslov takođe je zadovoljen preko aproksimativnog integralnog uslova. Međutim, tako dobijeni napon V je funkcija r koordinate, što je u suprotnosti sa pretpostavkom da su površine koje su normalne na z -osu (P_3 i P_4) metalizovane i, prema tome, i ekvipotencijalne. Napon V se još jednom integriše duž r -ose kako bi se učinio nezavisnim od r . Kao posledica ovog aproksimativnog integralnog uslova na spoljašnjim

površinama prstena mogu se posmatrati samo srednje vrednosti sila i brzina, pri čemu se ne mogu uočiti njihove vrednosti u svakoj tački površine.

3.4 Trodimenzionalni matrični model metalnih prstenova

Najčešće se pri konstrukciji snažnih ultrazvučnih pretvarača koriste metalni nastavci cilindričnog oblika sa ili bez otvora. Kod metalnih nastavaka koji osciluju na debljinskoj rezonantnoj frekvenciji u proračunima se često zanemaruje prisutnost otvora, tako da su sami proračuni nedovoljno precizni. Na osnovu jednodimenzionalne talasne jednačine prostiranja longitudinalnih oscilacija u dugačkom metalnom cilindru, mogu se na jednostavan način pronaći analitička rešenja za određivanje rezonantnih frekvencija. U slučaju kraćih metalnih nastavaka, kod kojih se talasna dužina longitudinalnih oscilacija može uporediti sa radijalnim dimenzijama nastavka, prostiranje talasa nije uniformno na poprečnom preseku zbog uticaja radijalnih pomeraja izazvanih Poisson-ovim efektom. Pored toga, brzina prostiranja talasa opada zbog ovog disperzionog efekta [122]. Tada su amplitude debljinskih oscilacija neuniformne, pa je potrebno analizu oscilovanja metalnih cilindara vršiti trodimenzionalnim modelima [123].

Predmet analize u ovom poglavlju je modelovanje metalnih cilindara sa spoljašnjim poluprečnikom a , unutrašnjim poluprečnikom b , i debljinom $2h$. Dimenzije prstena i polarno-cilindrični koordinatni sistem sa početkom u centru prstena, definisani su na slici 3.7(a). Svaka pojedinačna površina cilindra je opterećena akustičkom impedansom Z_i , gde su v_i i F_i brzine i sile na tim konturnim površinama P_i (za $i=1, 2, 3, 4$).

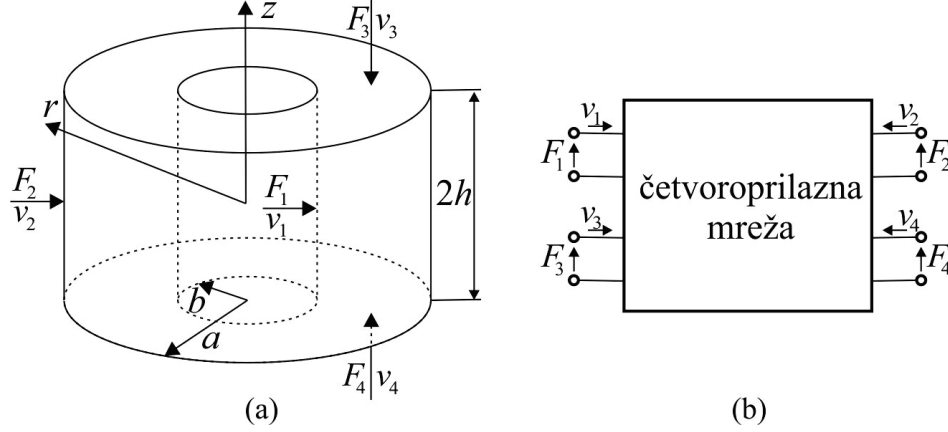
Na osnovu trodimenzionalnog modela piezokeramičkih prstenova prikazanog u poglavlju 3.3, u nastavku će biti prikazan trodimenzionalni model metalnih nastavaka cilindričnog oblika sa ili bez otvora u sredini. Trodimenzionalni model metalnih nastavaka se dobija zanemarivanjem piezoelektričnih konstanti h_{31} i h_{33} u izrazima (3.62). Za konstante materijala se usled izotropnosti materijala mogu usvojiti sledeće relacije [124]:

$$c_{11} = c_{33} = \lambda_m + 2\mu, \quad c_{12} = c_{13} = \lambda_m, \quad (3.63)$$

pri čemu se Lamé-ovi koeficijenti λ_m i μ , dobijaju preko Poisson-ovog odnosa ν , i Young-ovog modula elastičnosti E_Y , na sledeći način:

$$\lambda_m = \frac{\nu E_Y}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E_Y}{2(1+\nu)}, \quad (3.64)$$

što dodatno pojednostavljuje izraze (3.62).



Slika 3.7. (a) Metalni cilindar u obliku prstena opterećen na konturnim površinama, geometrija i dimenzije, (b) Metalni cilindar predstavljen kao mreža sa četiri pristupa [123]

Na ovaj način se sistem linearnih jednačina koje povezuju mehaničke veličine na spoljašnjim površinama metalnog cilindra (sile F_i i brzine v_i) u frekvencijskom domenu svodi na sledeći sistem jednačina [123]:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{23} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} & z_{34} \\ z_{13} & z_{23} & z_{34} & z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}. \quad (3.65)$$

Elementi matrice impedansi u sistemu jednačina (3.65) definisani su na sledeći način:

$$\begin{aligned} z_{11} &= \frac{-4\pi h}{j\omega} \{c_{12} - c_{11}[1 - kb(A_1 J_0(kb) + B_1 Y_0(kb))]\}, \\ z_{12} &= \frac{-4\pi k b h c_{11}}{j\omega} [A_2 J_0(kb) + B_2 Y_0(kb)], \quad z_{13} = \frac{2\pi b c_{12}}{j\omega}, \\ z_{21} &= \frac{-4\pi k a h c_{11}}{j\omega} [A_1 J_0(ka) + B_1 Y_0(ka)], \\ z_{22} &= \frac{4\pi h}{j\omega} \{c_{12} - c_{11}[1 + ka(A_2 J_0(ka) + B_2 Y_0(ka))]\}, \quad z_{23} = \frac{2\pi a c_{12}}{j\omega}, \\ z_{33} &= \frac{c_{11} k \pi (a^2 - b^2)}{j\omega \tan(2kh)}, \quad z_{34} = \frac{c_{11} k \pi (a^2 - b^2)}{j\omega \sin(2kh)}. \end{aligned} \quad (3.66)$$

Iz graničnih uslova koji podrazumevaju da su sve spoljašnje površine u kontaktu sa okolnom sredinom, kao i postojanja kontinuiteta brzina na tim površinama (3.57), određene su vrednosti integracionih konstanti A_1 , A_2 , B_1 i B_2 iz jednačina (3.66), na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{Y_1(ka)}{J_1(kb)Y_1(ka) - J_1(ka)Y_1(kb)}, \\
 A_2 &= \frac{Y_1(kb)}{J_1(kb)Y_1(ka) - J_1(ka)Y_1(kb)}, \\
 B_1 &= \frac{J_1(ka)}{J_1(ka)Y_1(kb) - J_1(kb)Y_1(ka)}, \\
 B_2 &= \frac{J_1(kb)}{J_1(ka)Y_1(kb) - J_1(kb)Y_1(ka)}.
 \end{aligned}
 \tag{3.67}$$

4 MODELOVANJE KOMPOZITNIH ULTRAZVUČNIH PRETVARAČA VELIKE SNAGE

Pri mehaničkom spajanju opterećenja sa pretvaračem, akustičke karakteristike mehaničkog opterećenja menjaju granične uslove na radnoj površini pretvarača, tako da se stvaraju značajna prigušenja i slabljenja oscilacija. Dodatno, usled ovih uticaja menja se i rezonantna frekvencija pretvarača [125]. Važan preduslov za realizaciju efikasnih pretvarača je predviđanje ponašanja pretvarača u sprezi sa opterećenjem u radnim uslovima.

U ovom poglavlju prikazan je nov pristup modelovanju kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage. Izvršeno je najpre modelovanje kompozitnih pretvarača različitih dimenzija, sa različitim kombinacijama materijala, korišćenjem jednodimenzionalne analize prikazane u poglavlju 3.1. Veliki broj jednodimenzionalnih modela predloženih u literaturi ne razmatra uticaj zavrtnja za prednaprezanje, ili uključuje uticaj samo dela zavrtnja [126]. Novi realizovani generalni jednodimenzionalni model kompozitnih pretvarača uključuje sve sastavne delove pretvarača, kao i piezoelektrična svojstva pobudne keramike.

S obzirom na potrebu prepoznavanja prirode rezonantnih modova koji se pobuđuju, u disertaciji su prikazani novi trodimenzionalni matrični modeli kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage. Kompozitni pretvarači su modelovani primenom aproksimativnog trodimenzionalnog matričnog modela piezokeramičkih prstenova, prikazanog u poglavlju 3.3, i primenom trodimenzionalnog matričnog modela metalnih prstenova prikazanog u poglavlju 3.4.

Pri izradi modela kompozitne strukture pretvarača koji sadrži veliki broj višepristupnih mreža, kod međusobnog povezivanja višepristupnih mreža potrebno je ispuniti uslov da amplituda

oscilacija na svakoj kontaktnoj površini ostane kontinualna [127]. Prema tome, amplitude oscilacija na kontaktnim površinama između dva dela ultrazvučnog pretvarača izračunate u modelima moraju biti međusobno jednake. Isti uslov važi i za mehaničke napone i brzine na kontaktnim površinama. Dakle, međusobnim povezivanjem modela piezokeramičkih prstenova, metalnih nastavaka i zavrtnja, realizovani su novi trodimenzionalni modeli kompletnih kompozitnih ultrazvučnih pretvarača.

4.1 Novi jednodimenzionalni modeli kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage

Kompozitni ultrazvučni pretvarači velike snage u najjednostavnijem obliku su u ovoj disertaciji predstavljeni jednodimenzionalnim modelima koji predstavljaju mreže sa jednim električnim i dva mehanička pristupa. Međutim, kada se pri modelovanju uzmu u obzir uticaj zavrtnja i različita električna povezivanja pretvarača dolazi do povećanja broja električnih i mehaničkih pristupa u elektromehaničkom ekvivalentnom kolu.

U literaturi [128], [129] i [130] uticaj zavrtnja nije uziman u obzir jer je njegov efekat smatran zanemarljivim, dok su u literaturi [131] ekvivalentne mreže pojedinih pasivnih elemenata još više pojednostavljene. U literaturi [132] i [133] je analiziran uticaj samo dela zavrtnja koji prolazi kroz keramiku u vidu paralelne veze odgovarajućih četvoropola. Deo zavrtnja koji prolazi kroz keramiku predstavljen je zajedno sa impedansama četvoropola u mehaničkom delu ekvivalentnog elektromehaničkog kola u literaturi [134] i [135], ili direktno preko talasnih jednačina u literaturi [60].

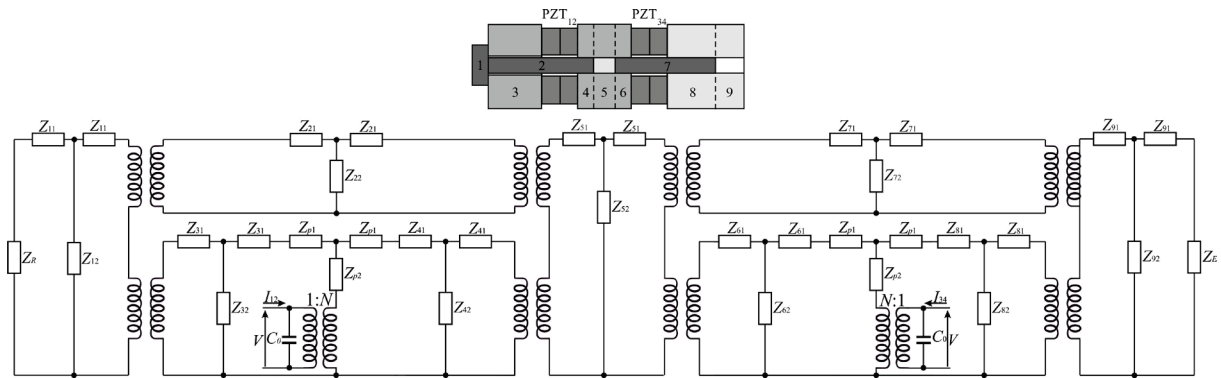
Generalni jednodimenzionalni modeli piezoelektričnih kompozitnih pretvarača, prikazani u ovoj disertaciji, uzimaju u obzir sve sastavne delove pretvarača, sa posebnim osvrtom na uticaj zavrtnja i glave zavrtnja, kao i piezoelektrična svojstva pobudne keramike [136]. Generalni modeli razvijeni su uz pomoć jednodimenzionalne teorije i adaptirani su na osnovu struktura kompozitnih pretvarača prikazanih na slikama 2.1 i 2.2. Realizovani generalni modeli prikazani su pomoću ekvivalentnih elektromehaničkih kola prikazanih na slikama 4.1 i 4.2.

Elementi elektromehaničkih kola koji odgovaraju izotropnim i asimetričnim metalnim

delovima napravljenim od različitih materijala izračunavaju se kao:

$$Z_{i1} = jZ_{ci} \operatorname{tg} \frac{k_i l_i}{2}, \quad Z_{i2} = \frac{-jZ_{ci}}{\sin(k_i l_i)}, \quad (4.1)$$

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 $i=1, 2, 3, \dots, 9$, slika 4.1, i za $i=1, 2, 3, \dots, 6$, slika 4.2). Dodatno, ρ_i su gustine, l_i i P_i su dužine i površine poprečnih preseka, a v_i su brzine prostiranja longitudinalnih ultrazvučnih talasa kroz odgovarajuće elemente.



Slika 4.1. Generalni jednodimenzionalni model kompozitnog pretvarača tipa A

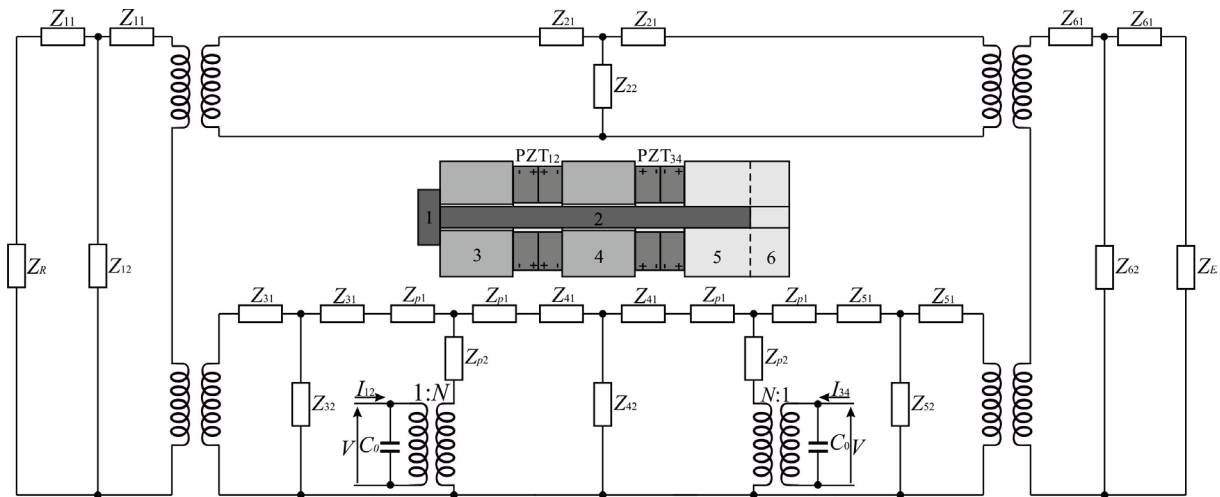
Elementi kola koji odgovaraju piezokeramičkim prstenovima (PZT₁₂ i PZT₃₄) određuju se na sledeći način:

$$Z_{p1} = jZ_{cp} \operatorname{tg} \frac{nk_p l_p}{2}, \quad (4.2)$$

$$Z_{p2} = \frac{-jZ_{cp}}{\sin(nk_p l_p)},$$

gde su $Z_{cp} = \rho_p v_p P_p$ i $k_p = \omega/v_p$ karakteristične impedanse i odgovarajući talasni brojevi, respektivno. Sa ρ_p , l_p , P_p i v_p predstavljene su gustina, debljina, površina poprečnog preseka piezokeramika i brzina prostiranja longitudinalnih ultrazvučnih talasa, respektivno. 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 piezoelektričnom konstantom h_{33} i relativnom dielektričnom konstantom pritisnute keramike ϵ_{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.



Slika 4.2. Generalni jednodimenzionalni model kompozitnog pretvarača tipa B

U šemi predstavljenoj na slici 4.1 postoje dva metalna zavrtnja. Gornji metalni zavrtnj se prostire duž reflektora (3), gornjeg aktivnog sloja (PZT₁₂) i dela srednje mase (4), dok se donji centralni zavrtnj prostire duž dela srednje mase (6), donjeg aktivnog sloja (PZT₃₄) i dela emitora (8), zbog čega su vezani paralelno sa pomenutim elementima u šemi. U elektromehaničkom ekvivalentnom kolu kompozitnog pretvarača tipa B (slika 4.2) metalni zavrtnj se prostire duž cele strukture, zbog čega je vezan paralelno sa ostalim elementima u šemi.

Kao što je već napomenuto na početku ovog poglavlja, većina jednodimenzionalnih modela ne uključuje uticaj zavrtnja za prednaprezanje, ili uključuje samo deo zavrtnja. Na taj način dolazi do smanjenja preciznosti modela u predviđanju ponašanja pretvarača, kako sa kraćim, tako i sa dužim metalnim nastavcima. Radi dokazivanja ispravnosti postupka modelovanja predloženim generalnim jednodimenzionalnim modelima koji uključuju uticaj zavrtnja za prednaprezanje, u nastavku disertacije prikazan je analitički model kompozitnog pretvarača koji zanemaruje uticaj centralnog zavrtnja.

Ako se izuzme uticaj centralnog zavrtnja, elektromehaničko ekvivalentno kolo prikazano na slici 4.3 odgovara strukturama oba kompozitna pretvarača. Na osnovu prikazane šeme ekvivalentnog kola, čiji se elementi izračunavaju na osnovu jednačina (4.1) i (4.2), ulazna električna impedansa pretvarača može se odrediti kao:

$$Z_e = \frac{Z_{12}Z_{34}}{N^2(Z_{12} + Z_{34}) + j2\omega C_0 Z_{12}Z_{34}}, \quad (4.3)$$

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:

$$Z_{12} = \frac{Z_{e5} - \frac{Z_{e2}}{Z_{e3}} Z_{e6}}{Z_{e4} - \frac{Z_{e1}}{Z_{e3}} Z_{e6}}, \quad Z_{34} = \frac{Z_{e3} - \frac{Z_{e6}}{Z_{e5}} Z_{e2}}{Z_{e1} - \frac{Z_{e4}}{Z_{e5}} Z_{e2}}. \quad (4.4)$$

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

$$\begin{aligned} Z_{e1} &= 1 + \frac{Z_{p1} + Z_{21} + Z_{22}}{Z_{e7}} + \frac{Z_{22}}{Z_{e8}}, \\ Z_{e2} &= Z_{22} + Z_{p2} + Z_{p1} + Z_{21} + \frac{Z_{p2}(Z_{22} + Z_{p1} + Z_{21})}{Z_{e7}}, \\ Z_{e3} &= Z_{22} + \frac{Z_{p2}Z_{22}}{Z_{e8}}, \\ Z_{e4} &= 1 + \frac{Z_{p1} + Z_{21} + Z_{22}}{Z_{e8}} + \frac{Z_{22}}{Z_{e7}}, \\ Z_{e5} &= Z_{22} + \frac{Z_{p2}Z_{22}}{Z_{e7}}, \\ Z_{e6} &= Z_{22} + Z_{p2} + Z_{p1} + Z_{21} + \frac{Z_{p2}(Z_{22} + Z_{p1} + Z_{21})}{Z_{e8}}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

pri čemu važi:

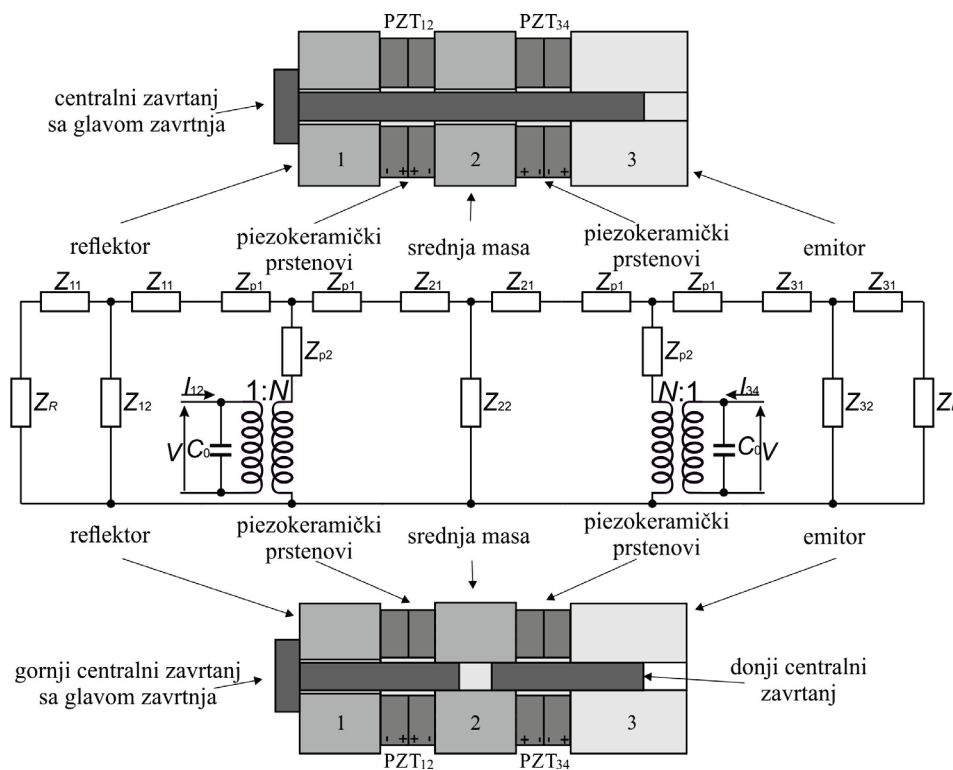
$$Z_{e7} = \frac{(Z_{rf} + Z_{11})Z_{12}}{Z_{rf} + Z_{11} + Z_{12}} + Z_{11} + Z_{p1}, \quad Z_{e8} = \frac{(Z_{ef} + Z_{31})Z_{32}}{Z_{ef} + Z_{31} + Z_{32}} + Z_{31} + Z_{p1}. \quad (4.6)$$

Na osnovu jednačine (4.3) mogu se izvesti izrazi za dobijanje rezonantnih frekvencija:

$$Z_{12}Z_{34} = 0, \quad (4.7)$$

i antirezonantnih frekvencija:

$$N^2(Z_{12} + Z_{34}) + j2\omega C_0 Z_{12} Z_{34} = 0. \quad (4.8)$$



Slika 4.3. Elektromehaničko ekvivalentno kolo kompozitnih pretvarača u kome je zanemaren uticaj zavrtnja

Jednačine (4.7) i (4.8) potvrđuju da frekvencijske karakteristike pretvarača u jednodimenzionalnoj teoriji zavise od karakteristika materijala sastavnih delova kompozitnih pretvarača i njihovih geometrijskih dimenzija.

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

Predloženi jednodimenzionalni modeli kompozitnih pretvarača ne uključuju 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.

4.2 Novi trodimenzionalni matrični modeli kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage

Realizacija i implementacija novih trodimenzionalnih matričnih modela kompozitnih ultrazvučnih pretvarača izvršena je u programskom paketu Matlab/Simulink. Zbog velikog stepena kompleksnosti samih struktura kompozitnih pretvarača i upotrebe trodimenzionalnih modela prethodno su razvijena sledeća modularna rešenja:

- Prvo modularno rešenje - model piezokeramičkih prstenova [137]. Ovim modelom se vrši predviđanje i debljinskih i radijalnih modova oscilovanja, kao i njihove međusobne sprege. Piezokeramički prstenovi u ovom modelu su predstavljani kao mreže sa četiri mehanička pristupa koja odgovaraju njihovim glavnim površinama (sile i brzine na cilindričnim površinama, i sile i brzine na kružno-prstenastim površinama), i jednim električnim pristupom (napon i struja).
- Drugo modularno rešenje - model pasivnih metalnih nastavaka [138]. U ovom modelu metalni delovi su predstavljani mrežama sa četiri ili tri pristupa (sile i brzine na kružno-prstenastim površinama, i sile i brzine na obe cilindrične površine za posmatrani metalni prsten, kao i sila i brzina samo na jednoj cilindričnoj površini za posmatrani metalni disk).

Kombinacijom redno-paralelnog mehaničkog i paralelnog električnog povezivanja sastavnih elemenata pretvarača dobijeni su trodimenzionalni elektromehanički modeli kompozitnih pretvarača sa brojem pristupa koji zavisi od toga da li je posmatrani pretvarač tipa A ili je pretvarač tipa B. U nastavku su predstavljeni postupci realizacije i implementacije modela pretvarača tipa A i tipa B. S obzirom na modularni pristup modelovanju pretvarača moguće je koristiti iste module za oba pretvarača, tako da je prvo prikazan model pretvarača tipa B, koji je jednostavnije blokovske strukture u odnosu na model pretvarača tipa A.

Blokovski izgled Matlab/Simulink modela kompozitnog pretvarača tipa B prikazan je na slici 4.4. Modeli sastavnih elemenata pretvarača sastoje se iz dva osnovna dela. U prvom delu modela se na osnovu karakteristika materijala izračunavaju svi elementi matrice impedansi (jednačina (3.61) za piezokeramiku, i jednačina (3.65) za metalne nastavke). U drugom delu

modela se računaju nepoznate vrednosti sila i brzina. Dodatno, modeli sadrže i blokove za zadavanje inicijalnih vrednosti nepoznatih sila i brzina koje deluju na graničnim površinama posmatranog elementa.

Modeli piezokeramičkih prstenova su predstavljeni blokovima 1 i 2 u gornjem aktivnom sloju, i blokovima 3 i 4 u donjem aktivnom sloju kompozitnog pretvarača. Mehaničke sile koje deluju na sastavnim površinama između dva elementa su međusobno jednake, dok su mehaničke brzine istog intenziteta i pravca, a suprotnog smera. U modelu piezokeramičkog prstena računa se električna impedansa Z , koja je paralelno povezana sa električnim impedansama ostalih piezokeramičkih prstenova (navedeno važi samo u slučaju paralelnog električnog povezivanja svih piezokeramika). Takođe, izlazne veličine iz modela piezokeramičkih prstenova su nepoznate mehaničke sile i brzine koje deluju na odgovarajućim kružno-prstenastim površinama.

U posmatranim modelima piezokeramičkih prstenova je primenjen sledeći sistem jednačina za izračunavanje nepoznate sile F_3 , brzine v_4 , kao i ulazne električne impedanse Z :

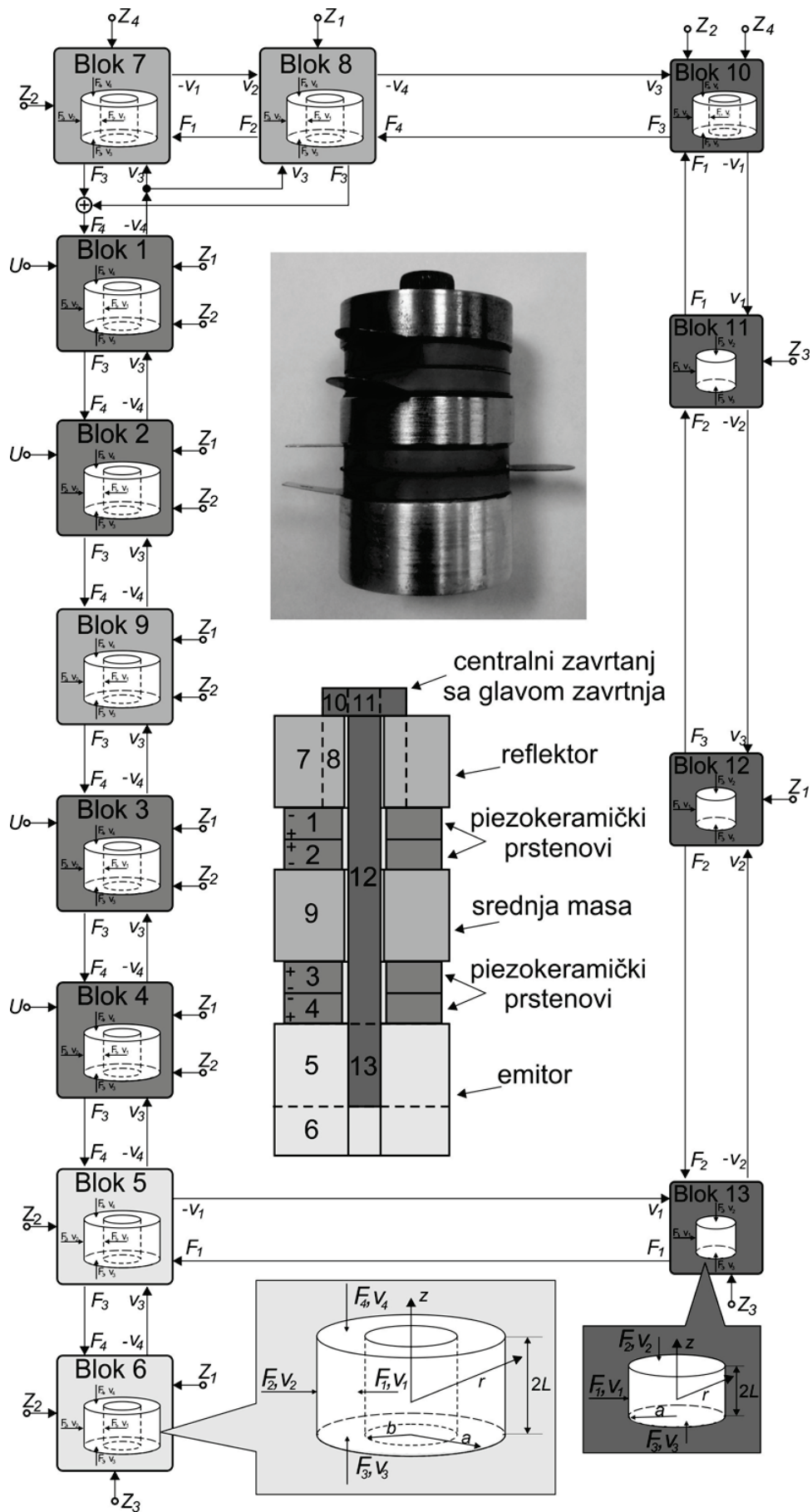
$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{13} & A_{15} \\ 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ 0 & 0 & 0 & c_{11} & c_{12} \\ 0 & 0 & 0 & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ I \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Novouvedene veličine računaju se na sledeći način:

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= z_{i,j} \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5), \\ a_{i,j} &= A_{1,j+1}A_{i+1,1} - A_{1,1}A_{i+1,j+1} \quad (i, j = 1, 2, 3, 4), \\ b_{i,j} &= a_{1,j+1}a_{i+1,1} - a_{1,1}a_{i+1,j+1} \quad (i, j = 1, 2, 3), \\ c_{i,j} &= b_{1,j+1}b_{i+1,1} - b_{1,1}b_{i+1,j+1} \quad (i, j = 1, 2), \end{aligned} \quad (4.10)$$

gde z_{ij} (za $i, j = 1, 2, 3, 4, 5$) odgovaraju izrazima (3.62), i važi da je:

$$\begin{aligned} G_3 &= A_{11}a_{11}F_1, \\ G_4 &= A_{11}a_{11}b_{12}F_3 - A_{11}a_{11}b_{11}F_1, \\ G_5 &= A_{11}a_{11}b_{13}F_3 - A_{11}a_{11}b_{11}U. \end{aligned} \quad (4.11)$$



Slika 4.4. Trodimenzionalni model kompozitnog pretvarača tipa B

Modeli emitora i reflektora kompozitnog pretvarača sastoje se iz dva dela implementirana u blokovima 5 i 6 (emitor), i u blokovima 7 i 8 (reflektor), dok je model srednje mase predstavljen blokom 9. Definisane međusobnih veza poznatih i nepoznatih veličina u pomenutim blokovima prikazano je na slici 4.4. Na osnovu geometrijskih karakteristika navedenih metalnih delova, načina njihove međusobne mehaničke povezanosti i na osnovu mehaničkih veza sa ostalim elementima posmatranog kompozitnog pretvarača, u nastavku je prikazan sistem jednačina implementiran u blokovima 5, 6, 7, 8 i 9:

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{13} \\ 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & 0 & b_{11} & b_{12} \\ 0 & 0 & 0 & c_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Novonastale promenljive su definisane sledećim relacijama:

$$G_1=F_1, G_2=A_{21}F_1, G_3=A_{21}a_{21}F_1-A_{31}a_{11}F_1+A_{11}a_{11}F_3 \text{ i}$$

$$G_4=F_1(A_{21}a_{21}b_{21}-A_{31}a_{11}b_{21}-A_{21}a_{13}b_{11}+A_{41}a_{11}b_{11})+A_{11}a_{11}b_{21}F_3-A_{11}a_{11}b_{11}F_4 \text{ za blok 5,}$$

$$G_1=G_2=G_3=0 \text{ i } G_4=-A_{11}a_{11}b_{11}F_4 \text{ za blok 6,}$$

$$G_1=F_1, G_2=A_{21}F_1, G_3=A_{21}a_{21}F_1-A_{31}a_{11}F_1+A_{11}a_{11}F_3 \text{ i } G_4=F_1(A_{21}a_{13}-A_{41}a_{11}) \text{ za blok 7,}$$

$$G_1=0, G_2=-A_{11}F_1, G_3=-A_{11}F_3 \text{ i } G_4=-A_{11}F_4 \text{ za blok 8, i}$$

$$G_1=G_2=0, G_3=A_{11}a_{11}F_3 \text{ i } G_4=A_{11}a_{11}F_4 \text{ za blok 9.}$$

S obzirom na rednu mehaničku vezu kružno-prstenastih delova reflektora sa prvom piezokeramikom u gornjem aktivnom sloju, njihova međusobna sprega predstavljena je pomoću kola za sabiranje vrednosti mehaničkih sila reflektora. Izračunate vrednosti mehaničke brzine na kružno-prstenastoj površini piezokeramike u bloku 1, dovode se na ulaze blokova 7 i 8.

Zavrtnaj je predstavljen blokovima 10, 11, 12 i 13. Zbog fizičkih veza koje odgovarajući delovi zavrtnja ostvaruju sa ostalim elementima kompozitnog pretvarača može se uočiti analogija blokova 11 i 13. Izlazi iz ovih blokova su mehaničke brzine koje deluju na kružnim površinama prema srednjem delu zavrtnja (bloku 12). Dodatno, u pomenutim blokovima se izračunavaju i mehaničke sile koje deluju na cilindričnim površinama zavrtnja prema unutrašnjoj cilindričnoj površini dela glave zavrtnja (prema bloku 10), kao i prema delu emitora (bloku 5).

Sistem jednačina koji u frekvencijskom domenu karakteriše blokove 11 i 13 dat je izrazom:

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 0 & a_{11} & a_{12} \\ 0 & 0 & b_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

Novonastale promenljive definisane su sledećim relacijama:

$$G_1=F_1, G_2=A_{21}F_1-A_{11}F_2 \text{ i } G_3=F_1(A_{21}a_{21}-A_{31}a_{11})-A_{11}a_{21}F_2.$$

Model srednjeg dela zavrtnja (blok 12) ima najjednostavniju strukturu definisanu jednačinom (4.13), gde su novonastale promenljive definisane na sledeći način:

$$G_1=0, G_2=-A_{11}F_2 \text{ i } G_3=-A_{11}a_{21}F_2+A_{11}a_{11}F_3.$$

Prstenasti deo glave zavrtnja, koji se u mehaničkoj strukturi kompozitnog pretvarača nalazi iznad reflektora, u modelu je predstavljen četvoroprilaznom mrežom (blok 10). U bloku 10 se izračunava sistem jednačina (4.12), pri čemu važe isti izrazi za novonastale promenljive date za blok 7.

Blokovski izgled Matlab/Simulink modela kompozitnog pretvarača tipa A prikazan je na slici 4.5. Pomoću analogije između blokova modela kompozitnih pretvarača tipa A i tipa B prikazane u tabeli 4.1 može se zaključiti da model pretvarača tipa A sadrži tri nova bloka koji karakterišu srednju masu: blokovi 9, 17 i 18. U sva tri bloka je implementiran sistem jednačina (4.12), pri čemu su za blokove 9 i 18 novonastale promenljive:

$$G_1=F_1, G_2=A_{21}F_1, G_3=F_1(A_{21}a_{21}-A_{31}a_{11})+A_{11}a_{11}F_3 \text{ i } G_4=G_3+A_{11}a_{11}(F_4-F_3),$$

$$\text{dok za blok 17 važe sledeći izrazi: } G_1=G_2=0, G_3=A_{11}a_{11}F_3 \text{ i } G_4=A_{11}a_{11}F_4.$$

U ovim blokovima računaju se: mehanička sila na kružno-prstenastoj površini prema donjem aktivnom sloju, mehanička brzina na kružno-prstenastoj površini prema gornjem aktivnom sloju, kao i mehaničke brzine na delovima unutrašnje cilindrične površine koji su u kontaktima sa zavrtnjima.

Za analizu rada kompozitnih pretvarača pri različitim kombinacijama povezivanja električnih ulaza često je neophodna modifikacija određenih delova samog modela. Tačnije, brza modifikacija određenih delova modela opravdava način modularnog pristupa modelovanju

pretvarača koji je u ovoj disertaciji korišćen. U kompozitnim pretvaračima su piezokeramički prstenovi u gornjem i donjem aktivnom sloju povezani mehanički redno. Dodatno, preko kontaktnih metalnih folija i upotrebom odgovarajućih električnih izolatora pretvarači se sa pobudnim generatorom mogu povezati različitim redno-paralelnim kombinacijama. Primenom navedenih električnih povezivanja povećava se složenost modela pretvarača.

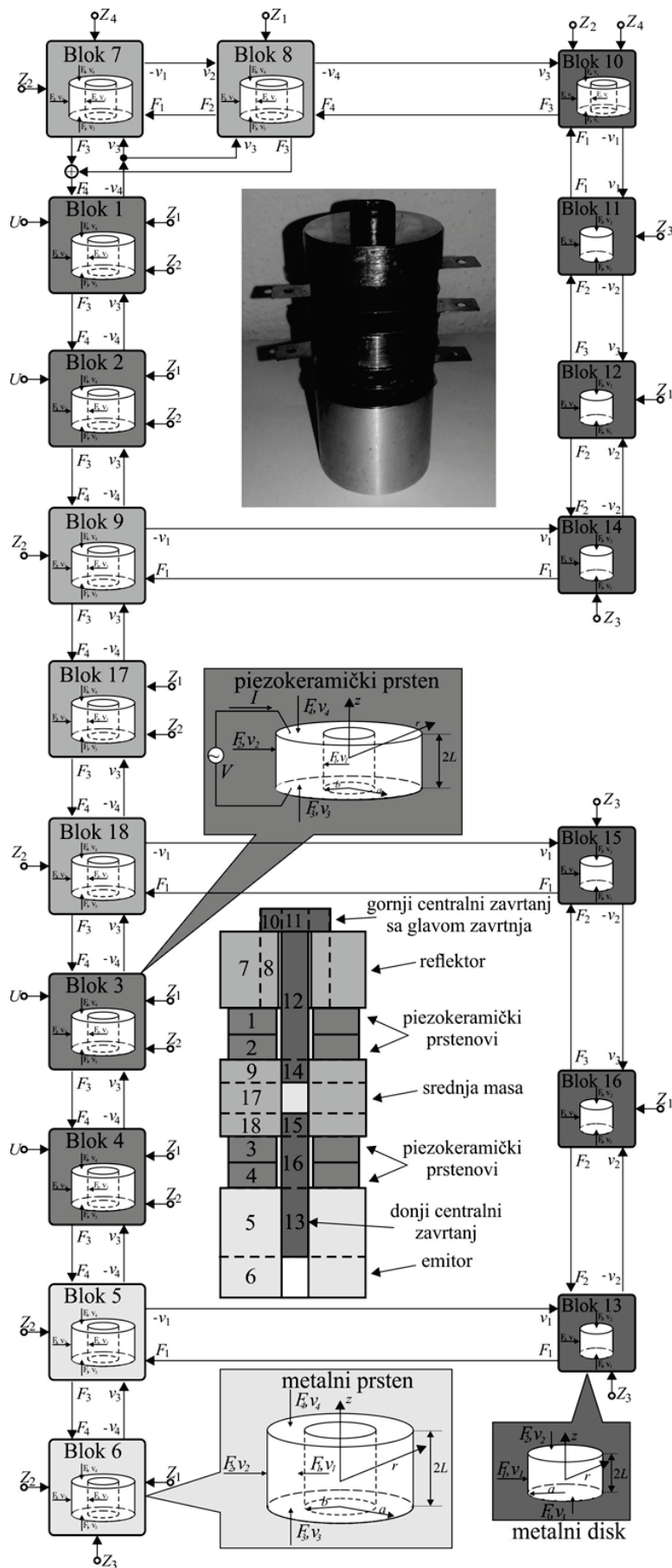
Tabela 4.1. Analogija između blokova modela pretvarača tipa A i tipa B

Tip A	blok 5	blok 6	blok 7	blok 8	blok 10	blok 11	blok 12	blok 13	blok 14	blok 15	blok 16	blokovi 9, 17 i 18
Tip B	blok 5	blok 6	blok 7	blok 8	blok 10	blok 11	blok 12	blok 11	blok 11	blok 11	blok 12	/

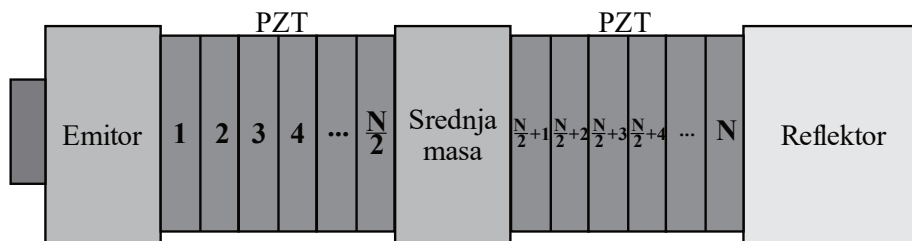
U cilju efikasnijeg modelovanja razvijen je novi blok kojim se izračunavaju vrednosti napona i struja određenih grana u kolu napajanja pretvarača. Na slici 4.6 prikazan je kompozitni pretvarač sa $N=N_I \cdot N_U$ piezoelemenata, pri čemu je N deljivo sa četiri, tako da se u svakom aktivnom sloju nalazi paran broj piezokeramičkih prstenova. Na slici 4.7 prikazana je ekvivalentna šema proizvoljnog redno-paralelnog električnog povezivanja piezoelemenata pretvarača sa slike 4.6. U prikazanoj ekvivalentnoj šemi svaki piezokeramički prsten predstavljen je svojom ulaznom električnom impedansom Z_i ($i=1, 2, \dots, N$). Dodatno, primenjeni novi blok u modelu pretvarača izračunava i ekvivalentnu ulaznu električnu impedansu Z_e celog ultrazvučnog pretvarača na osnovu pobudnog električnog napona V , koristeći izraz (4.14).

$$Z_e = \frac{A_{11}a_{11}b_{22}N_I V + b_1 \sum_{i=1}^{N_I+N_U} v_{i3} - A_{11}a_{11}b_{31} \sum_{i=1}^{N_I+N_U} F_{i4}}{N_U b_2 V}. \quad (4.14)$$

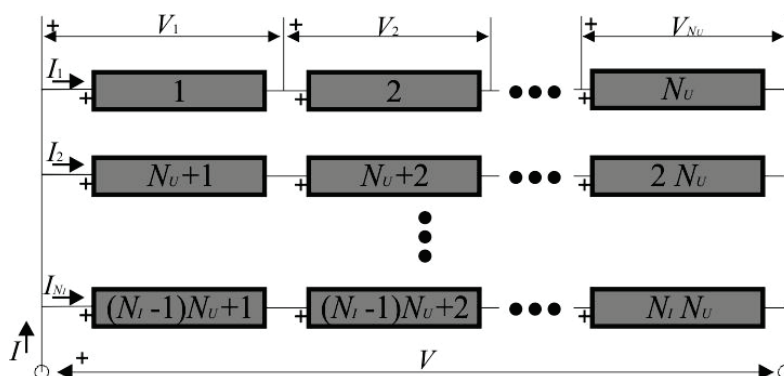
U jednačini (4.14) v_{i3} i F_{i4} predstavljaju mehaničke brzine i sile na odgovarajućim kružno-prstenastim površinama i -tog piezokeramičkog prstena (sa usvojenim smerovima prikazanim na slici 3.6(a)), pri čemu b_1 i b_2 predstavljaju koeficijente koji se računaju na sledeći način: $b_1=b_{31}b_{12}-b_{31}b_{22}$ i $b_2=b_{22}b_{33}-b_{31}b_{13}$. Sume u jednačini (4.14) predstavljaju algebarski zbir vrednosti odgovarajućih brzina u zavisnosti od orijentacije piezokeramike, i odgovarajućih mehaničkih napona. U slučaju upotrebe piezokeramičkih prstenova istih karakteristika i dimenzija, poslednja jednačina važi za oba kompozitna pretvarača realizovana u ovoj disertaciji.



Slika 4.5. Trodimenzionalni model kompozitnog pretvarača tipa A



Slika 4.6. Izgled kompozitnog pretvarača kod koga se u svakom aktivnom sloju nalazi paran broj piezokeramičkih prstenova



Slika 4.7. Ekvivalentna šema proizvoljnog redno-paralelnog električnog povezivanja piezoelmenata kompozitnog pretvarača prikazanog na slici 4.6

4.3 Efektivni elektromehanički faktor sprege kompozitnih pretvarača

Elektromehanički faktor sprege k , definisan izrazom (2.7), određuje efikasnost elektromehaničke strukture kao pretvarača [139]. Elektromehanički faktor sprege je najkorisniji parametar koji u potpunosti karakteriše konverziju energije u pretvaraču [140], i za dobar pretvarač je uvek veći od 50% [52]. Elektromehanički faktor sprege pretvarača koji osciluje slobodno, odnosno koji je mehanički izolovan od okolne sredine, može se odrediti za bilo koje dimenzije pretvarača primenom jednodimenzionalne teorije [141], rešavanjem dvodimenzionalnih jednačina spregnutih oscilacija [51], [142], [143], ili korišćenjem trodimenzionalnih modela prstenova [144]. Elektromehanički faktor sprege može se odrediti za piezokeramičke elemente bez gubitaka pri debljinskom ili radijalnom modu oscilovanja [145], ili sa prisutnim gubicima u materijalu [146].

Međutim, u praksi se najčešće koristi prosta empirijska formula za određivanje faktora sprege, koji se u tom slučaju naziva efektivnim elektromehaničkim faktorom sprege k_{eff} [147]. Ovaj faktor se može za svaki rezonantni mod odrediti primenom klasične relacije (4.15), u kojoj za posmatrani mod oscilovanja pretvarača bez gubitaka f_a i f_r predstavljaju frekvencije na kojima ulazna električna impedansa pretvarača dostiže maksimum i minimum, respektivno [148]:

$$k_{eff}^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}. \quad (4.15)$$

Model frekvencijske zavisnosti mehaničkih gubitaka optimizovanog piezoelektričnog pretvarača, kao i elektromehanički faktor sprege u funkciji dimenzija piezokeramičkih elemenata i njihovih položaja u strukturi pretvarača, prikazani su u literaturi [149]. Dodatno, analitička optimizacija odnosa dimenzija pretvarača može se ostvariti ekvivalentnim elektromehaničkim kolima za debljinski mod oscilovanja pretvarača bez opterećenja [150], ili opterećenog pretvarača [151]. Istraživanja prikazana u navedenim literaturama u velikoj meri su doprinela razvoju različitih tehnika optimizacije ultrazvučnih pretvarača. Međutim, pri realizaciji pretvarača sa specifičnim karakteristikama evidentan je relativno mali efektivni elektromehanički faktor sprege [152].

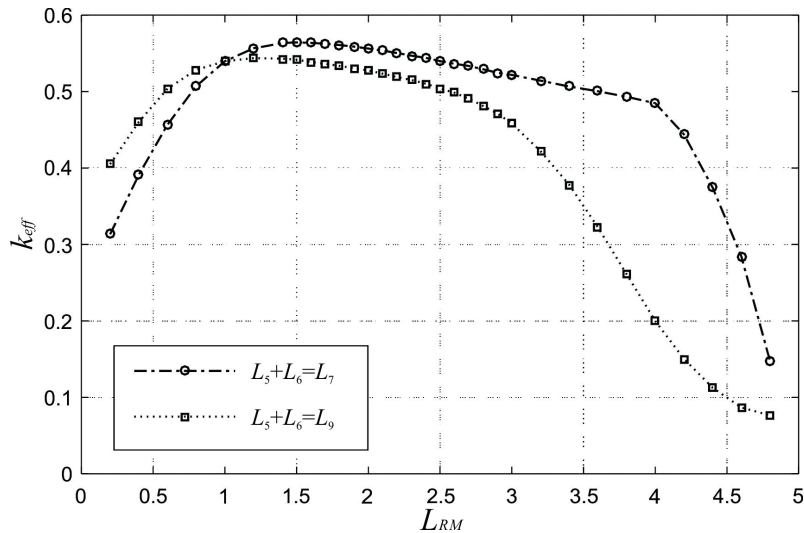
Poslednjih godina predlaže se realizacija piezoelektričnih ultrazvučnih pretvarača sa modifikovanim strukturama u odnosu na klasične Langevin-ove pretvarače. Najčešće se istraživanja oslanjaju na konstrukciju novih metalnih rezonatora [153]. Za veću efikasnost pretvarača neophodno je izvršiti analizu uticaja pojedinih parametara na efektivni elektromehanički faktor sprege cele strukture pretvarača. U literaturi [154] je predloženo rešenje ultrazvučnog linearnog motora u obliku slova „U“, sa pobudnim piezoelektričnim pretvaračem koji osciluje u debljinskom modu sa efikasnošću od 21.09%. Elektromehanički faktor sprege pretvarača sa eksponencijalnim metalnim nastavcima pravougaonog poprečnog preseka ima vrednost od 37.5% do 42.59%, nakon optimizacije vezane za položaj pobude sastavljene od četiri piezokeramike [155]. Kod Langevin-ovog pretvarača sa novim optimizovanim metalnim nastavcima postignuta je maksimalna efikasnost od 40% [156]. Kod ultrazvučnih piezoelektričnih pretvarača sa modifikovanim strukturama i novim metalnim nastavcima elektromehanički faktori sprege su 14.5% [157], 34.51% [115] i 40.93% [100]. U pojedinim istraživanjima prikazanim u navedenim literaturama nisu izvršeni procesi optimizacije novih struktura, tako da je faktor sprege realizovanih pretvarača mali.

Razvojem računarskih sistema i novih softverskih alata, numeričke metode postaju sve prisutnije u oblasti razvoja novih ultrazvučnih pretvarača. Međutim, do rezultata pomoću numeričkih metoda se dolazi posle velikog broja izračunavanja, što sam proces razvoja i optimizacije pretvarača čini nefleksibilnim [158], [159]. U poređenju sa numeričkim metodama, analitičke metode imaju prednosti koje se ogledaju u većem stepenu fleksibilnosti, kao i većoj brzini optimizacije pretvarača.

U ovoj disertaciji analiziran je efektivni elektromehanički faktor sprege pretvarača korišćenjem analitičkog modela sa slike 4.4, na osnovu izračunate zavisnosti ulazne električne impedanse pretvarača tipa B od frekvencije. Pomoću ovog modela može se odrediti efektivni elektromehanički faktor sprege za svaki rezonantni mod oscilovanja. Međutim, pošto se pretvarač u praksi pobuđuje u prvom debljinskom modu oscilovanja, u nastavku je primenom izraza (4.15) analiziran uticaj odnosa debljina metalnih nastavaka na efikasnost elektromehaničke konverzije pretvarača za njegov radni, debljinski rezonantni mod.

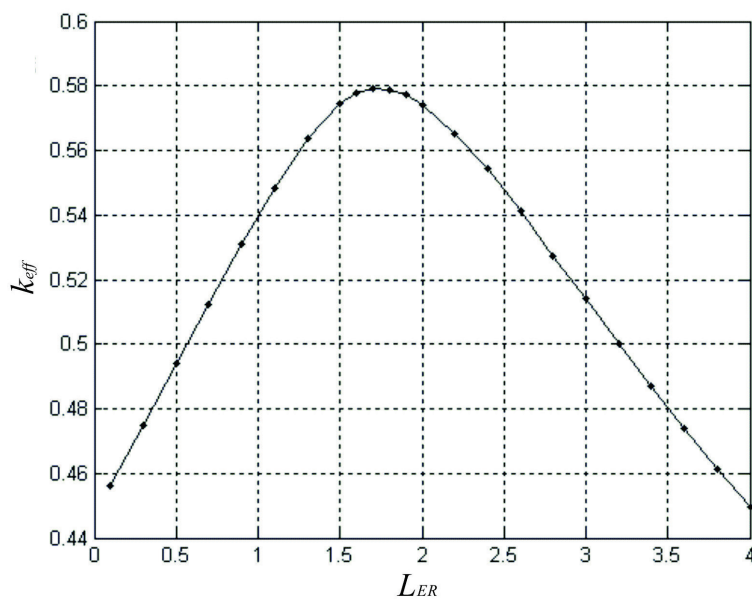
Na slikama 4.8 - 4.10 prikazane su modelovane zavisnosti efektivnog elektromehaničkog faktora sprege pretvarača tipa B od geometrijskih dimenzija metalnih nastavaka za prvi rezonantni mod. U analizi su kao piezoelektrični pobudni elementi korišćeni piezokeramički prstenovi od PZT4 materijala (tabela 5.1), sa dimenzijama $\emptyset 38/\emptyset 15/5$ mm. Reflektor, srednja masa i centralni zavrtnj su od nerđajućeg čelika, dok je emitor od duraluminijuma sa standardnim parametrima materijala prikazanim u tabeli 5.2. Svi piezokeramički prstenovi su električno povezani paralelno. Odnos unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika cilindričnih metalnih nastavaka je 8/40, dok su spoljašnji prečnici glave zavrtnja i tela zavrtnja 13 mm i 8 mm, respektivno.

Na slici 4.8 prikazane su dve modelovane zavisnosti efektivnog elektromehaničkog faktora sprege u funkciji odnosa debljine reflektora i srednje mase ($L_{RM}=L_7/L_9$, za $L_7=L_8$). U prvoj modelovanoj zavisnosti usvojena je debljina emitora jednaka debljini srednje mase ($L_5+L_6=L_9$). U drugoj modelovanoj zavisnosti usvojena je debljina emitora jednaka debljini reflektora ($L_5+L_6=L_7$). Dodatno, za izračunavanje navedenih zavisnosti uzete su u obzir i promene dužine odgovarajućeg dela centralnog zavrtnja (L_{12}). Očekivana vrednost optimalnog odnosa debljina reflektora i srednje mase nalazi se u opsegu 0.7 - 2.5 za predefinisane debljine emitora. Takođe, sa slike se jasno vidi dominantan uticaj debljine emitora na efikasnost strukture pretvarača, tako da je potrebno dodatno utvrditi uticaj debljine emitora na efektivni elektromehanički faktor sprege.



Slika 4.8. Modelovane zavisnosti efektivnog elektromehaničkog faktora sprege k_{eff} za prvi rezonantni mod pretvarača tipa B, u funkciji odnosa debljina reflektora i srednje mase L_{RM} , za usvojeno $L_5 + L_6 = L_9$, odnosno $L_5 + L_6 = L_7$

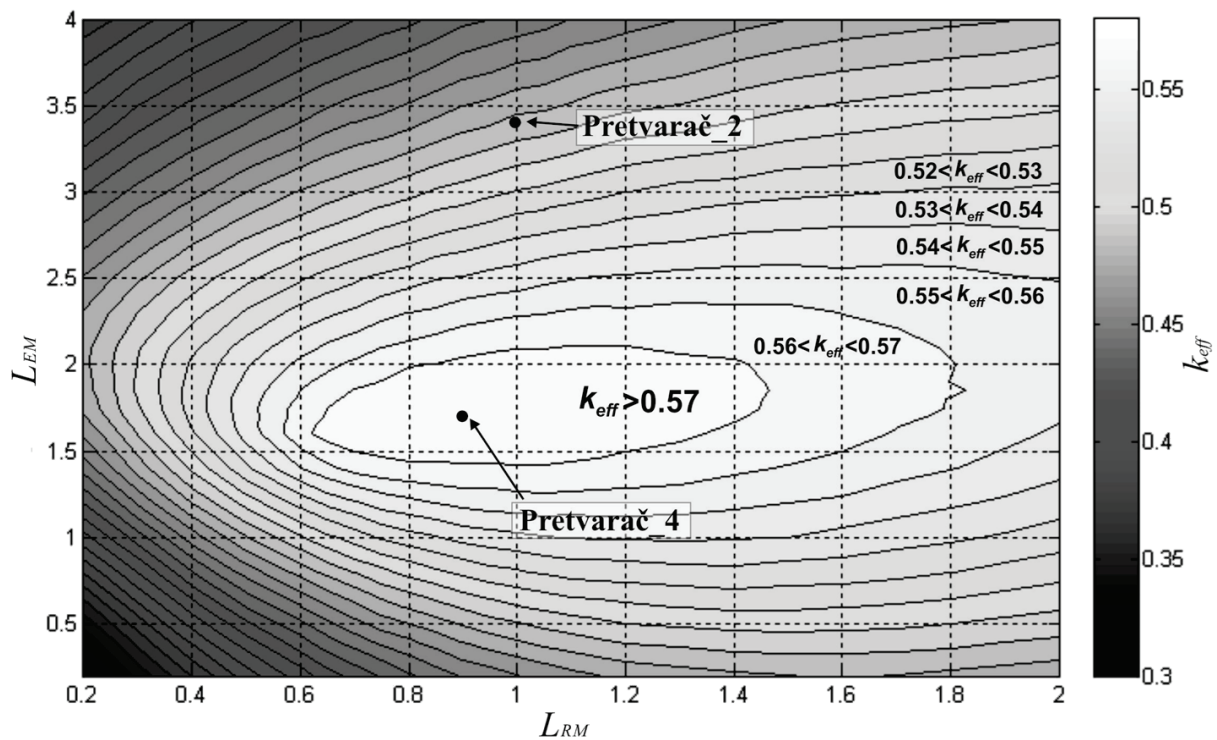
Na slici 4.9 prikazana je modelovana zavisnost efektivnog elektromehaničkog faktora sprege u funkciji odnosa debljina emitora i reflektora ($L_{ER} = (L_5 + L_6) / L_7$), za debljinu srednje mase jednaku debljini reflektora ($L_7 = L_8 = L_9$), pri čemu je uzeta u obzir i promena dužine odgovarajućeg dela centralnog zavrtnja ($L_{13} = L_5$). Sa slike se jasno može videti da efektivni elektromehanički faktor sprege ima maksimalnu vrednost kada je debljina emitora 1.7 puta veća od debljine reflektora.



Slika 4.9. Modelovana zavisnost efektivnog elektromehaničkog faktora sprege k_{eff} u funkciji odnosa debljina emitora i reflektora L_{ER} za prvi rezonantni mod pretvarača tipa B, pri jednakim debljinama reflektora i srednje mase

Dosadašnje analize odlikuju se jednostavnošću i velikom brzinom dobijanja rezultata zbog uključivanja malog broja parametara. Kao takve, mogu biti veoma korisne za optimizaciju pretvarača manje složenih struktura. U daljem procesu optimizacije kompozitnog pretvarača tipa B, potrebno je pri analizi uticaja dimenzija na efektivni elektromehanički faktor sprege uključiti više parametara.

Krajnja optimizacija predloženog pretvarača ostvarena je analizom zavisnosti efektivnog elektromehaničkog faktora sprege od odnosa debljina emitora i srednje mase ($L_{EM}=(L_5+L_6)/L_9$), i odnosa debljine reflektora i srednje mase ($L_{RM}=L_7/L_9$, za $L_7=L_8$) (slika 4.10). Za kratke krajnje metalne nastavke elektromehanički faktor sprege je veoma mali. Debljina reflektora ima znatno manji uticaj na prvi rezonantni mod od debljine emitora. Prema tome, na efektivni elektromehanički faktor sprege veći uticaj ima odnos L_{EM} od odnosa L_{RM} . Dobijena maksimalna vrednost efektivnog elektromehaničkog faktora sprege u prikazanoj analizi je $k_{eff}=0.5802$, za odnose $L_{EM}=1.7$ i $L_{RM}=0.9$.



Slika 4.10. Modelovana zavisnost efektivnog elektromehaničkog faktora sprege k_{eff} u funkciji odnosa debljine emitora i srednje mase L_{EM} i odnosa debljine reflektora i srednje mase L_{RM} , za prvi rezonantni mod kompozitnog pretvarača tipa B

Na osnovu rezultata iz prethodne analize moguće je optimizovati strukturu kompozitnog pretvarača tipa B. Kao rezultat toga, realizovana su dva pretvarača čiji odnosi geometrijskih

dimenzija odgovaraju tačkama označenim na slici 4.10. Prvi pretvarač (pretvarač_2, sa konačnim dimenzijama prikazanim u tabeli 5.3) ima proizvoljno odabran odnos dimenzija ($L_{EM}=3.36$ i $L_{RM}=1$), dok drugi pretvarač (pretvarač_4, sa konačnim dimenzijama prikazanim u tabeli 5.3) predstavlja optimalno rešenje dobijeno na osnovu prethodne analize ($L_{EM}=1.7$ i $L_{RM}=0.9$).

5 POREĐENJE NUMERIČKIH I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

U cilju poređenja rezultata dobijenih pomoću prikazanih razvijenih modela sa eksperimentalnim merenjima nad realizovanim pretvaračima, analizirana je frekvencijska zavisnost modula ulazne električne impedanse kompozitnih pretvarača. Povezivanjem akustičkih impedansi na spoljašnjim površinama pretvarača može se lako odrediti ulazna električna impedansa $z_{ul}=U/I$. Zbog velikog opsega promene impedanse analizirana je funkcija slabljenja u decibelima ($Z_{ul}=20\log|z_{ul}[\Omega]|$ [dB]). Ukoliko je okolna sredina vazduh, akustičke impedanse na spoljašnjim površinama su $Z_i=400$ Rayl [46], [54].

Parametri i konstante korišćenih piezokeramičkih prstenova prikazani su u tabeli 5.1, a u tabeli 5.2 su dati parametri materijala korišćenih za metalne nastavke i zavrtnj. Vrednosti dimenzija pojedinačnih sastavnih delova realizovanih kompozitnih pretvarača date su u tabeli 5.3.

Eksperimentalne karakteristike zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije za realizovane kompozitne pretvarače izmerene su sledećim mernim instrumentima: HP4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer, HP3042A Automatic Network Analyzer i AGILENT 4284A precision LCR meter (slika 5.1). Navedene eksperimentalne karakteristike upoređene su sa analognim karakteristikama dobijenim pomoću predloženih modela u programskom paketu Matlab/Simulink. Izmerene i modelovane karakteristike, koje obuhvataju osnovne i nekoliko viših rezonantnih modova, takođe su prikazane u ovom poglavlju.

U cilju poređenja rezultata dobijenih modelovanjem pretvarača, korišćena su eksperimentalna merenja ulazne električne impedanse realizovanih kompozitnih pretvarača sa navedenim

dimenzijama i kombinacijama materijala. Kada se kompozitni pretvarač pobudi naizmeničnim naponom, mogu biti pobuđeni svi izmereni rezonantni modovi podešavanjem frekvencije pobudnog generatora.

Tabela 5.1. Parametri piezokeramika [160]

Simbol	Jedinica	PZT2	PZT4	PZT5A	PZT5H	PZT8
$\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$	-	260	635	830	1470	600
c_{11}^E	10^{10} N/m ²	13.5	13.9	12.1	12.6	14.9
c_{12}^E	10^{10} N/m ²	6.79	7.78	7.54	7.59	8.11
c_{13}^E	10^{10} N/m ²	6.81	7.43	7.52	8.41	8.11
c_{33}^E	10^{10} N/m ²	11.3	11.5	11.1	11.7	13.2
c_{11}^D	10^{10} N/m ²	13.6	14.5	12.6	13	15.2
c_{12}^D	10^{10} N/m ²	6.93	8.39	8.09	8.28	8.41
c_{13}^D	10^{10} N/m ²	6.12	6.09	6.52	7.22	7.03
c_{33}^D	10^{10} N/m ²	14.8	15.9	14.7	15.7	16.9
s_{11}^E	10^{-12} m ² /N	11.6	12.3	16.4	16.5	11.5
s_{12}^E	10^{-12} m ² /N	-3.33	-4.05	-5.74	-4.78	-3.7
s_{13}^E	10^{-12} m ² /N	-4.97	-5.31	-7.22	-8.45	-4.8
s_{33}^E	10^{-12} m ² /N	14.8	15.5	18.8	20.7	13.5
s_{44}^E	10^{-12} m ² /N	45	39	47.5	43.5	31.9
e_{31}	C/m ²	-1.86	-5.2	-5.4	-6.55	-4.1
e_{33}	C/m ²	9	15.1	15.8	23.3	14
h_{31}	10^8 V/m	-8.1	-9.2	-7.3	-5.05	-7.7
h_{33}	10^8 V/m	39.2	26.8	21.5	18	26.4
k_p	-	-0.47	-0.58	-0.6	-0.65	-0.51
k_{31}	-	-0.28	-0.334	-0.344	-0.388	-0.3
k_{33}	-	0.625	0.7	0.705	0.752	0.64
ρ	kg/m ³	7600	7500	7750	7500	7600

Tabela 5.2. Fizičke osobine materijala koji se koriste za metalne nastavke

Veličina	ρ [10^3 kg/m ³]	v_0 [m/s]	E_Y [10^{11} N/m ²]	ν
Materijal				
Čelik	8000	5250	1.8	0.305
Duraluminijum	2800	5130	0.68	0.34
Magnezijum	1740	4800	0.42	0.28

Verifikacija predloženih modela pretvarača izvršena je najpre modelovanjem karakteristika zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije za realizovani neopterećeni ultrazvučni kompozitni pretvarač sa strukturom tipa A, a potom i za realizovane pretvarače sa strukturom tipa B.

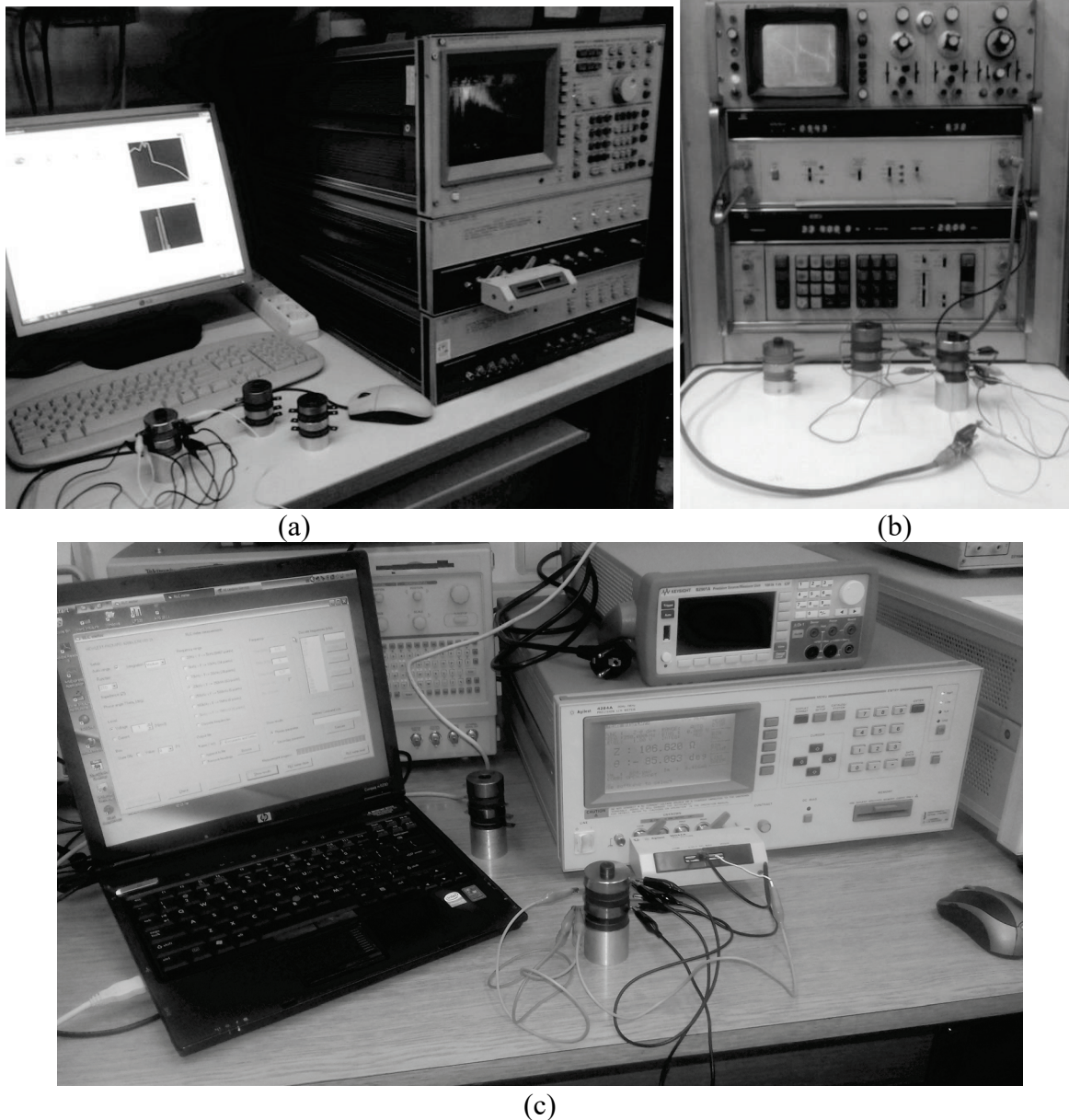
Tabela 5.3. Geometrijske dimenzije sastavnih delova realizovanih kompozitnih pretvarača korišćenih u analizi

Tip pretvarača: Dimenzije (mm)	Kompozitni pretvarač			
	tipa A		Kompozitni pretvarač tipa B	
	Pretvarač 1	Pretvarač 2	Pretvarač 3	Pretvarač 4
$2L_1=2L_2=2L_3=2L_4$	6.35	5	6.35	5
$2L_5=2L_{13}$	16	16	16	17
$2L_6$	21	21	21	1.7
$2L_7=2L_8$	11	11	11	10
$2L_9$	4	11	11	11
$2L_{10}=2L_{11}$	8	8	8	8
$2L_{12}$	23.7	42	42	41
$2L_{14}=2L_{15}=2L_{18}$	4	-	-	-
$2L_{16}$	12.7	-	-	-
$2L_{17}$	3	-	-	-
$2a_1=2a_2=2a_3=2a_4$	38	38	50	38
$2a_5=2a_6=2a_7=2a_9$	40	40	50	40
$2a_8=2a_{10}$	13	13	13	13
$2a_{11}=2a_{12}=2a_{13}$	8	8	8	8
$2a_{14}=2a_{15}=2a_{16}$	8	-	-	-
$2a_{17}=2a_{18}$	40	-	-	-
$2b_1=2b_2=2b_3=2b_4$	13	15	20	15
$2b_5=2b_6=2b_{10}$	8	8	8	8
$2b_7$	13	13	13	13
$2b_8$	9	9	9	9
$2b_9$	8	9	9	9
$2b_{17}=2b_{18}$	8	-	-	-

5.1 Analiza kompozitnog pretvarača tipa A

Na slici 5.2 su prikazane eksperimentalne i modelovane zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije kompozitnog pretvarača_1. Karakteristike materijala i dimenzije sastavnih delova pretvarača_1 prikazane su u tabelama 5.1 i 5.3. Sastavni delovi pretvarača_1 su: pobudni PZT8 piezokeramički prstenovi, emitor od duraluminijuma, dok su reflektor, srednja masa i zavrtnji napravljeni od čelika. Zavisnosti impedanse od frekvencije računata su: predloženim generalnim 1D modelom (slika 4.1), jednodimenzionalnim modelom koji u analizi ne uzima u obzir uticaj zavrtnja (slika 4.3) i predloženim trodimenzionalnim matričnim modelom (slika 4.5). Na slikama na kojima nisu prikazane električne šeme povezivanja pretvarača uz karakteristike zavisnosti ulazne električne impedanse, pobuda

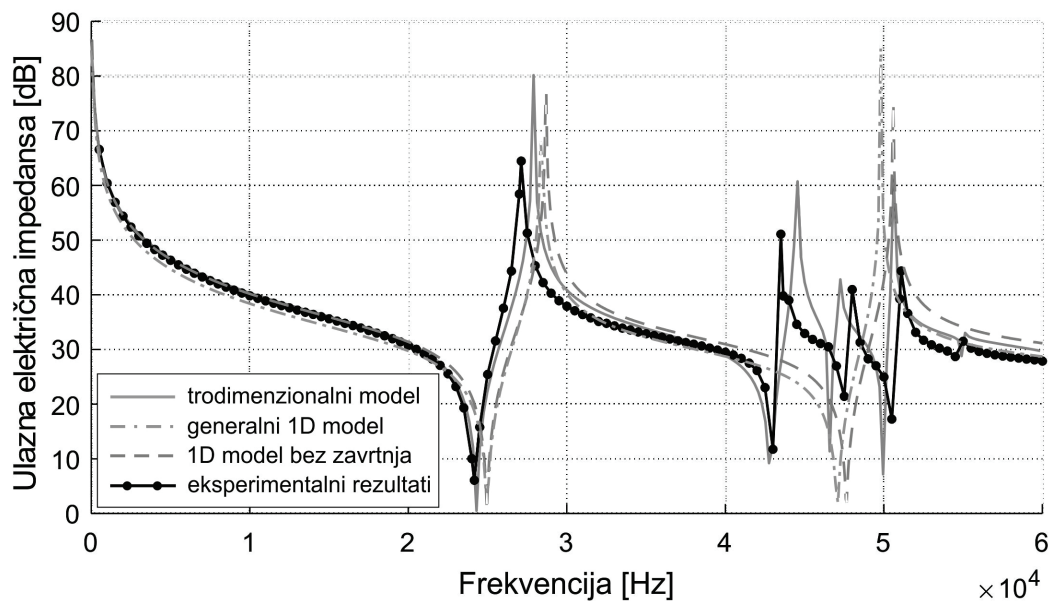
pretvarača ostvarena je paralelnim električnim povezivanjem svih piezokeramika.



Slika 5.1. (a) HP4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer, (b) HP3042A Automatic Network Analyzer i (c) AGILENT 4284A precision LCR meter

Postoji velika sličnost modelovanih i eksperimentalnih zavisnosti, što se može videti na slici 5.2. Pošto se radi o kompozitnom pretvaraču sa većim odnosom dužine i poprečnih dimenzija, oba jednodimenzionalna modela daju zadovoljavajuće rezultate tokom analize pretvarača u slučaju prvog rezonantnog moda. Izmerena rezonantna frekvencija osnovnog rezonantnog moda je 24.16 kHz. Izračunata rezonantna frekvencija primenom oba predložena jednodimenzionalna modela je 24.95 kHz, pri čemu je greška koju prave jednodimenzionalni modeli u određivanju ove rezonantne frekvencije 3.17%. Kada je reč o antirezonantnoj

frekvenciji (27.12 kHz), bolji rezultat se dobija korišćenjem predloženog generalnog 1D modela (28.35 kHz) u odnosu na model koji ne uključuje uticaj zavrtnja (28.7 kHz). Predloženim jednodimenzionalnim modelima se može predvideti opšti oblik drugog rezonantnog moda, ali sa velikim odstupanjima. Merena rezonantna frekvencija drugog rezonantnog moda je 43 kHz, dok su rezonantne frekvencije dobijene jednodimenzionalnim modelima 47.1 kHz (generalni 1D model) i 47.65 kHz (model koji ne uključuje uticaj zavrtnja).



Slika 5.2. Ulazna električna impedansa u funkciji frekvencije za kompozitni ultrazvučni pretvarač_1 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima

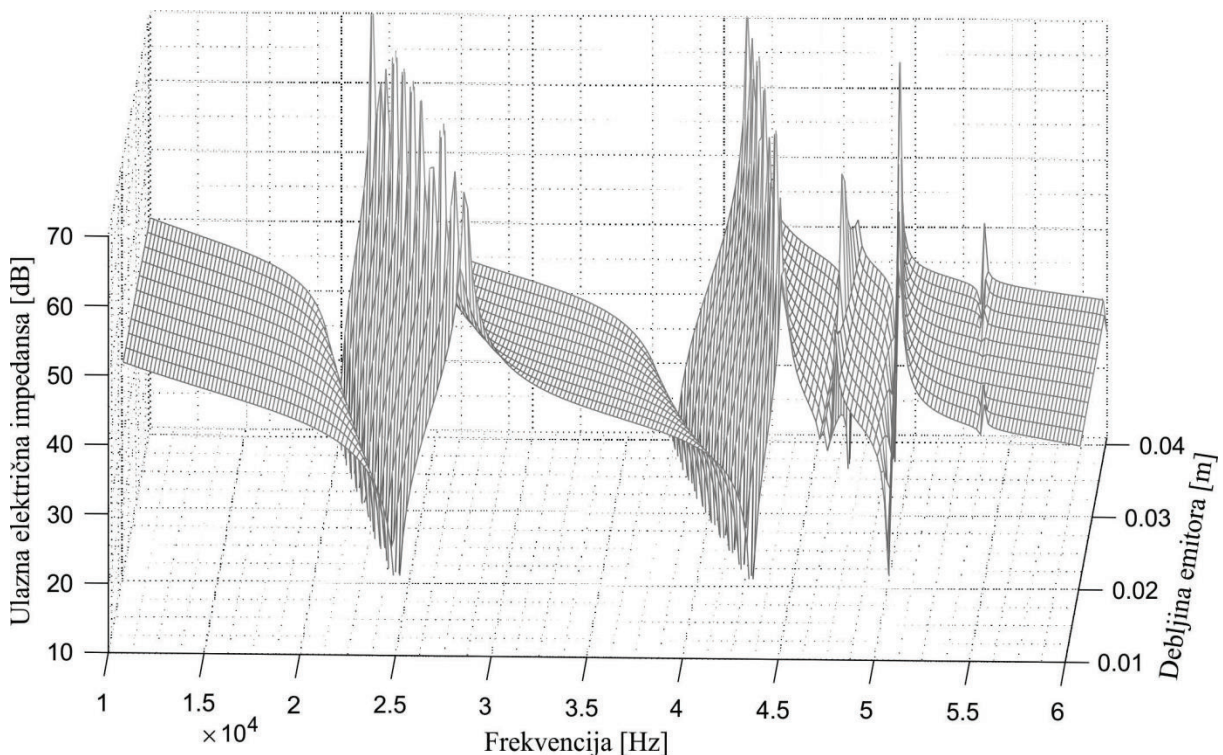
Takođe, na slici 5.2 je prikazana i modelovana zavisnost ulazne električne impedanse korišćenjem trodimenzionalnog matričnog modela. Predloženi trodimenzionalni model sa velikom tačnošću može predvideti rezonantnu frekvenciju osnovnog debljinskog moda, jer ona iznosi 24.3 kHz (greška koja nastaje upotrebom trodimenzionalnog modela je 0.58%). Dodatno, predloženim trodimenzionalnim modelom se mogu predvideti i viši rezonantni modovi sa zadovoljavajućom tačnošću, što nije slučaj kod primene jednodimenzionalnih modela pretvarača.

Karakteristika impedanse pretvarača prikazana na slici 5.2 sadrži pet rezonantnih modova u posmatranom frekvencijskom opsegu. Ne može se sa sigurnošću tvrditi za svaki od navedenih modova da li je određen isključivo jednom dimenzijom sastavnih delova pretvarača, zbog eventualne međusobne sprege oscilacija. Najvažnije je ponašanje najnižih rezonantnih

modova, posebno prvog rezonantnog moda koji je ujedno i radni rezonantni mod pretvarača. U cilju prepoznavanja prirode svakog rezonantnog moda upotrebom predloženog trodimenzionalnog modela, izvršena je analiza promene ulazne električne impedanse kompozitnog pretvarača_1 preko uticaja dimenzija svih njegovih sastavnih delova, kao i uticaja akustičkog opterećenja na svim spoljašnjim površinama.

U nastavku disertacije prikazana je analiza zavisnosti ulazne električne impedanse od dimenzija u debljinskom i radijalnom pravcu za realizovani kompozitni pretvarač_1.

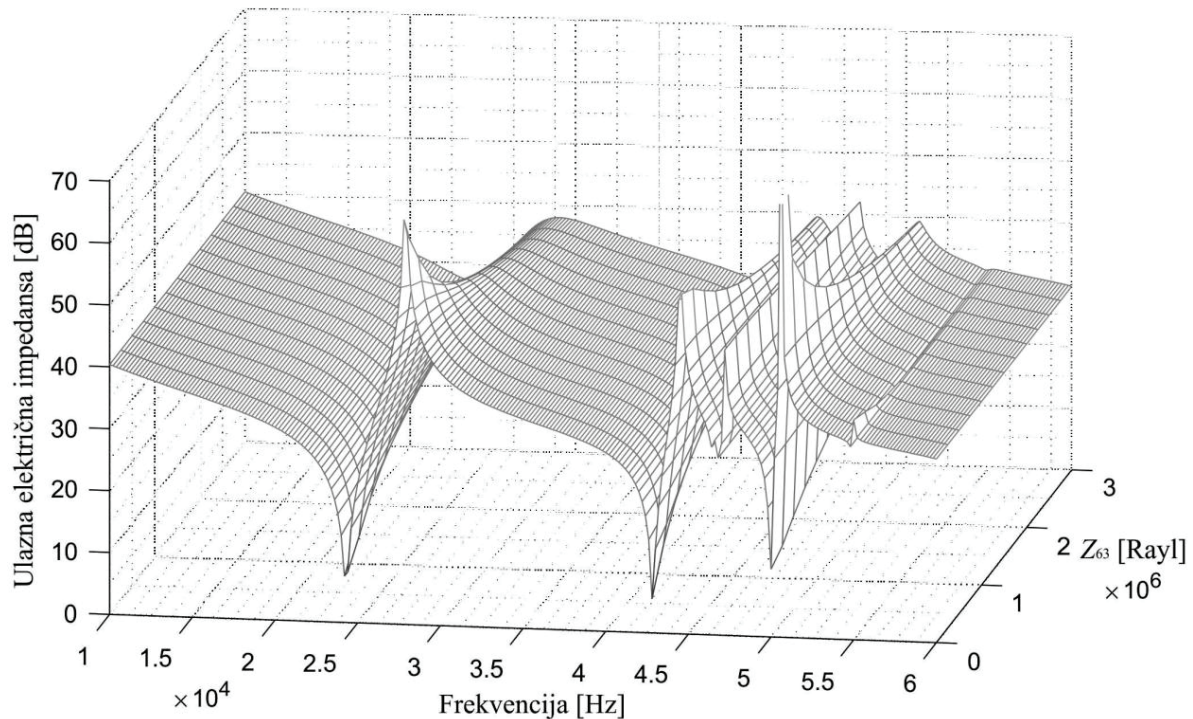
Najpre je na slici 5.3 prikazana zavisnost ulazne električne impedanse kompozitnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i debljine (dužine) dela emitora koji ne dodiruje centralni zavrtnaj ($2L_6$). Pri malom povećanju debljine emitora dolazi do smanjenja frekvencija prvog i drugog rezonantnog moda, dok frekvencije trećeg i četvrtog rezonantnog moda ne zavise od ove promene. Na peti rezonantni mod postoji uticaj povećanja debljine emitora u vidu blagog smanjenja frekvencija.



Slika 5.3. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i debljine dela emitora ($2L_6$)

Slična analiza može biti sprovedena ukoliko se na radni kraj emitora (njegova kružno-prstenasta površina) priključe različita akustička opterećenja. Karakteristika ulazne električne impedanse kompozitnog pretvarača_1 u tom slučaju prikazana je na slici 5.4. Rezultati

primene predloženog trodimenzionalnog modela ukazuju da prvi, drugi, četvrti i peti rezonantni mod zavise od promena akustičkog opterećenja emitora, dok treći rezonantni mod ne zavisi od ovih promena.

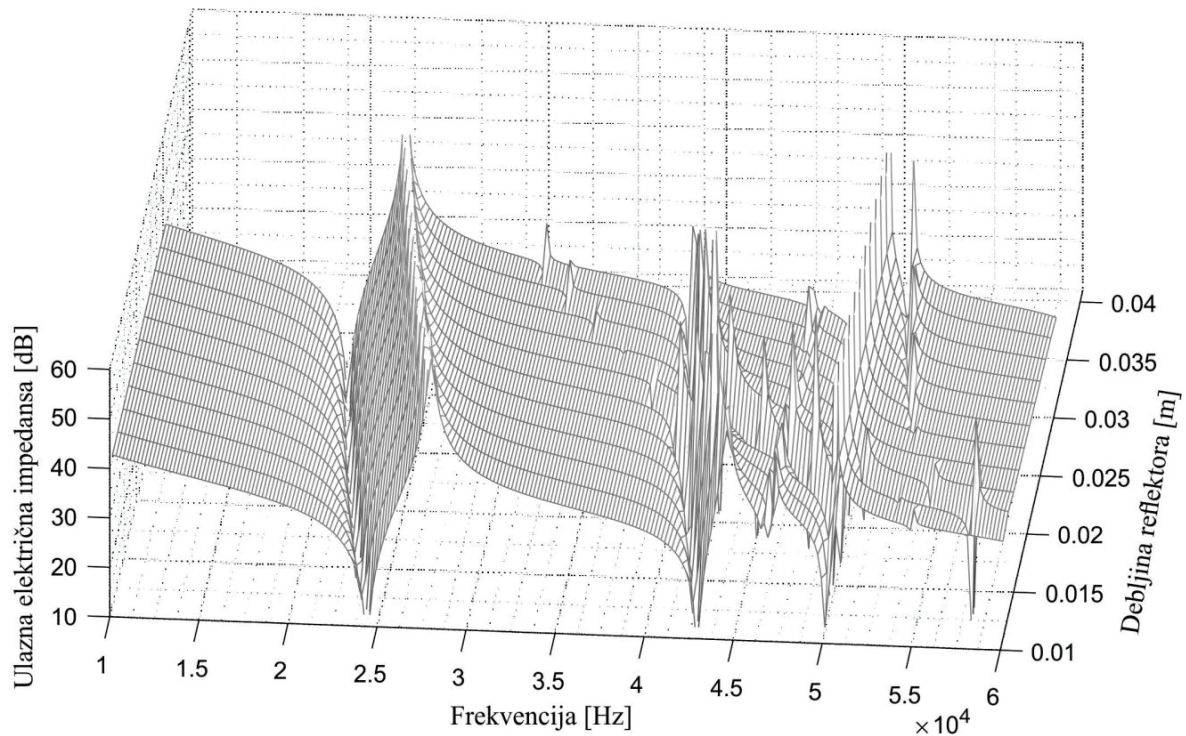


Slika 5.4. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja Z_{63} na radnoj površini emitora

Na slici 5.5 prikazana je zavisnost ulazne električne impedanse kompozitnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i debljine reflektora. Pri povećanju debljine reflektora dolazi do smanjenja frekvencija prvog, drugog, a naročito petog rezonantnog moda, dok frekvencije trećeg i četvrtog rezonantnog moda ne zavise od ove promene. Pri velikim debljinama reflektora, frekvencije petog rezonantnog moda postaju bliske frekvencijama četvrtog moda. Sa porastom debljine reflektora u posmatranom opsegu javlja se i šesti rezonantni mod, čije se frekvencije pri velikim debljinama reflektora toliko smanjuju da se šesti mod približava prvom rezonantnom modu. U praktičnim primenama pretvarača nije poželjno prisustvo modova koji se nalaze u blizini osnovnog rezonantnog moda. Prisustvo nepoželjnih modova u blizini radne frekvencije može značajno uticati na kvalitet rada pretvarača, npr. kod ultrazvučnog čišćenja ili zavarivanja [67].

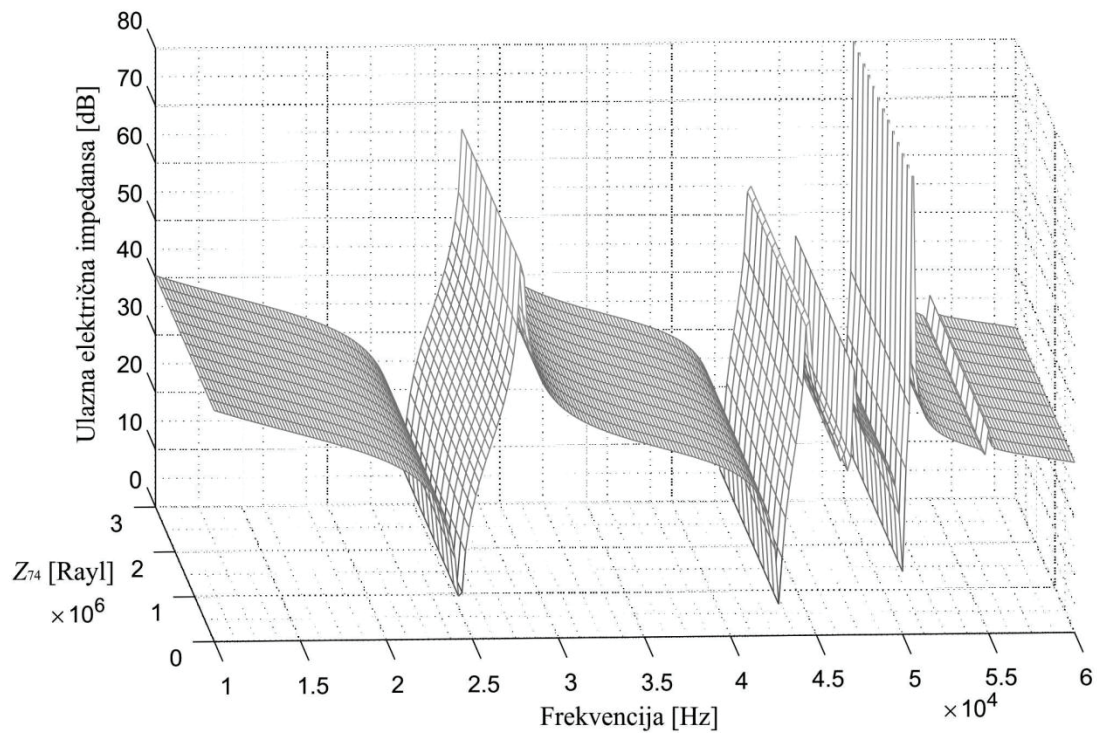
Na slici 5.6 prikazana je karakteristika ulazne električne impedanse kompozitnog pretvarača_1 u slučaju kada se na kružno-prstenastoj površini reflektora priključuju različita

akustička opterećenja. U ovom slučaju se može uočiti da akustičko opterećenje na kružno-prstenastoj površini reflektora, suprotnoj od površine zračenja ultrazvučnih talasa u radnu sredinu, ne utiče ni na jedan mod u posmatranom frekvencijskom opsegu. Na osnovu posmatrane karakteristike se može zaključiti da se pri upotrebi bilo koje aksijalne sile na posmatranoj površini ponašanje kompozitnog pretvarača u radnom režimu neće promeniti.

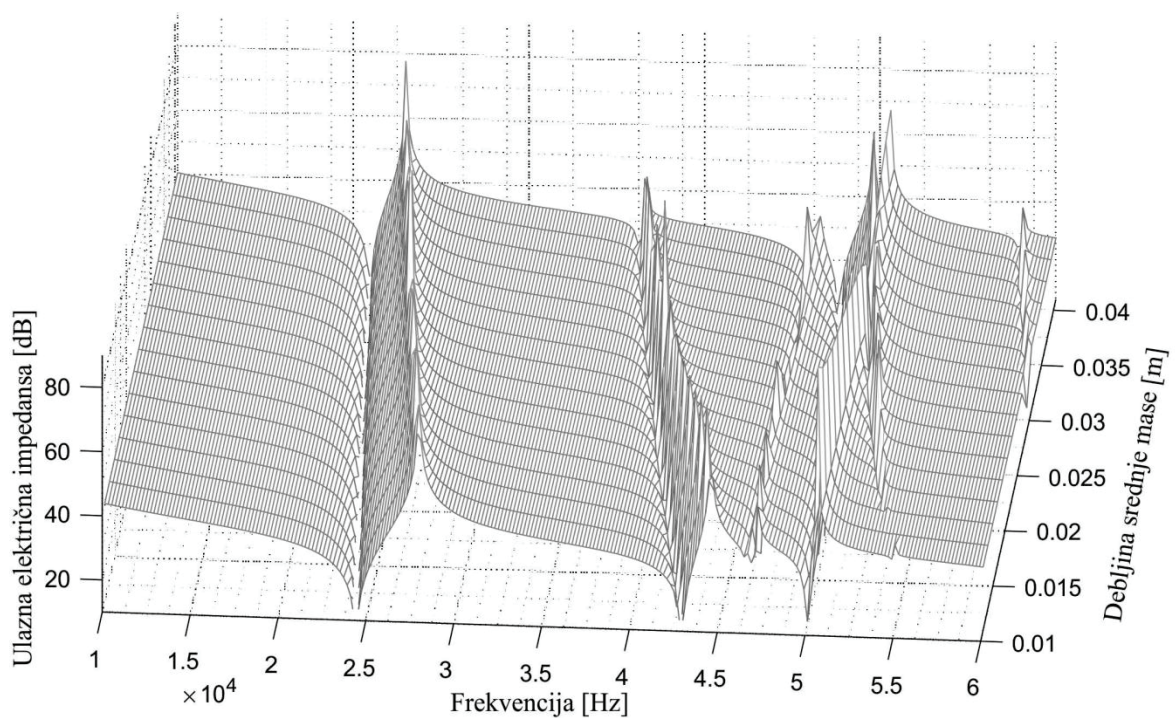


Slika 5.5. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i debljine reflektora

Na frekvencije prvog, drugog i petog rezonantnog moda značajan uticaj ima debljina srednje mase (slika 5.7). Navedeni uticaj se vidi kroz smanjivanje rezonantnih frekvencija pri porastu debljine srednje mase. Korišćenjem predloženog trodimenzionalnog modela može se zaključiti da se pri porastu debljine srednje mase peti rezonantni mod spušta ka nižim frekvencijama, i izjednačava se sa četvrtim rezonantnim modom pri debljini srednje mase od 35 mm. Daljim povećanjem debljine srednje mase, peti rezonantni mod bi se našao između trećeg i četvrtog rezonantnog moda. Dodatno, na osnovu prikazane karakteristike može se videti da se povećanjem debljine srednje mase smanjuje udaljenost između prvog i drugog rezonantnog moda, što je nepovoljno sa stanovišta pobude pretvarača. Na frekvencije trećeg i četvrtog rezonantnog moda pomenute dimenzije nemaju uticaj.



Slika 5.6. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja Z_{74} na kružno-prstenastoj površini reflektora



Slika 5.7. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i debljine srednje mase

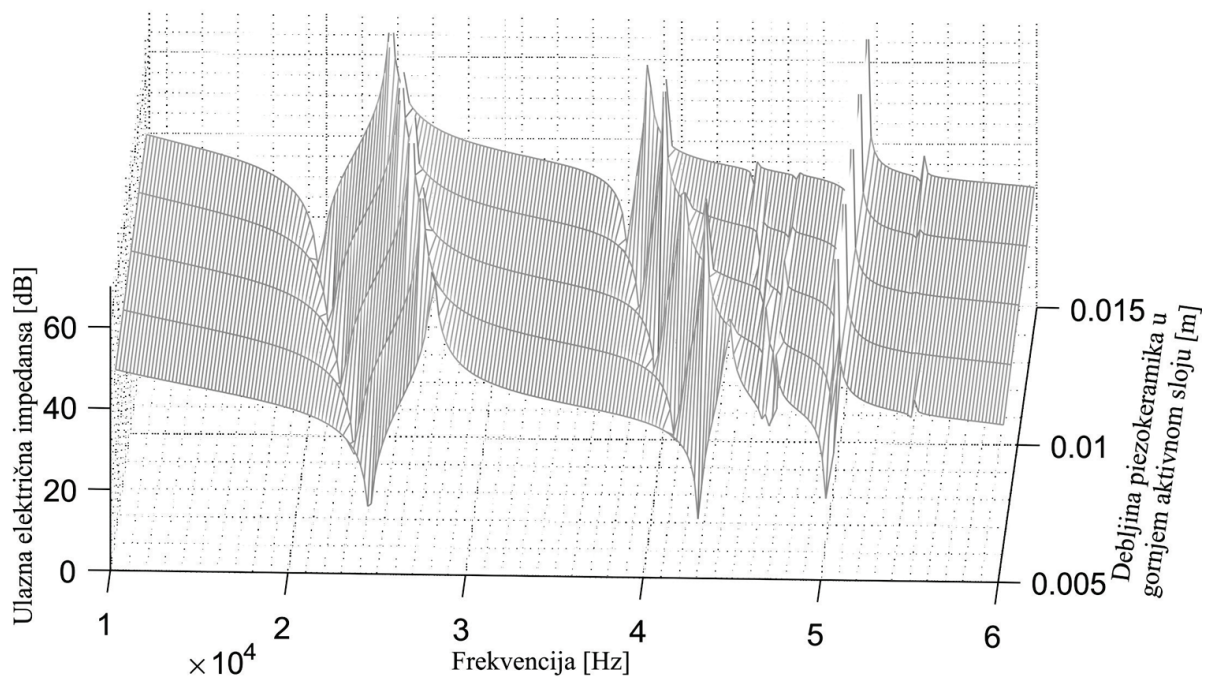
Na karakteristike kompozitnih ultrazvučnih pretvarača može se najviše uticati preko izbora karakteristika i dimenzija metalnih nastavaka. Pri tome, podrazumeva se da će u procesu projektovanja biti korišćeni dostupni piezokeramički prstenovi sa unapred definisanim karakteristikama i dimenzijama koje predstavljaju konstantu u daljem projektovanju [67].

Način na koji upotreba debljih piezokeramičkih prstenova utiče na karakteristike analiziranog kompozitnog pretvarača_1 prikazan je na slikama 5.8 i 5.9. Sa slika se jasno vidi da debljina piezokeramike ima veliki uticaj na frekvencije prvog i drugog rezonantnog moda. Na treći rezonantni mod imaju uticaj samo debljine piezokeramičkih prstenova koji se nalaze u gornjem aktivnom sloju, pri čemu se sa povećanjem debljine posmatrani mod razdvaja na dva rezonantna moda (slika 5.8). Na četvrti rezonantni mod posmatrane promene nemaju uticaj. Male promene debljine piezokeramičkih prstenova nemaju uticaj na peti rezonantni mod, dok se pri većim debljinama frekvencije petog moda približavaju četvrtom rezonantnom modu.

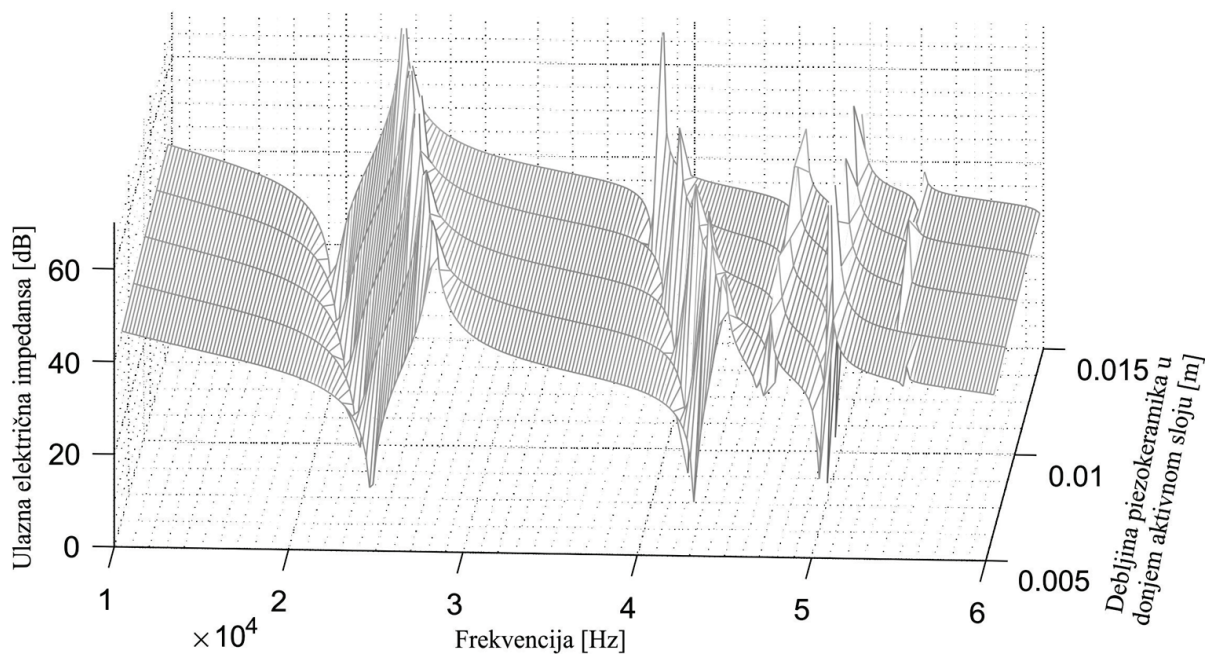
U svim prethodnim analizama uticaja promena dimenzija u debljinskom pravcu na ulaznu električnu impedansu, uzimane su u obzir i promene odgovarajućih delova centralnih zavrtnja.

U nastavku disertacije su analizirani uticaji promena dimenzija svih sastavnih delova pretvarača_1 u radijalnom pravcu na ulaznu električnu impedansu. Na slici 5.10 prikazane su promene ulazne impedanse u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika emitora. Pri porastu spoljašnjeg prečnika emitora rezonantne frekvencije prvog moda opadaju, dok rezonantne frekvencije drugog moda rastu. Prema tome, prvi i drugi mod se međusobno udaljavaju, što je povoljno sa stanovišta pobude kompozitnog pretvarača. Uticaj posmatrane dimenzije emitora na prva dva moda je manji pri većim radijalnim dimenzijama emitora, i može se pretpostaviti da je usvojena vrednost spoljašnjeg prečnika emitora od 40 mm optimalna za posmatrani kompozitni pretvarač sa PZT8 keramičkim prstenovima dimenzija $\varnothing 38/\varnothing 13/6.35$ mm. Na treći, četvrti i peti rezonantni mod promena spoljašnjeg prečnika emitora nema uticaja.

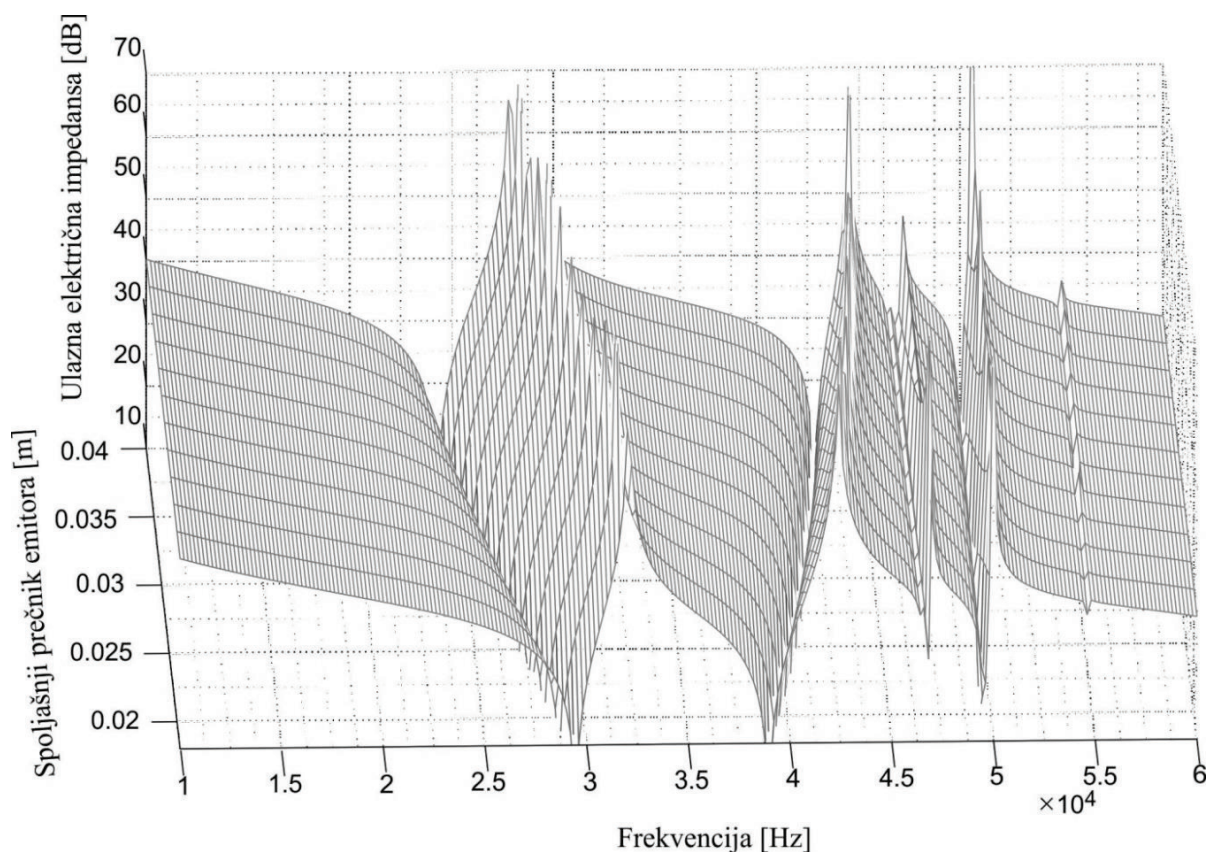
U primenama u kojima postoje radijalna opterećenja na emitoru ili talasovodu poželjna je upotreba pretvarača čije se karakteristike ne menjaju, ili se neznatno menjaju pod uticajem navedenih opterećenja. S obzirom da je potvrđeno da velika mehanička opterećenja na cilindričnoj površini emitora imaju neznatan uticaj samo na drugi i četvrti mod (slika 5.11), realizovani pretvarač_1 pogodan je za navedene primene.



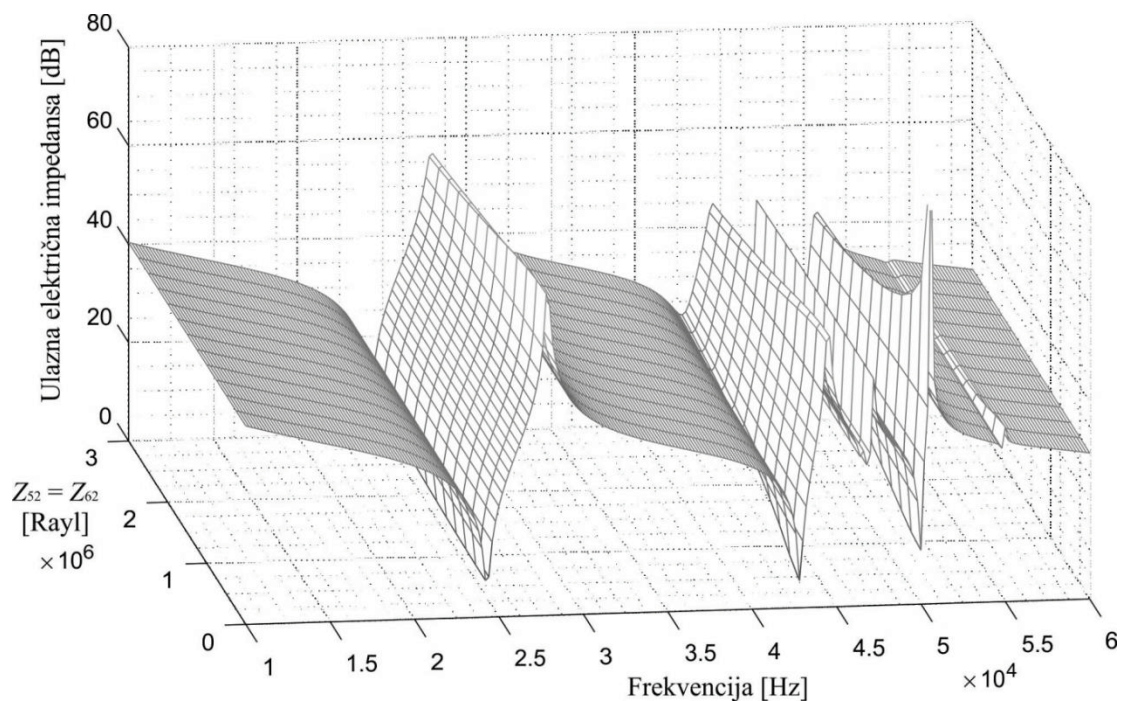
Slika 5.8. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i debljina piezokeramika u gornjem aktivnom sloju



Slika 5.9. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i debljina piezokeramika u donjem aktivnom sloju

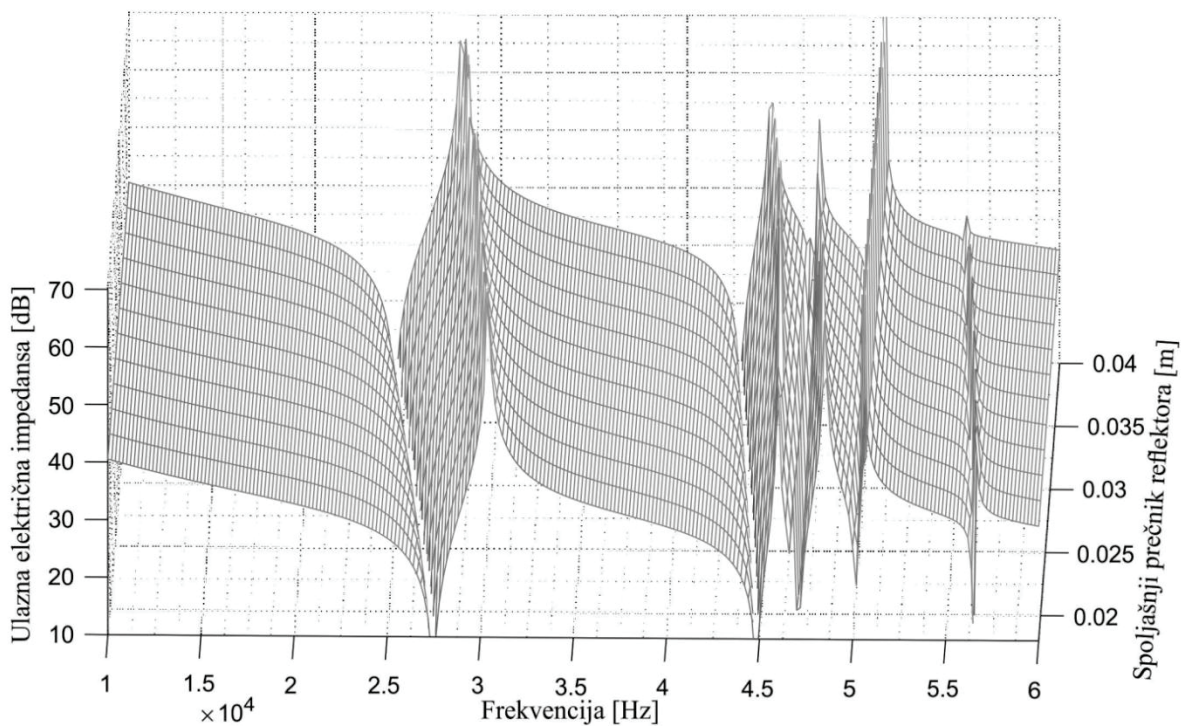


Slika 5.10. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika emitora



Slika 5.11. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini emitora, pri čemu važi da je $Z_{52}=Z_{62}$

Na slici 5.12 je prikazana promena ulazne impedanse u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika reflektora, koji se menja u opsegu od 18 mm do 40 mm. U prikazanom slučaju se rezonantne frekvencije prvog i petog moda smanjuju sa povećanjem spoljašnjeg prečnika reflektora, dok frekvencije drugog, trećeg i četvrtog moda ostaju nepromenjene. Ista karakteristika u slučaju promene opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini reflektora prikazana je na slici 5.13. Promene radijalnih opterećenja reflektora izazivaju blage promene samo petog rezonantnog moda.

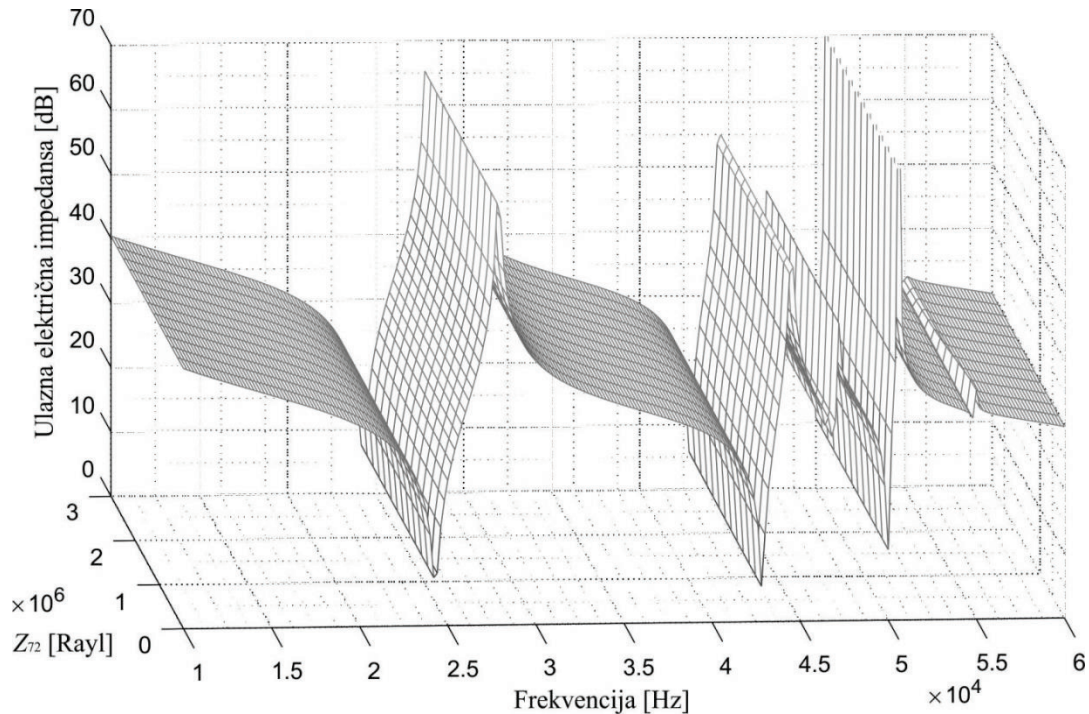


Slika 5.12. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika reflektora

Poslednja dva slučaja prikazana su samo u cilju kompletiranja karakteristika ponašanja pretvarača u funkciji dimenzija reflektora, i nemaju praktičan značaj jer je u svim ultrazvučnim primenama reflektor neopterećen na spoljašnjoj cilindričnoj površini. Takođe, dosadašnje analize uticaja promena dimenzija sastavnih delova pretvarača na ulaznu električnu impedansu pokazuju da karakteristike pretvarača u većoj meri zavise od dimenzija emitora u odnosu na dimenzije reflektora.

Na slici 5.14 prikazana je zavisnost ulazne električne impedanse pretvarača u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika srednje mase, koji se menja u opsegu od 18 mm do 40 mm. Sa slike se jasno vide promene rezonantnih frekvencija prvog, drugog i petog moda pri

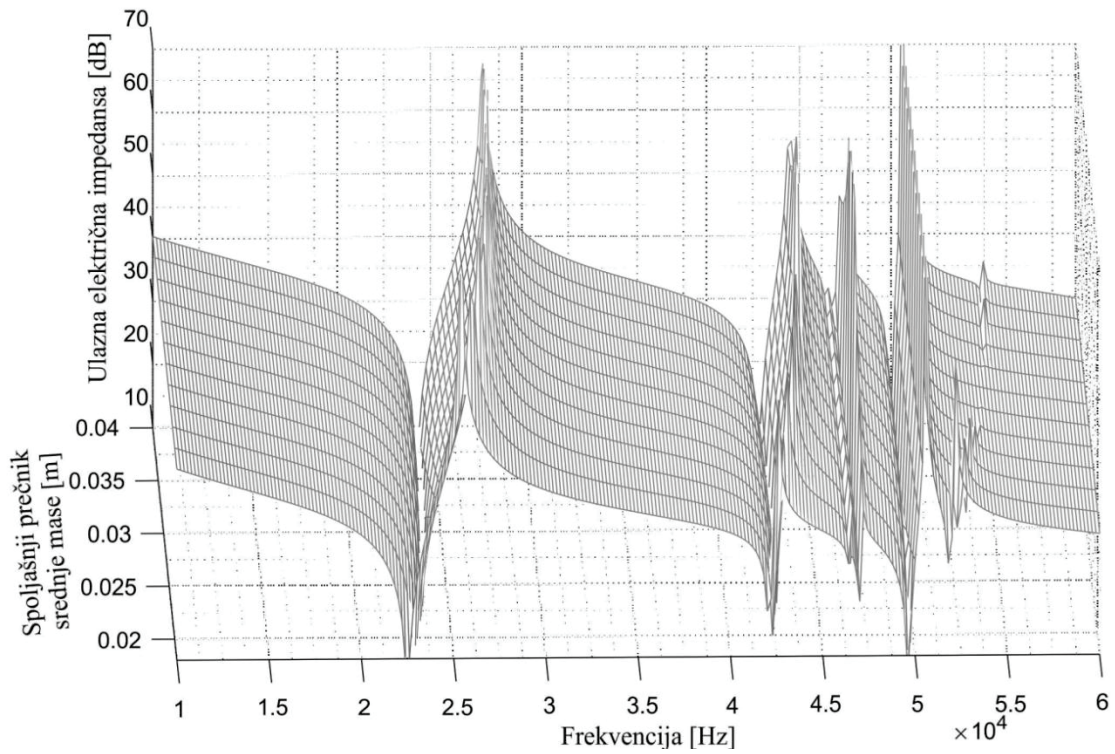
porastu spoljašnjeg prečnika srednje mase. Pri spoljašnjem prečniku srednje mase u opsegu od 32 mm do 40 mm slabi navedeni uticaj, tako da se može zaključiti da dalje promene radijalnih dimenzija srednje mase neće uticati na promenu ni jednog moda.



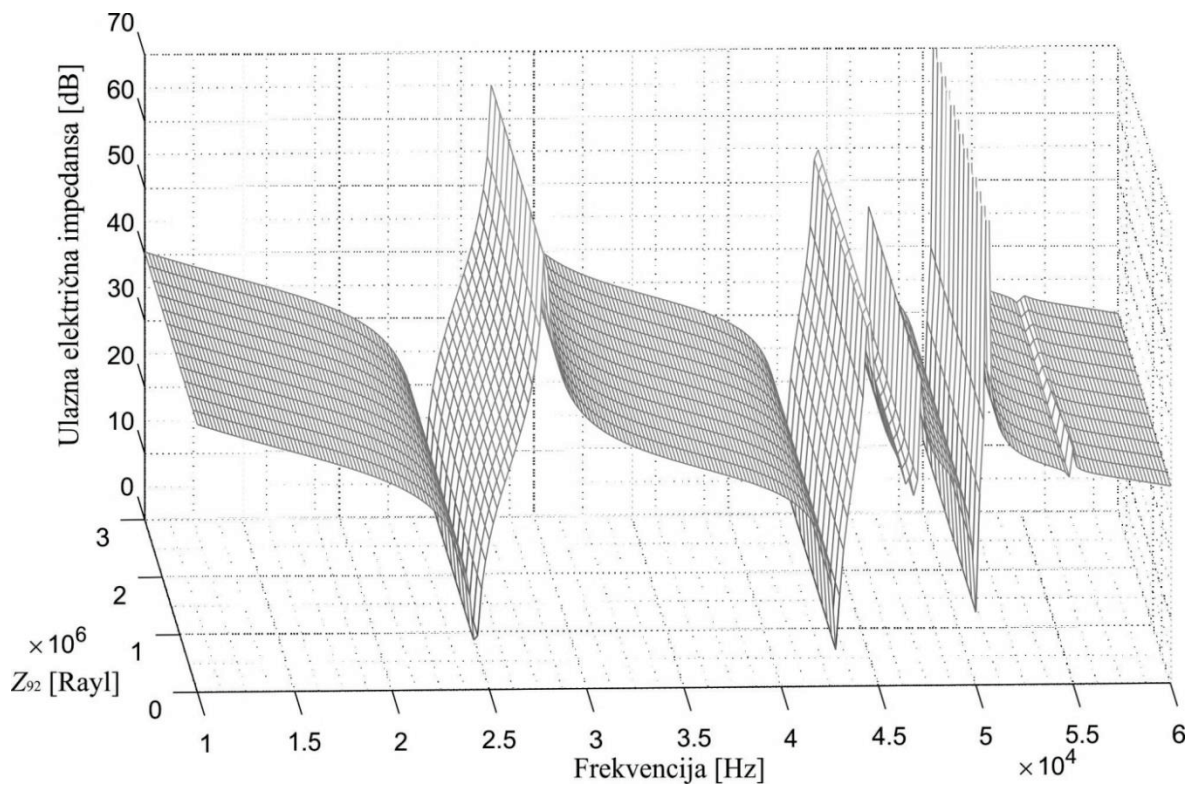
Slika 5.13. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja Z_{72} na spoljašnjoj cilindričnoj površini reflektora

Isti zaključak se može izvesti na osnovu zavisnosti ulazne električne impedanse u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini srednje mase (sa usvojenim spoljašnjim prečnikom od 40 mm), koja je prikazana na slici 5.15. Akustičko opterećenje na posmatranoj površini ima neznatan uticaj samo na peti rezonantni mod. Poslednja analiza pokazuje da je moguće ostvariti pričvršćivanje (fiksiranje) kompozitnog pretvarača u radnim uslovima preko spoljašnje cilindrične površine srednje mase, uz zanemarljive promene rezonantnih frekvencija posmatranih modova.

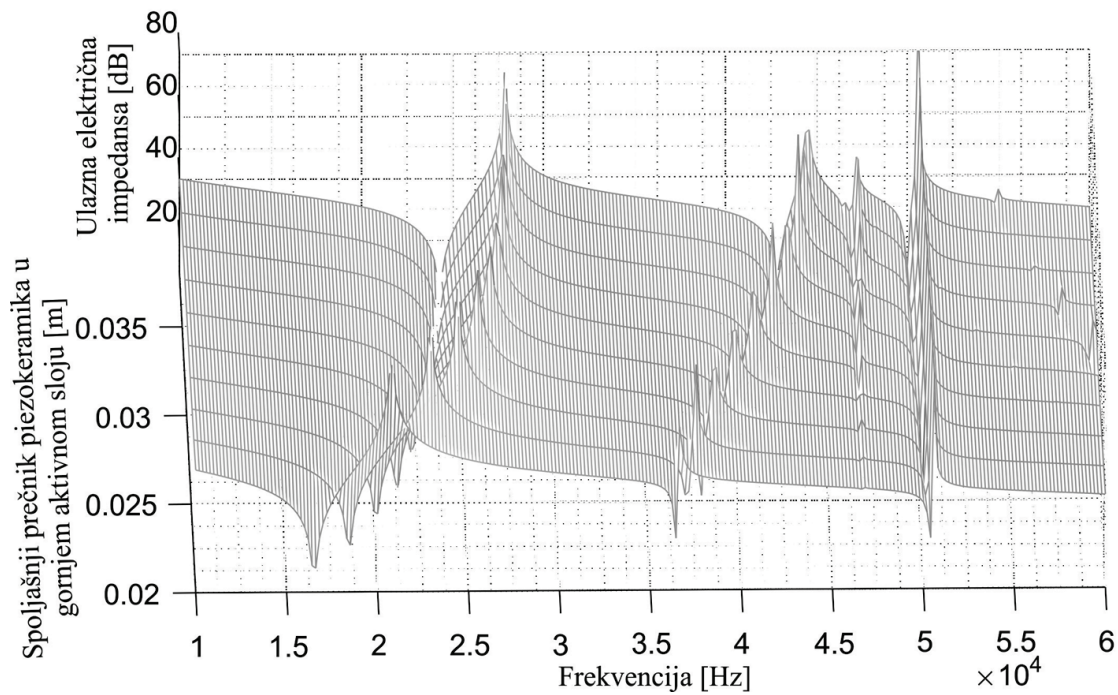
Na slikama 5.16 i 5.17 prikazane su zavisnosti ulazne električne impedanse posmatranog pretvarača u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika piezokeramika u gornjem i donjem aktivnom sloju, respektivno. Posmatrane promene kod keramika u gornjem aktivnom sloju ne utiču na frekvencije trećeg i četvrtog rezonantnog moda, dok promene kod keramika u donjem aktivnom sloju veoma utiču na četvrti rezonantni mod. Dodatno, kada su analizirane radijalne dimenzije bliske dimenzijama izabrane keramike (spoljašnji prečnik je 38 mm), ne postoji uticaj na frekvencije prvog i drugog rezonantnog moda.



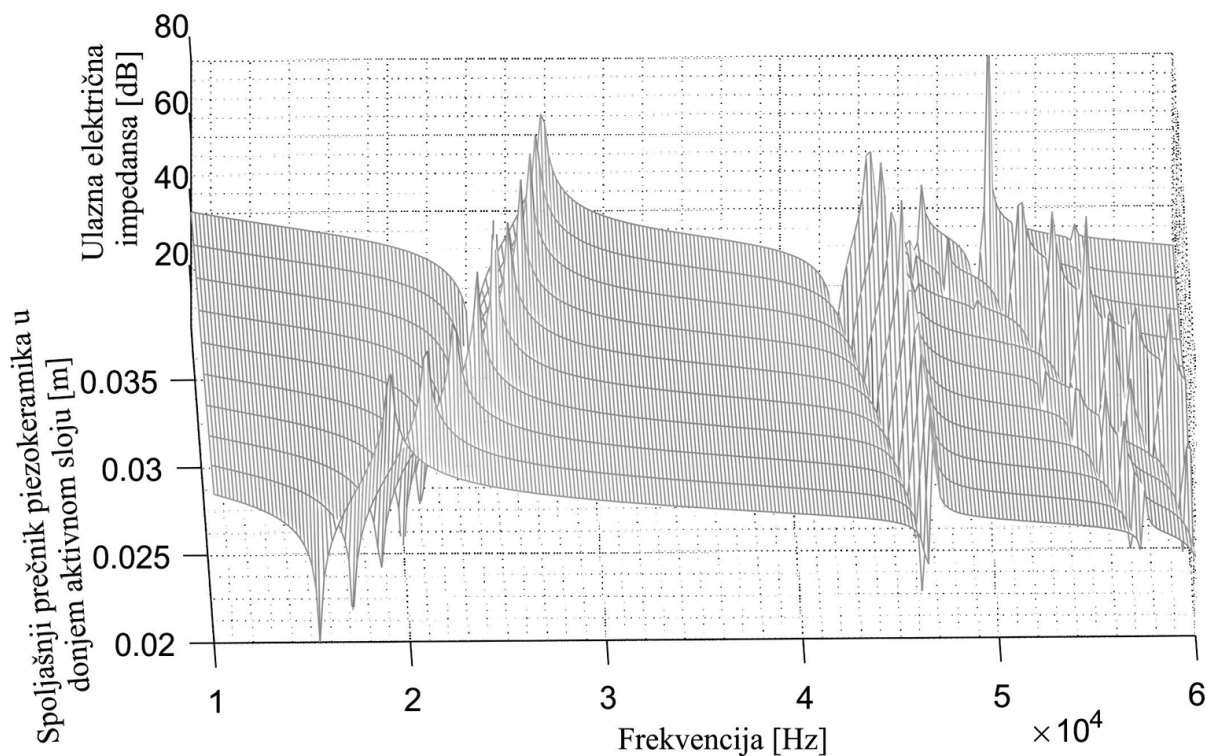
Slika 5.14. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika srednje mase



Slika 5.15. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja Z_{92} na spoljašnjoj cilindričnoj površini srednje mase



Slika 5.16. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika piezokeramika u gornjem aktivnom sloju



Slika 5.17. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_1 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika piezokeramika u donjem aktivnom sloju

Rezonantni modovi zavise od sprege više pojedinačnih modova. Dakle, rezonantni modovi istovremeno zavise od više dimenzija, gde se iz prethodne analize može uočiti koje dimenzije sastavnih delova kompozitnog pretvarača_1 najviše utiču na posmatrani rezonantni mod.

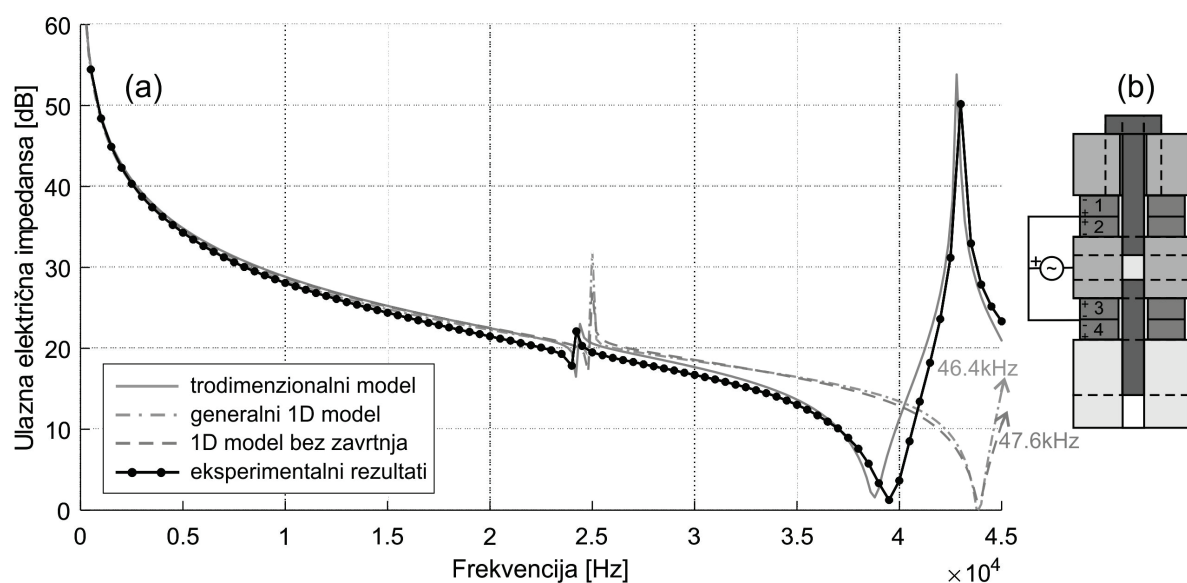
Na osnovni rezonantni mod najviše utiču promene debljina srednje mase, emitora i svih piezokeramičkih prstenova. Takođe, na ovaj mod u manjoj meri utiče i promena debljine reflektora, kao i promena dimenzija reflektora i emitora u radijalnom pravcu. Drugi rezonantni mod je takođe debljinski, ali je u jakoj sprezi sa trećim rezonantnim modom. Najveći uticaj na frekvencije drugog rezonantnog moda imaju promene dimenzija svih piezokeramičkih prstenova, i to u svim pravcima. Na treći mod, pored dimenzija piezokeramičkih prstenova u gornjem aktivnom sloju, veliki uticaj imaju radijalne promene dimenzija piezokeramičkih prstenova u donjem aktivnom sloju. Ovim je potvrđena analiza rezultata prikazanih na slici 5.2 koja je sprovedena pomoću jednodimenzionalne teorije. Jednodimenzionalnom teorijom uzeti su u obzir samo debljinski rezonantni modovi i napravljena su velika odstupanja u predikciji frekvencija spregnutih rezonantnih modova. S obzirom da na četvrti rezonantni mod jedino imaju uticaj promene spoljašnjih prečnika piezokeramičkih prstenova u donjem aktivnom sloju, može se zaključiti da je četvrti mod čisto radijalni mod. U prethodnoj analizi dokazano je da na peti mod prvenstveno imaju uticaj dimenzije srednje mase (i radijalne i debljinske), kao i radijalne dimenzije piezokeramičkih prstenova u gornjem aktivnom sloju. Iz toga sledi da peti rezonantni mod takođe zavisi od međusobne sprege radijalnih i debljinskih modova. Takođe, analizom uticaja promena akustičkih opterećenja na spoljašnjim površinama pretvarača_1 na promene ulazne električne impedanse potvrđeni su prethodno navedeni zaključci.

Na slikama 5.18 - 5.22 prikazane su mogućnosti predloženih modela izračunavanjem frekvencijskog spektra kompozitnog pretvarača_1 sa različitim električnim povezivanjima. Takođe, prikazana je i karakteristika zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije dobijena eksperimentalnim merenjima. Na slikama su prikazana samo prva dva debljinska moda važna sa praktičnog aspekta pobude, pri čemu se kompozitni pretvarač povezan kao na slici 5.18(b) pri radu pobuđuje na frekvenciji drugog rezonantnog moda. Za ostala prikazana električna povezivanja najbolje je pobudni generator podesiti na frekvenciju osnovnog moda.

Na slici 5.18(a) prikazane su zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije realizovanog pretvarača_1 električno povezanog kao na slici 5.18(b). Rezonantne i antirezonantne frekvencije prvog moda pretvarača_1 su 24 kHz i 24.22 kHz, odnosno

39.5 kHz i 43 kHz za drugi mod, respektivno. Predloženim jednodimenzionalnim modelima dobijene su iste rezonantne frekvencije: 24.8 kHz (prvi mod) i 43.8 kHz (drugi mod), dok se u slučaju antirezonantne frekvencije drugog moda predloženi generalni jednodimenzionalni model pokazao kao bolji.

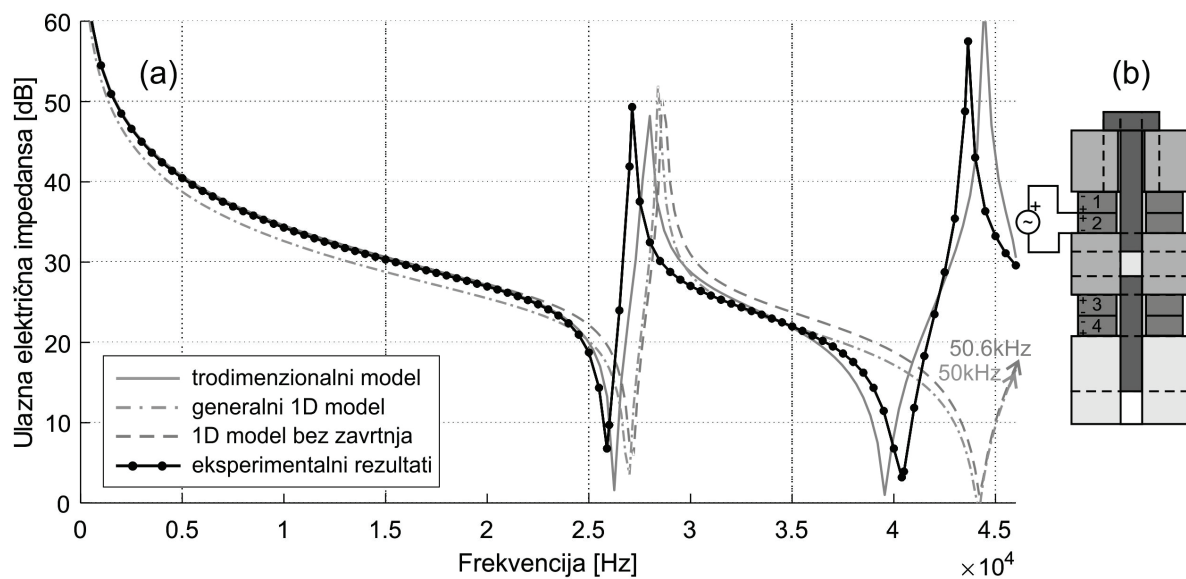
Trodimenzionalnim modelom se dobijaju precizniji rezultati pri modelovanju ulazne električne impedanse u odnosu na rezultate dobijene jednodimenzionalnim modelima (slika 5.18). Modelovane rezonantne i antirezonantne frekvencije prvog moda su 24.2 kHz i 24.4 kHz, odnosno 38.8 kHz i 42.8 kHz kod drugog moda, respektivno.



Slika 5.18. (a) Ulazna električna impedansa u funkciji frekvencije za kompozitni ultrazvučni pretvarač_1 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima, električno povezan kao na slici (b)

Na slici 5.19 prikazane su karakteristike zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije za kompozitni pretvarač_1 dobijene modelovanjem i merenjem. Izmerena rezonantna frekvencija osnovnog moda pretvarača je 25.89 kHz. Predloženim generalnim jednodimenzionalnim modelom dobijena je rezonantna frekvencija osnovnog moda 26.95 kHz, tako da je izračunata greška u odnosu na merenu rezonantnu frekvenciju 4.09%. U slučaju upotrebe modela koji ne uzima u obzir uticaj zavrtnja, rezonantna frekvencija je 27.15 kHz, sa greškom od 4.87%. Greške koje prave predloženi jednodimenzionalni modeli pri predviđanju rezonantne frekvencije drugog moda u odnosu na izmerenu vrednost od 40.39 kHz su 9.31% za generalni jednodimenzionalni model, i 9.56% za model bez zavrtnja.

Izračunate rezonantne frekvencije predloženim trodimenzionalnim modelom za prvi i drugi mod su 26.25 kHz i 39.55 kHz, dok greške koje se prave u odnosu na merene rezultate iznose 1.39% i 2.08%, respektivno. Predloženim trodimenzionalnim modelom se prave zanemarljivo male greške u odnosu na eksperimentalne rezultate, kako za prvi, tako i za drugi rezonantni mod. Dakle, velika prednost trodimenzionalnog modela, u odnosu na modele koji se oslanjaju na jednodimenzionalnu teoriju, u ovom slučaju se ogleda u dobrom predviđanju drugog moda koji je takođe debljinski.

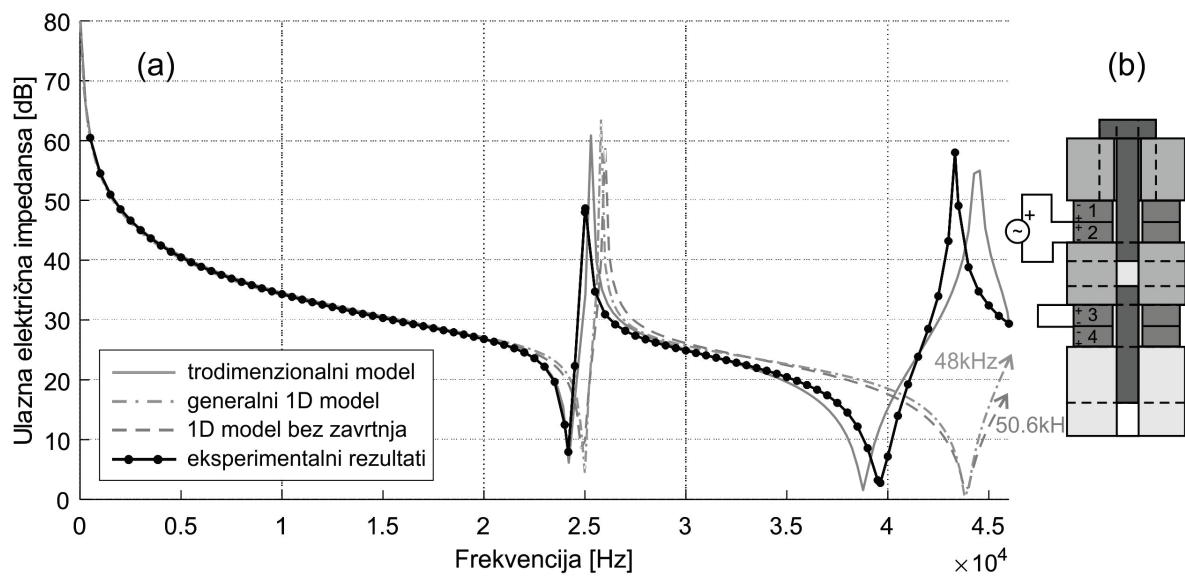


Slika 5.19. (a) Ulazna električna impedansa u funkciji frekvencije za kompozitni ultrazvučni pretvarač_1 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima, električno povezan kao na slici (b)

Na slici 5.20(a) prikazane su zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije realizovanog kompozitnog pretvarača_1, električno povezanog kao na slici 5.20(b). Rezonantne frekvencije prvog i drugog moda realizovanog pretvarača su 24.18 kHz i 39.63 kHz, respektivno. Predloženim jednodimenzionalnim modelima dobijene su iste rezonantne frekvencije za prvi i drugi mod: 24.95 kHz i 43.9 kHz, sa greškama od 3.18% i 10.77%, respektivno. Za predviđanje antirezonantnih frekvencija oba moda se predloženi generalni jednodimenzionalni model pokazao kao bolji.

Rezonantna frekvencija prvog moda realizovanog pretvarača_1 dobijena trodimenzionalnim modelom jednaka je izmerenoj, dok je rezonantna frekvencija drugog moda 38.78 kHz, tako da je greška pri predviđanju posmatranog moda 2.14%. Uticaj kratkospajanja piezokeramičkog prstena u donjem aktivnom sloju se na slikama 5.19 i 5.20 može uočiti iz

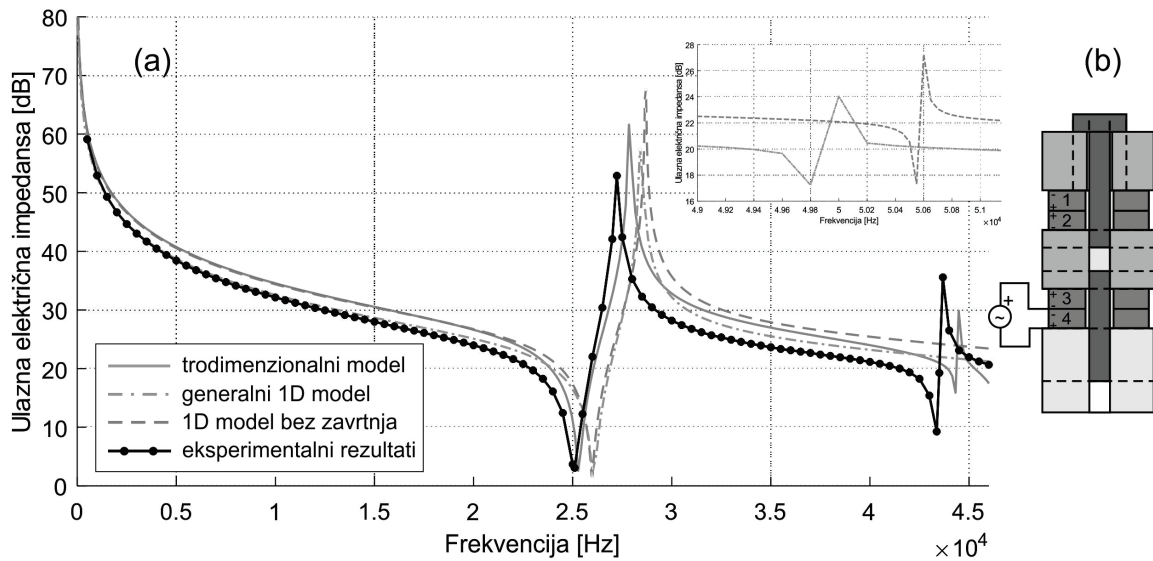
pomeranja rezonantnih frekvencija oba debljinska moda ka nižim frekvencijama. Kratkospojnikom implementiranim kao na slici 5.20(b), u ovakvoj strukturi kompozitnog pretvarača bez postavljenih izolatora na elektrodama piezokeramika u donjem aktivnom sloju, ostvaruje se napon jednak nuli bez obzira na piezoelektrični efekat. Piezokeramike se u posmatranom slučaju ponašaju kao pasivni elementi i na taj način se menjaju električni granični uslovi, što uz promene dimenzija pretvarača takođe ima veliki uticaj na debljinske modove.



Slika 5.20. (a) Ulazna električna impedansa u funkciji frekvencije za kompozitni ultrazvučni pretvarač_1 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima, električno povezan kao na slici (b)

Rezonantna frekvencija prvog moda realizovanog kompozitnog pretvarača_1, električno povezanog kao na slici 5.21(b) je 25.1 kHz. Predloženim jednodimenzionalnim modelima dobijene su jednake rezonantne frekvencije osnovnog moda 26.05 kHz, sa greškom od 3.78%. Za predviđanje drugog rezonantnog moda oba jednodimenzionalna modela prave veliku grešku i po pitanju frekvencija i po pitanju oblika (modelovani drugi mod ima veoma uzak frekvencijski opseg prikazane karakteristike - izdvojeni deo na slici 5.21(a)).

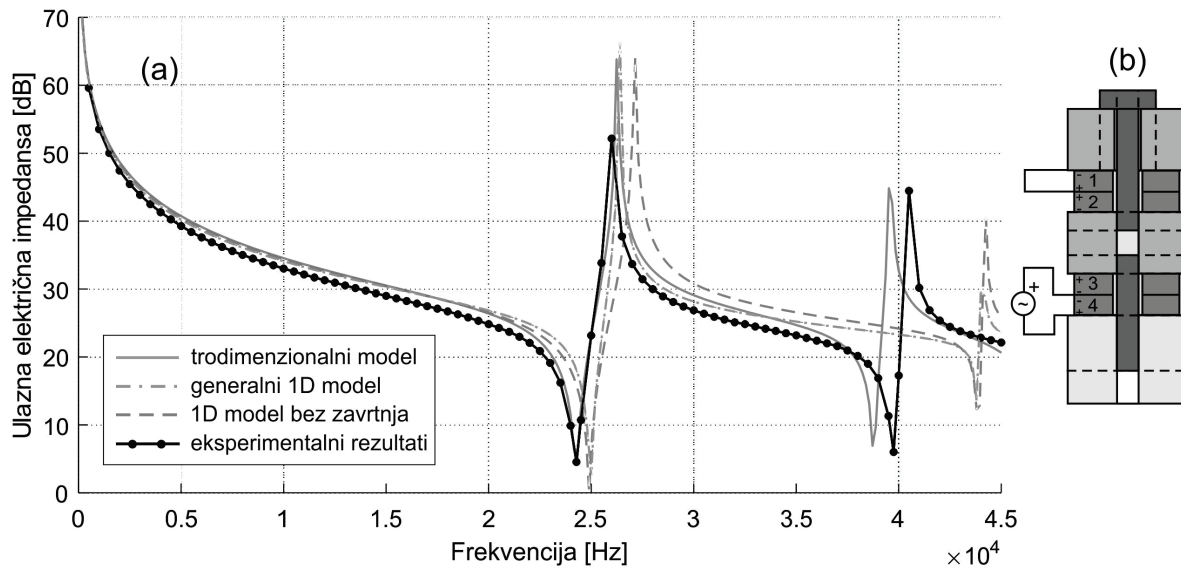
Rezonantna frekvencija osnovnog moda dobijena trodimenzionalnim modelom je veoma bliska izmerenoj i iznosi 25.28kHz, a greška koja se pri tom pravi je 0.72%. Kada je reč o drugom modu, trodimenzionalnim modelom se takođe prave zanemarljive greške u odstupanju modelovanih frekvencija od merenih, u odnosu na modele koji se oslanjaju na jednodimenzionalnu teoriju.



Slika 5.21. (a) Ulazna električna impedansa u funkciji frekvencije za kompozitni ultrazvučni pretvarač_1 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima, električno povezan kao na slici (b)

Na slici 5.22(a) prikazane su karakteristike zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije za kompozitni pretvarač_1, električno povezan kao na slici 5.22(b). Izmerena rezonantna frekvencija osnovnog moda je 24.28 kHz. Predloženim jednodimenzionalnim modelima dobijena je rezonantna frekvencija osnovnog moda 24.95 kHz, tako da je greška u odnosu na merenu rezonantnu frekvenciju 2.76%. Rezonantna frekvencija posmatranog moda dobijena trodimenzionalnim modelom jednaka je izmerenoj. Greška koju prave jednodimenzionalni modeli pri predviđanju rezonantne frekvencije drugog rezonantnog moda, u odnosu na izmerenu vrednost 39.75 kHz, je 10.44%. Predviđanje drugog rezonantnog moda trodimenzionalnim modelom je dosta preciznije, pri čemu modelovana rezonantna frekvencija iznosi 38.72 kHz.

Kada se primeni kratkospojnik kao na slici 5.22(b), napon na elektrodama piezokeramika u gornjem aktivnom sloju jednak je nuli, bez obzira na piezoelektrični efekat koji postoji zbog vibracione energije koju emituje donji aktivni sloj. Piezokeramički prstenovi se i u ovom slučaju ponašaju kao pasivni elementi. S obzirom da na drugi rezonantni mod uticaj imaju promene debljina posmatranih piezokeramičkih prstenova, njihovo kratkospajanje ima manji uticaj na osnovni rezonantni mod u odnosu na drugi rezonantni mod. Sa slike 5.19 - 5.22 se može videti i da je uticaj kratkospajanja piezokeramika u gornjem aktivnom sloju na radni rezonantni mod (slike 5.21 i 5.22) manji od uticaja kratkospajanja piezokeramika u donjem aktivnom sloju (slike 5.19 i 5.20).



Slika 5.22. (a) Ulazna električna impedansa u funkciji frekvencije za kompozitni ultrazvučni pretvarač_1 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima, električno povezan kao na slici (b)

U svim prikazanim slučajevima su modelovane rezonantne frekvencije viših debljinskih modova uz pomoć jednodimenzionalne teorije uglavnom manje od merenih rezonantnih frekvencija. Uzrok tome je prisustvo modova koji nisu obuhvaćeni modelom, odnosno prisustvo radijalnih rezonantnih modova i mogućih ostalih tipova oscilatornih modova, čije se postojanje može uočiti primenom odgovarajuće višedimenzionalne teorije.

Prisustvo rezonantnih modova koji nisu obuhvaćeni jednodimenzionalnom teorijom se najbolje vidi na slici 5.2. Treći i četvrti rezonantni mod u okolini modelovanog drugog moda ne predstavljaju debljinske modove, tako da je modelovana zavisnost drugog debljinskog moda na višim frekvencijama od merene zavisnosti. Postojanje radijalnih modova, kao i sprege debljinskih i radijalnih modova u prikazanim slučajevima, može se najbolje uočiti korišćenjem predloženog trodimenzionalnog modela.

5.2 Analiza kompozitnih pretvarača tipa B

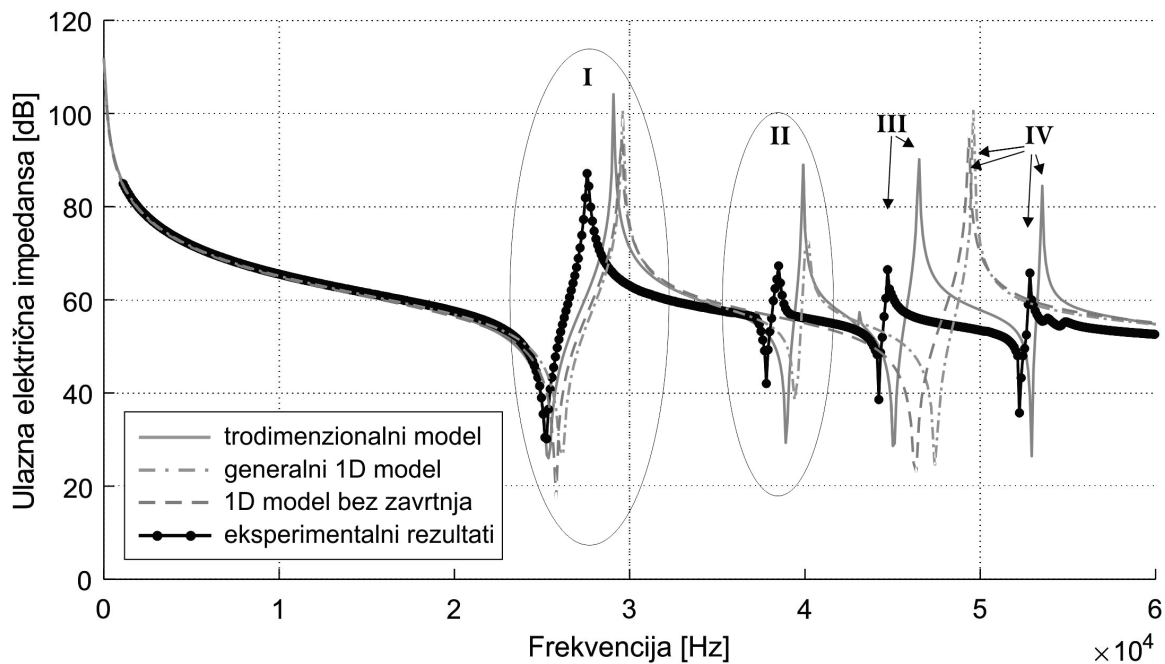
U nastavku ove disertacije verifikacija predloženih modela izvršena je modelovanjem kompozitnih pretvarača kod kojih srednja masa ne dodiruje centralni zavrtnaj. Dimenzije realizovanih pretvarača sa kompozitnom strukturom tipa B date su u tabeli 5.3.

Na slici 5.23 prikazane su eksperimentalne i modelovane zavisnosti ulazne električne impedanse kompozitnog pretvarača_2 sa karakteristikama materijala prikazanim u tabelama 5.1 i 5.2. Za realizaciju pretvarača_2 korišćeni su PZT4 piezokeramički prstenovi, emitor od duraluminijuma, dok su reflektor, srednja masa i zavrtnaj od čelika. Kompozitni pretvarač je električno povezan na takav način da su svi piezokeramički prstenovi vezani paralelno. Može se videti na slici 5.23 da postoji velika sličnost modelovanih i eksperimentalnih zavisnosti. Oba jednodimenzionalna modela daju zadovoljavajuće rezultate u analizi pretvarača u slučaju osnovnog rezonantnog moda. Izmerena rezonantna frekvencija prvog rezonantnog moda je 25.26 kHz. Dobijena rezonantna frekvencija uz pomoć generalnog jednodimenzionalnog modela je 26.2 kHz, a greška koja se pravi u određivanju ove rezonantne frekvencije je 3.72%. Jednodimenzionalnim modelom koji ne uzima u obzir uticaj zavrtnja dobija se rezonantna frekvencija 25.8 kHz, sa greškom od 2.14%. Analiza viših rezonantnih modova jednodimenzionalnim modelima omogućava predviđanje opšteg oblika četvrtog rezonantnog moda (sa izmerenom rezonantnom frekvencijom 52.23 kHz), uz velika odstupanja rezonantnih frekvencija.

Prilikom projektovanja pretvarača jednodimenzionalnim modelima greške u predviđanju rezonantnih frekvencija osnovnog moda su zanemarljive. Važnije je odgovarajućim modelom predvideti sve debljinske modove, naročito modove bliske radnom modu, koji mogu uticati na ponašanje pretvarača pri radu. Predviđanje svih debljinskih rezonantnih modova u posmatranom frekvencijskom opsegu ostvareno je samo predloženim generalnim jednodimenzionalnim modelom. Na osnovu poređenja dve modelovane karakteristike dobijene jednodimenzionalnim modelima, može se zaključiti da drugi rezonantni mod koji je dobijen samo predloženim generalnim jednodimenzionalnim modelom, potiče od uticaja zavrtnja. Isti zaključak važi i za rezultate prikazane na slikama 5.38 - 5.44.

Takođe, na slici 5.23 prikazana je mogućnost primene trodimenzionalnog modela za

izračunavanje frekvencijskog spektra kompozitnog pretvarača_2. Predloženi trodimenzionalni matrični model sa velikom preciznošću može predvideti rezonantnu frekvenciju osnovnog debljinskog moda od 25.36 kHz (greška koju pravi trodimenzionalni model je 0.4%). Pored toga, predloženim trodimenzionalnim modelom sa visokim stepenom preciznosti mogu se predvideti i svi viši rezonantni modovi, što nije bio slučaj sa prethodno analiziranim jednodimenzionalnim modelima pretvarača.



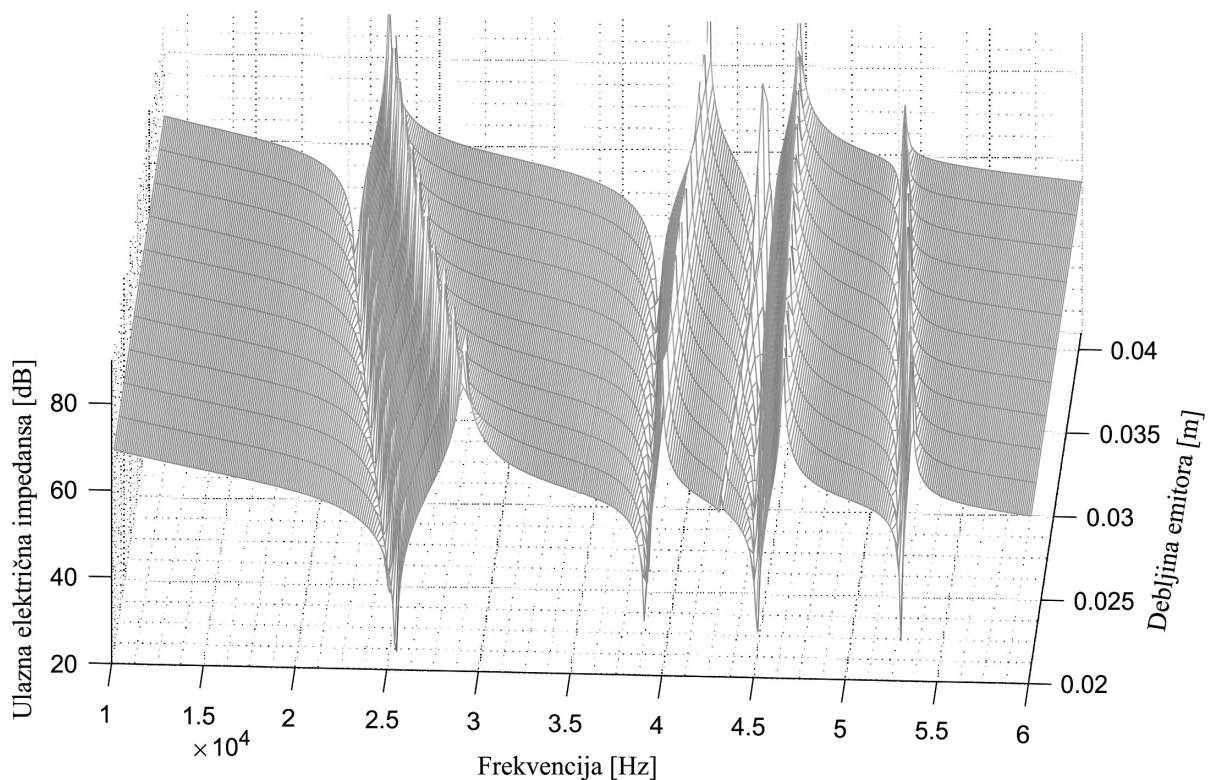
Slika 5.23. Ulazna električna impedansa u funkciji frekvencije za kompozitni ultrazvučni pretvarač_2 sa pobudnim PZT4 piezokeramičkim prstenovima

Karakteristika impedanse pretvarača prikazana na slici 5.23 sadrži četiri rezonantna moda u posmatranom frekvencijskom opsegu. Dosadašnjim analizama potvrđeno je da ponašanje najnižih rezonantnih modova, posebno radnog rezonantnog moda, najviše utiče na ponašanje pretvarača pri radu. Pomoću predloženog trodimenzionalnog modela izvršena je analiza rezonantnih modova kompozitnog pretvarača_2 preko uticaja dimenzija svih njegovih sastavnih delova na promenu ulazne električne impedanse pretvarača. Takođe, izvršena je i analiza uticaja akustičkog opterećenja na svim spoljašnjim površinama na promenu ulazne električne impedanse pretvarača. Iako se na slici 5.23 jasno vidi da su prvi i drugi rezonantni modovi debljinski, pomoću navedene analize moguće je izvršiti identifikaciju prirode svakog rezonantnog moda i može se utvrditi eventualno postojanje sprega između modova. Zavisnosti ulazne električne impedanse od dimenzija sastavnih delova kompozitnog

pretvarača_2 u debljinskom pravcu, kao i zavisnosti od delovanja odgovarajućih akustičnih impedansi, prikazane su na slikama 5.24 - 5.29.

Na slici 5.24 prikazana je zavisnost ulazne električne impedanse kompozitnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i debljine dela emitora koji ne dodiruje centralni zavrtnanj ($2L_6$). Pri malom povećanju debljine emitora dolazi do značajnog smanjenja frekvencija prvog rezonantnog moda, dok se uticaj na četvrti mod ogleda u vidu blagog smanjenja frekvencija. Frekvencije drugog i trećeg rezonantnog moda ne zavise od ove promene. Pri velikim debljinama emitora javlja se još jedan mod između drugog i trećeg rezonantnog moda, što se može negativno odraziti na kvalitet pretvarača.

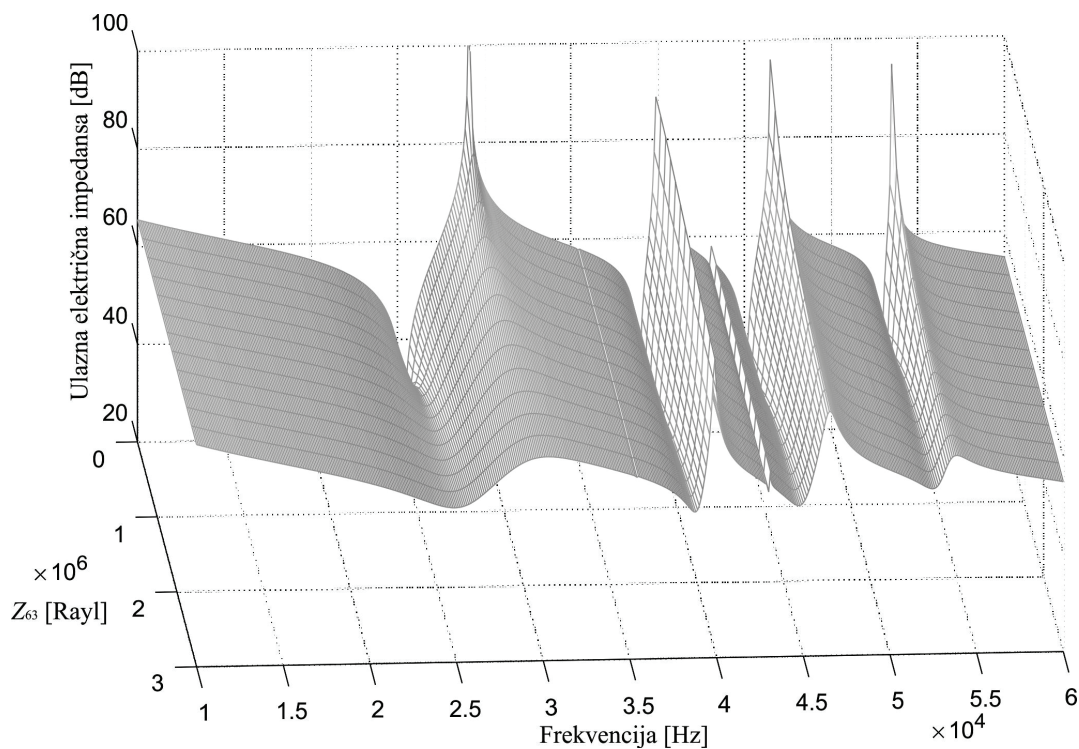
Analizirajući uticaj promena akustičkog opterećenja na radnoj površini emitora na ulaznu električnu impedansu pretvarača_2 (slika 5.25), može se zaključiti da posmatrane promene najviše utiču na prvi i četvrti rezonantni mod, dok na drugi mod nemaju uticaj.



Slika 5.24. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i debljine dela emitora ($2L_6$)

Zavisnost frekvencija rezonantnih modova od promena debljine reflektora (slika 5.24), je manja u odnosu na zavisnost od promena debljine emitora (slika 5.26). Opseg promena debljine reflektora (slika 5.26) veći je od opsega promena debljine emitora (slika 5.24), dok

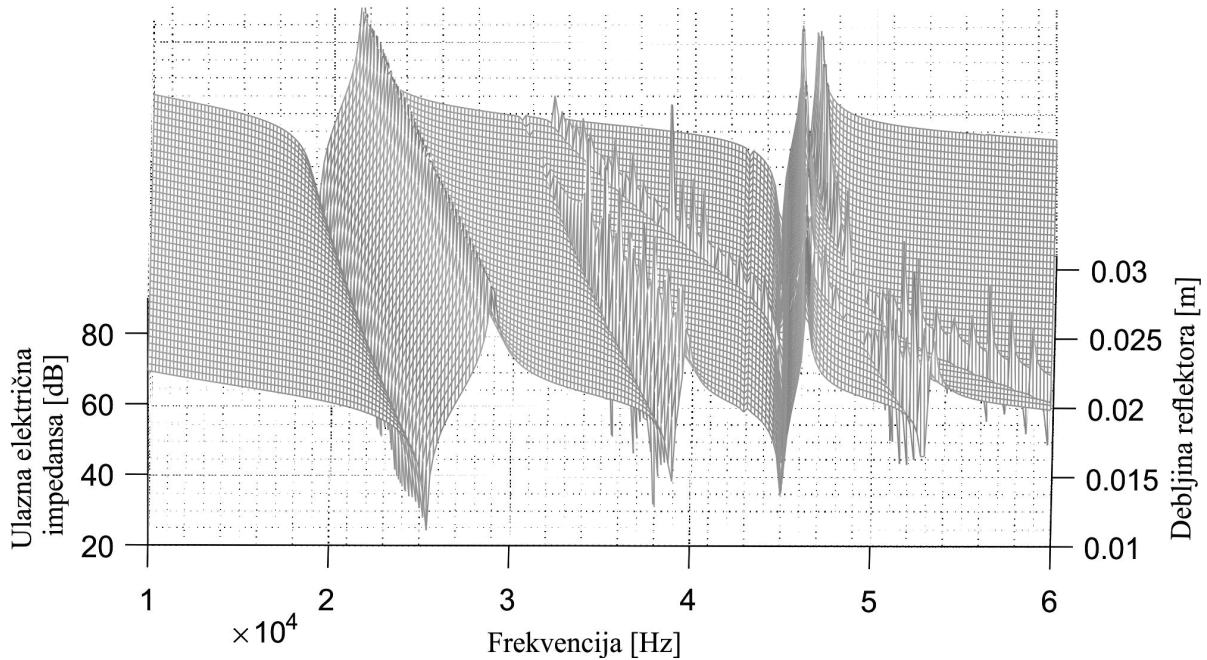
su promene frekvencija prvog rezonantnog moda skoro identične. Takođe, za veće dužine reflektora (duplo veće od početne) znatno se smanjuje zavisnost prvog rezonantnog moda. Posmatrane promene imaju veliki uticaj na četvrti rezonantni mod, čije se frekvencije toliko smanjuju da bi se pri velikim debljinama reflektora četvrti mod našao između prvog i drugog moda. Promene debljine reflektora nemaju uticaj na treći rezonantni mod, dok su promene frekvencija drugog moda zanemarljive. Povećanjem dužine reflektora peti rezonantni mod se približava trećem modu usled sprege sa četvrtim modom. Sa povećanjem debljine reflektora prvi rezonantni mod se udaljava od drugog. Međutim, usled daljeg povećanja debljine reflektora u blizini osnovnog moda pojavljuje se četvrti rezonantni mod, što ima nepovoljan uticaj na kvalitet samog pretvarača.



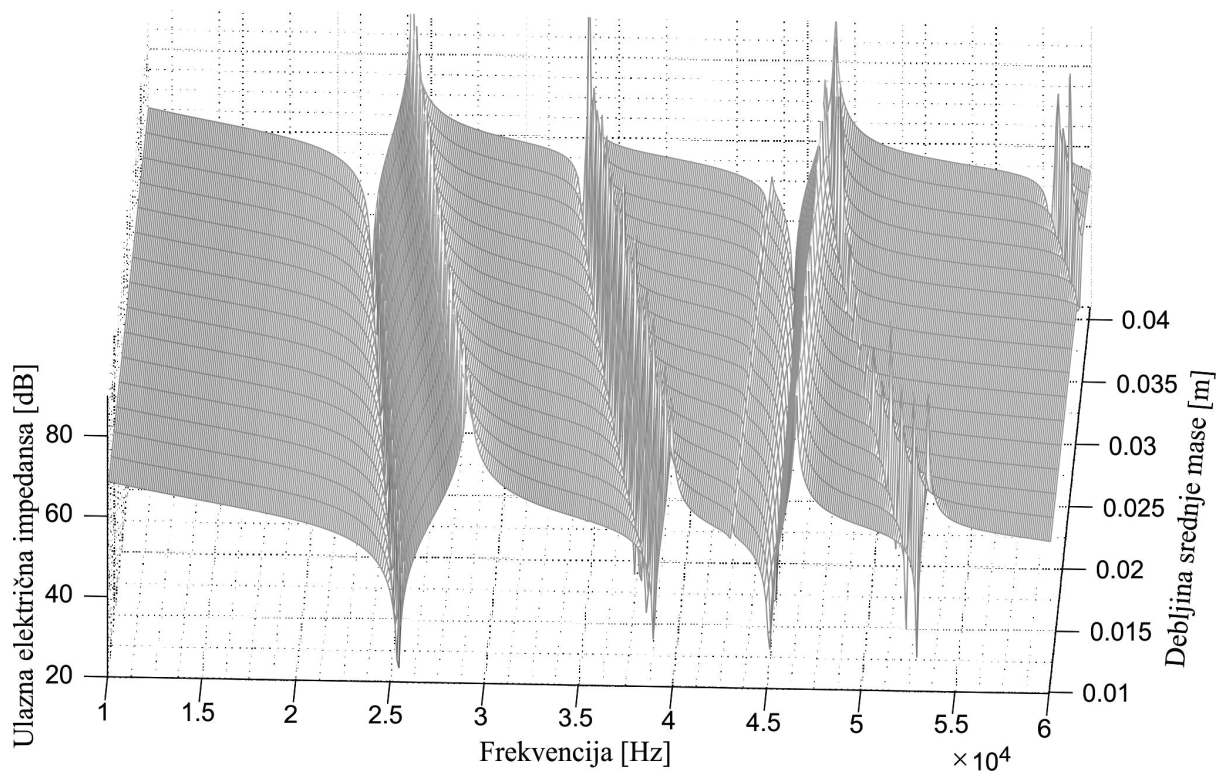
Slika 5.25. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja Z_{63} na kružno-prstenastoj površini emitora

Izražen uticaj na frekvencije prvog, drugog i četvrtog rezonantnog moda imaju promene debljine srednje mase, na taj način što frekvencije opadaju pri porastu debljine srednje mase (slika 5.27). Primenom analize pomoću predloženog trodimenzionalnog modela potvrđuje se uticaj povećanja debljine srednje mase na frekvencije četvrtog rezonantnog moda. Kao posledica navedenog uticaja četvrti rezonantni mod se izjednačava sa trećim rezonantnim modom za debljinu srednje mase od 40 mm. Prateći trend pomeranja četvrtog i petog rezonantnog moda, koji pri velikim debljinama srednje mase ulazi u posmatrani opseg

frekvencija, može se očekivati da bi se sa daljim povećanjem debljine srednje mase četvrti mod našao između drugog i trećeg rezonantnog moda. Na rezonantne frekvencije trećeg moda pomenute dimenzije nemaju uticaj.



Slika 5.26. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i debljine reflektora



Slika 5.27. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i debljine srednje mase

Promene ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i debljine piezokeramika u gornjem i donjem aktivnom sloju prikazane su na slikama 5.28 i 5.29, respektivno. Uočljiv je veliki uticaj debljine piezokeramika na smanjenje frekvencija prvog i četvrtog rezonantnog moda. Pri velikim debljinama nestaje četvrti rezonantni mod, a pojavljuje se novi rezonantni mod između drugog i trećeg moda. Na treći rezonantni mod promene debljina piezokeramika nemaju uticaj.

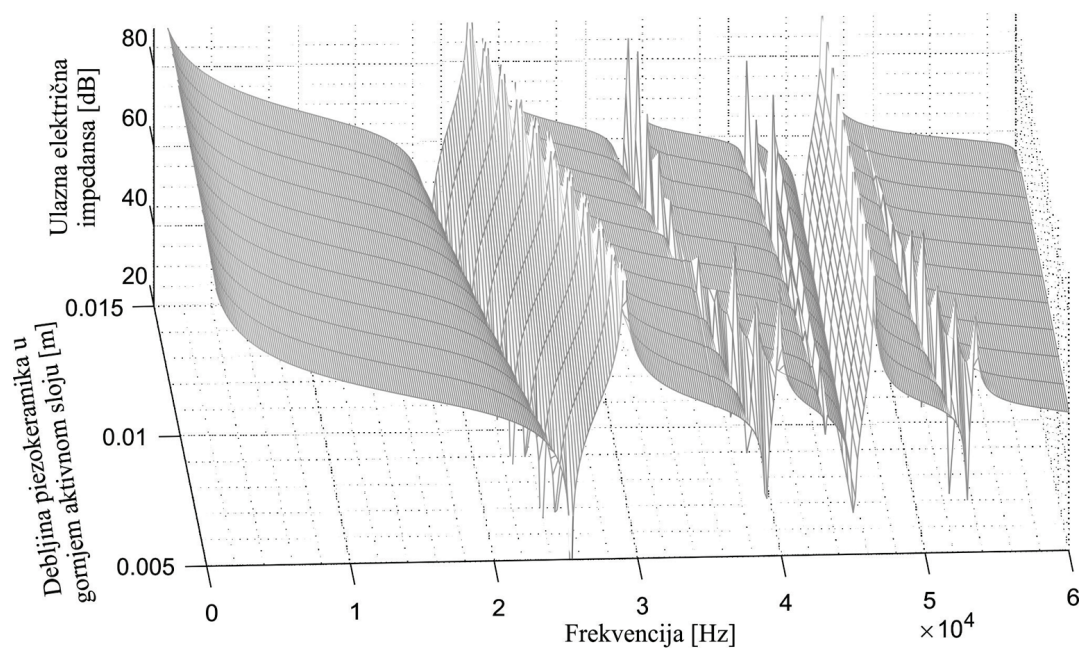
U dosadašnjoj analizi pokazano je da na treći mod ne utiču promene debljina nijednog sastavnog dela pretvarača_2, tako da se sa sigurnošću može tvrditi da treći mod nije debljinski rezonantni mod.

Male promene debljina piezokeramika u gornjem aktivnom sloju utiču na pad frekvencija drugog moda, dok pri velikim debljinama navedene promene nemaju uticaj (slika 5.28). Situacija je obrnuta u slučaju zavisnosti posmatranih karakteristika od promena debljina piezokeramika u donjem aktivnom sloju (slika 5.29). Male promene debljina piezokeramika u donjem aktivnom sloju nemaju uticaja na drugi rezonantni mod, dok se pri velikim debljinama ovih piezokeramika frekvencije drugog rezonantnog moda smanjuju.

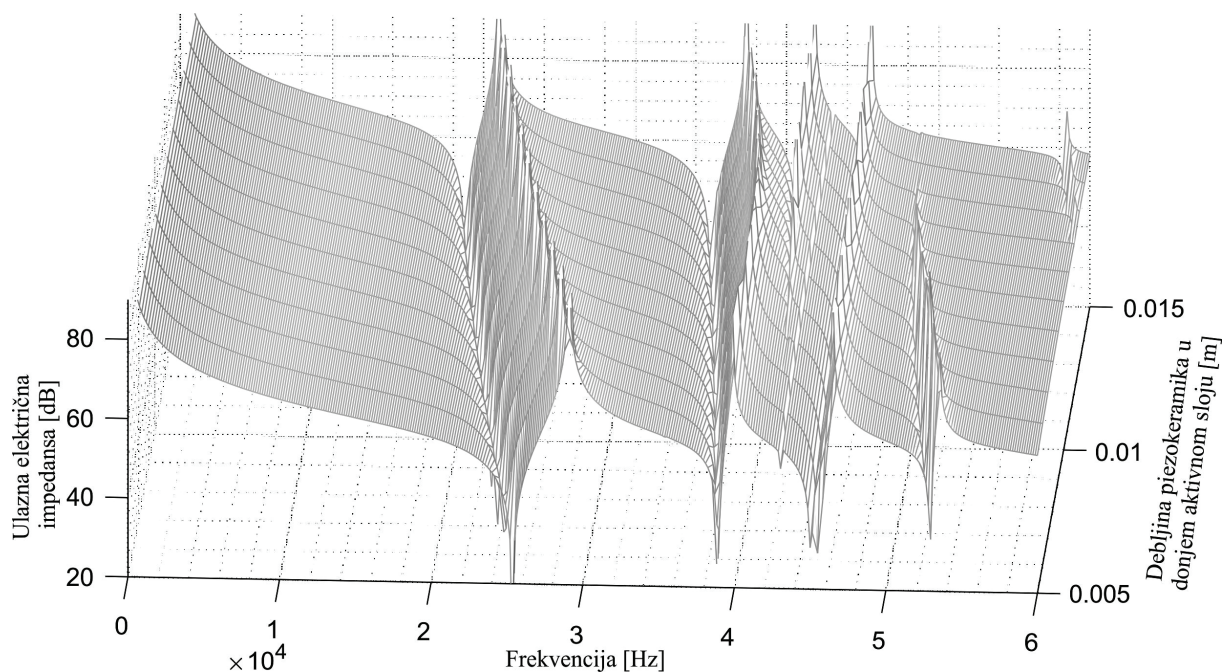
Predloženim trodimenzionalnim modelom potvrđen je i uticaj promena dimenzija sastavnih delova pretvarača u radijalnom pravcu na rezonantne modove, kako na izolovane, tako i na spregnute modove. Zavisnosti ulazne električne impedanse od dimenzija sastavnih delova kompozitnog pretvarača_2 u radijalnom pravcu, kao i od delovanja odgovarajućih akustičkih impedansi, prikazane su na slikama 5.30 - 5.37.

Smanjenjem spoljašnjeg prečnika emitora povećavaju se frekvencije prvog rezonantnog moda, što je nepovoljno zbog njegovog približavanja drugom modu na koji ove promene nemaju uticaj (slika 5.30). Situacija je obrnuta u slučaju trećeg i četvrtog moda kod kojih se javlja neznatan pad frekvencija sa posmatranim promenama dimenzija emitora. U celom opsegu promene spoljašnjeg prečnika emitora ponašanje trećeg i četvrtog moda je identično, na osnovu čega se može zaključiti postojanje sprege između ova dva moda.

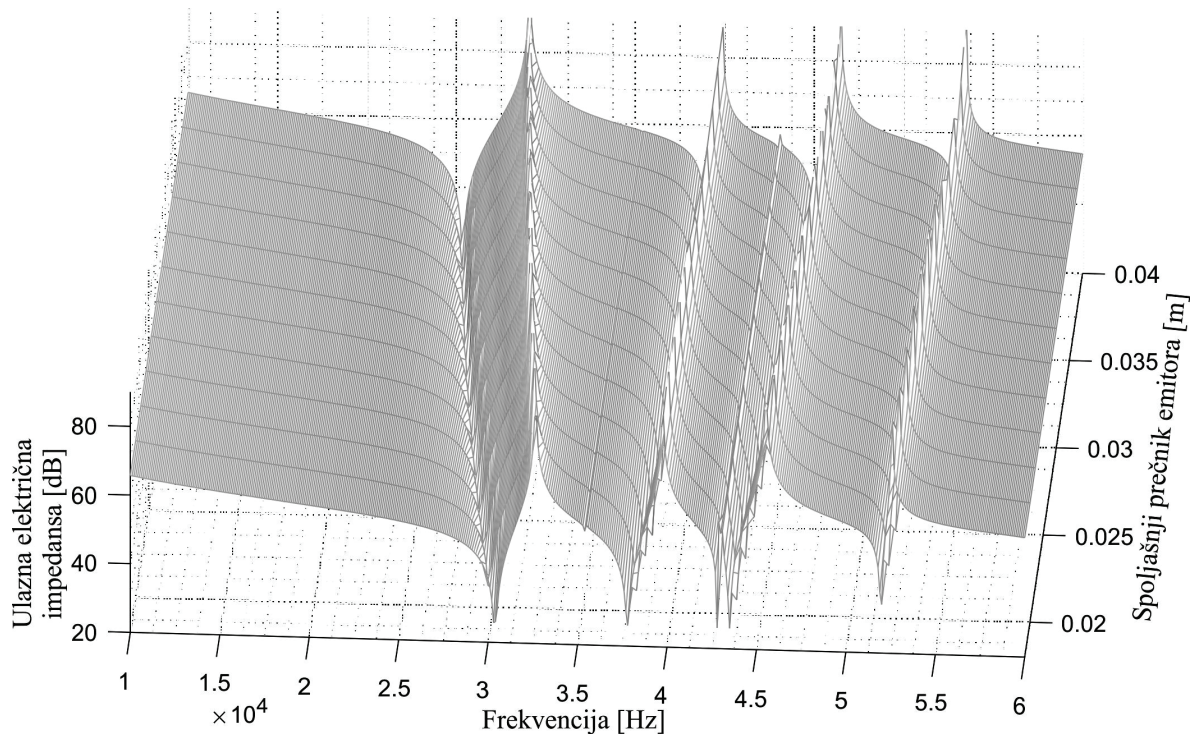
Slična analiza može biti sprovedena u slučaju promene akustičkog opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini emitora (slika 5.31). Velika opterećenja na posmatranoj površini emitora imaju slab uticaj na prvi, treći i četvrti mod, bez njihovih značajnijih promena. Takođe, i ova zavisnost pokazuje da promene dimenzija emitora u radijalnom pravcu nemaju uticaj na drugi mod.



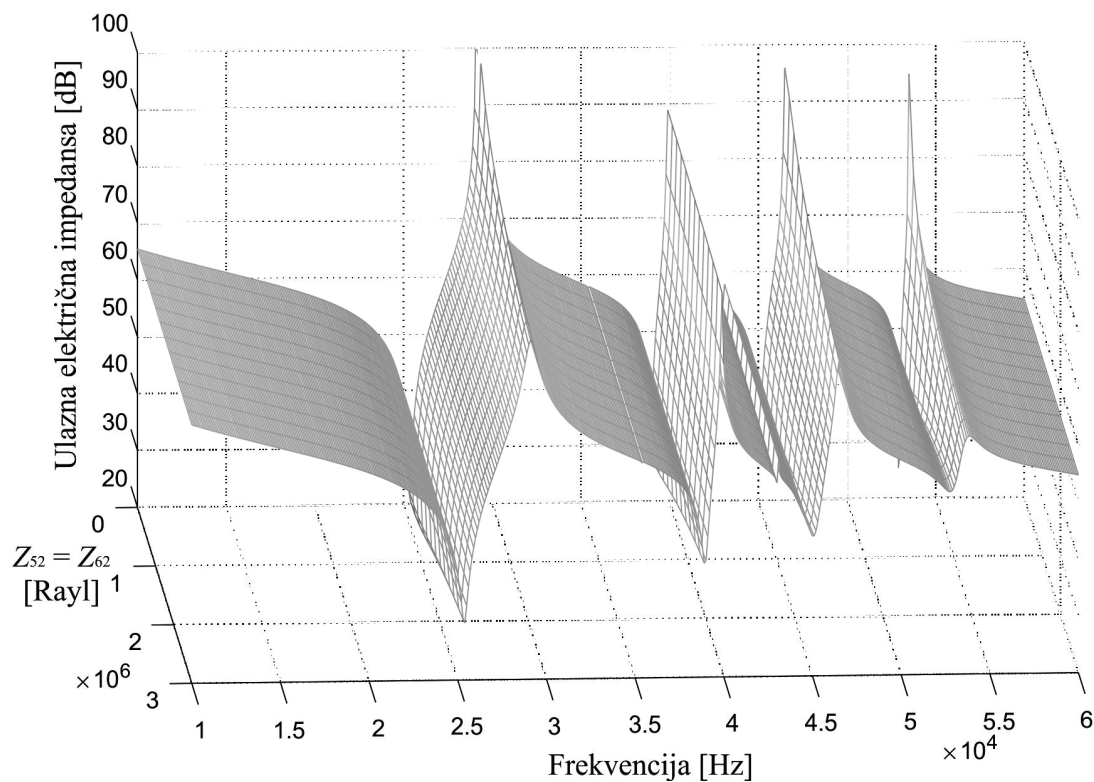
Slika 5.28. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i debljine piezokeramičkih prstenova u gornjem aktivnom sloju



Slika 5.29. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i debljine piezokeramičkih prstenova u donjem aktivnom sloju

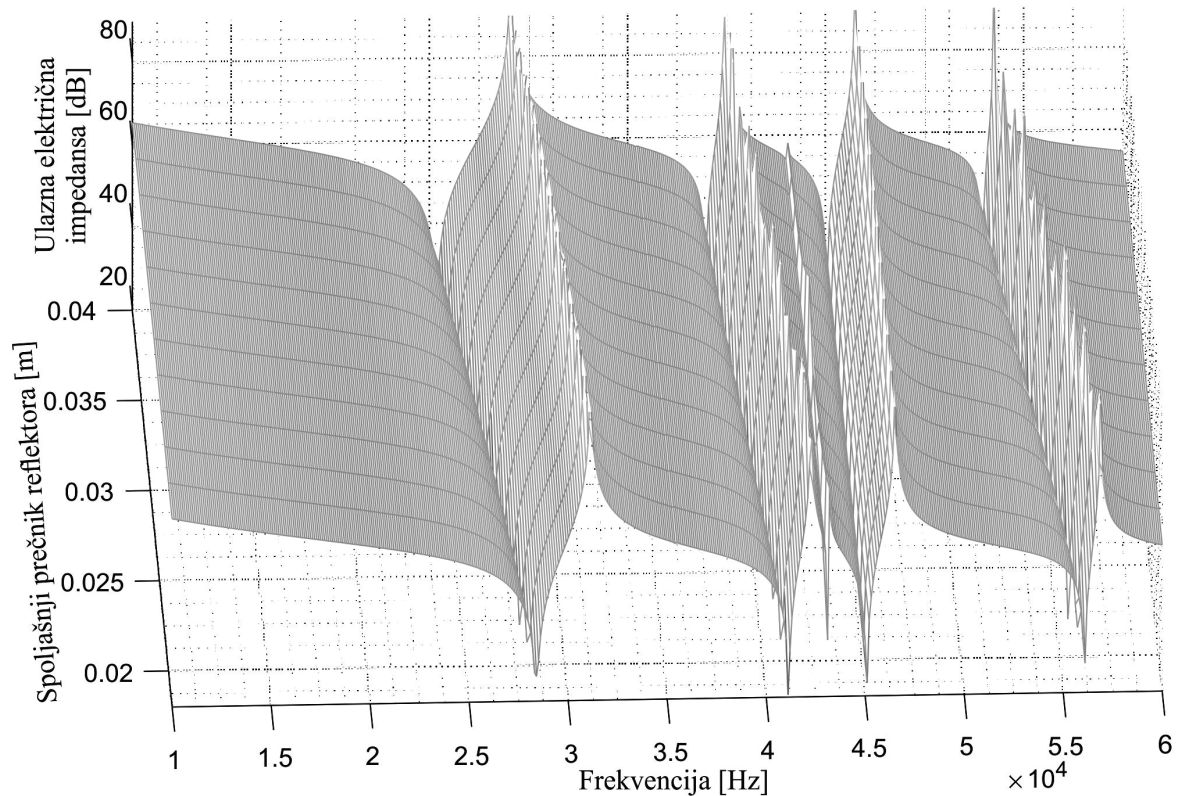


Slika 5.30. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika emitora



Slika 5.31. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini emitora, pri čemu važi da je $Z_{52}=Z_{62}$

Na slici 5.32 prikazana je promena ulazne električne impedanse u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika reflektora. Rezonantne frekvencije prvog, drugog i četvrtog moda se smanjuju povećanjem spoljašnjeg prečnika reflektora, dok frekvencije trećeg moda ostaju nepromenjene.

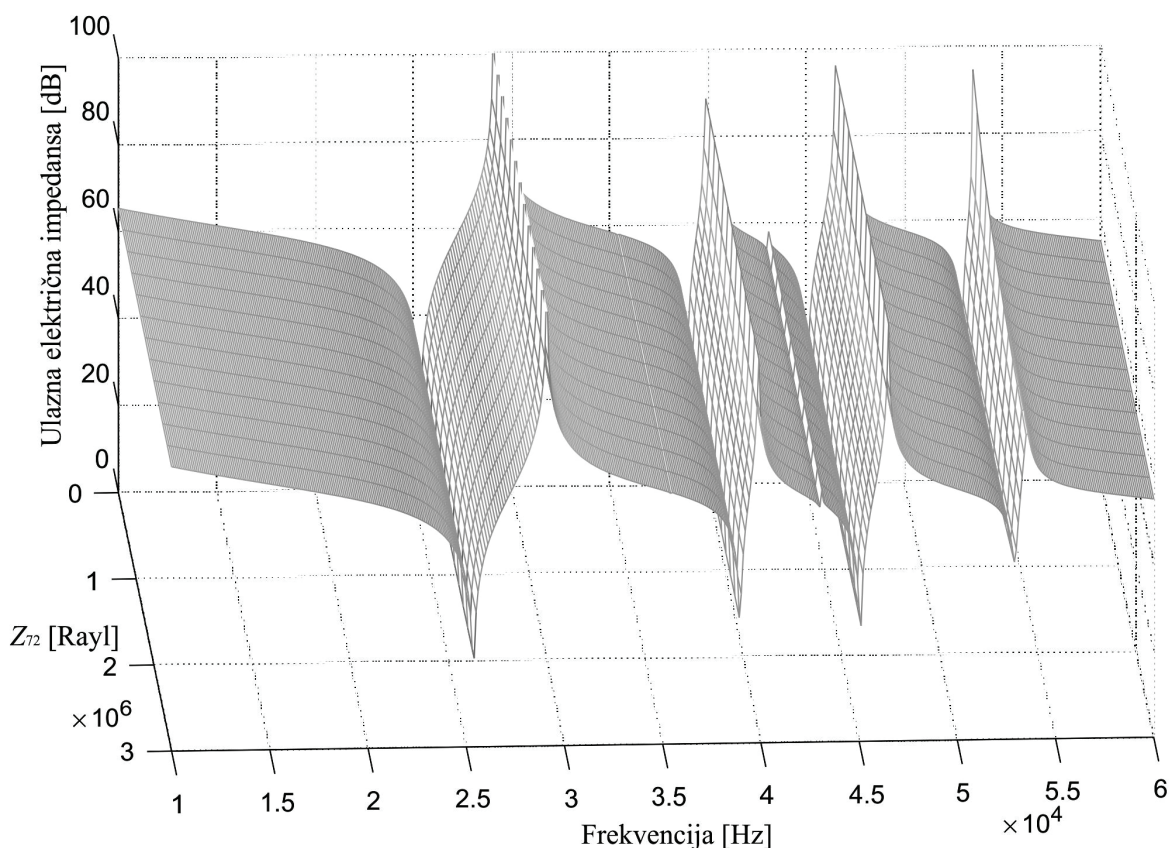


Slika 5.32. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika reflektora

Analogna zavisnost ulazne električne impedanse pri promeni opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini reflektora prikazana je na slici 5.33, pri čemu se uočavaju neznatne promene samo četvrtog rezonantnog moda. Kod posmatranog kompozitnog pretvarača_2, kod koga srednja masa ne dodiruje centralni zavrtnj, veći uticaj na oblik i položaj rezonantnih modova ostvaruje se preko dimenzija emitora.

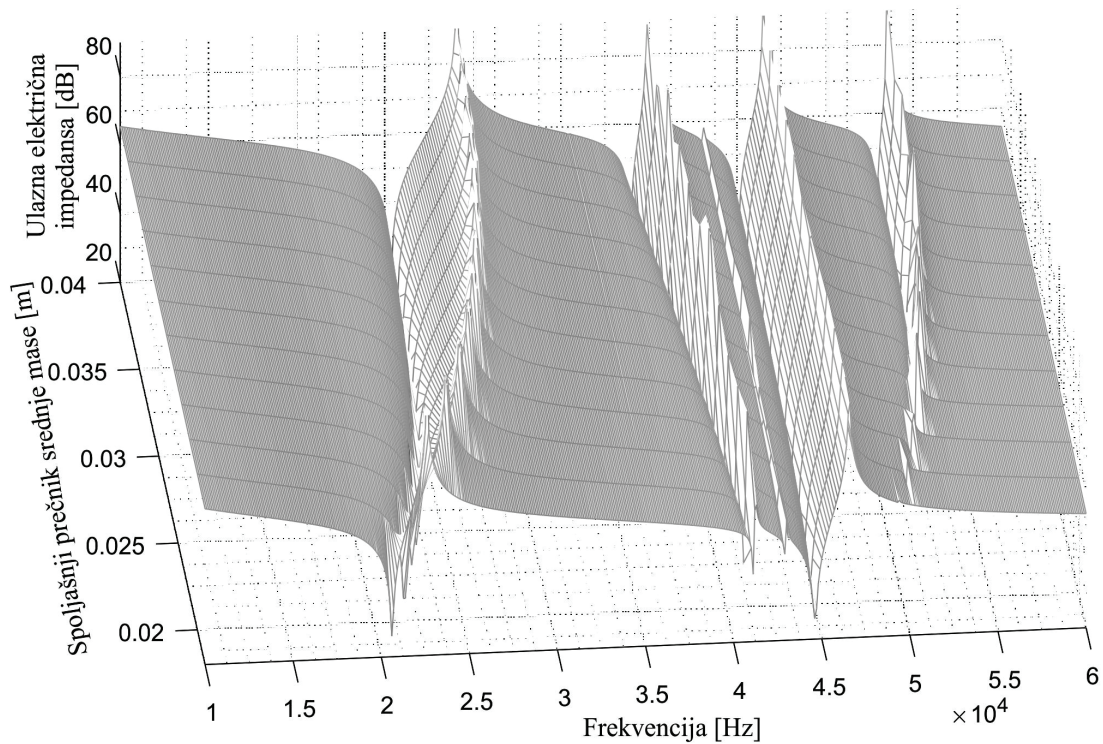
Na slici 5.34 prikazana je zavisnost ulazne električne impedanse pretvarača u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika čelične srednje mase. Sa slike se jasno vide promene frekvencija prvog i četvrtog moda. Pri dimenzijama spoljašnjeg prečnika srednje mase bliskim konačno usvojenoj vrednosti (40 mm) slabi navedena zavisnost, tako da se može zaključiti da dalje promene radijalnih dimenzija srednje mase neće uticati na promenu ni jednog moda.

Dodatno, može se izvršiti i analiza zavisnosti ulazne električne impedanse u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini srednje mase (slika 5.35). Navedenom analizom se potvrđuje da promene akustičkog opterećenja na spoljašnjoj cilindričnoj površini srednje mase nemaju uticaj na posmatrane rezonantne modove. Promenom opterećenja na posmatranoj površini srednje mase neznatno se menja oblik samo četvrtog moda, tako da bi eventualno fiksiranje kompozitnog pretvarača preko srednje mase imalo uticaja u dinamičkim uslovima samo na ovaj debljinski rezonantni mod.

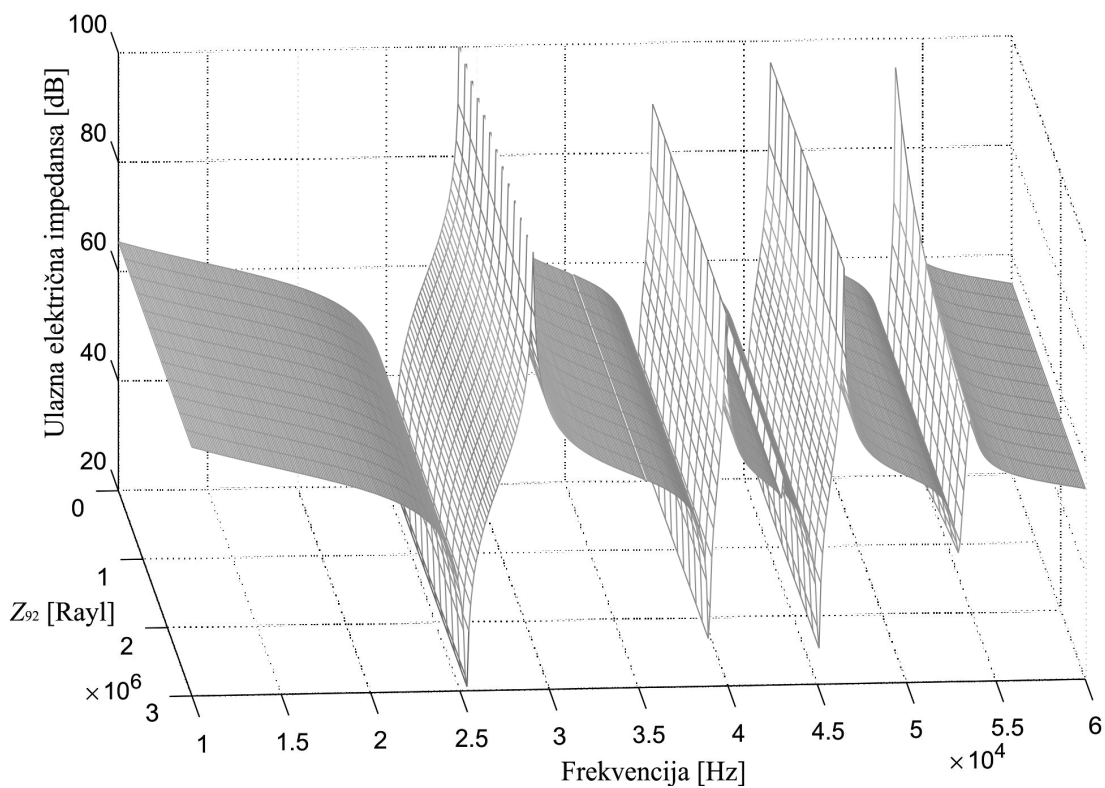


Slika 5.33. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja Z_{72} na spoljašnjoj cilindričnoj površini reflektora

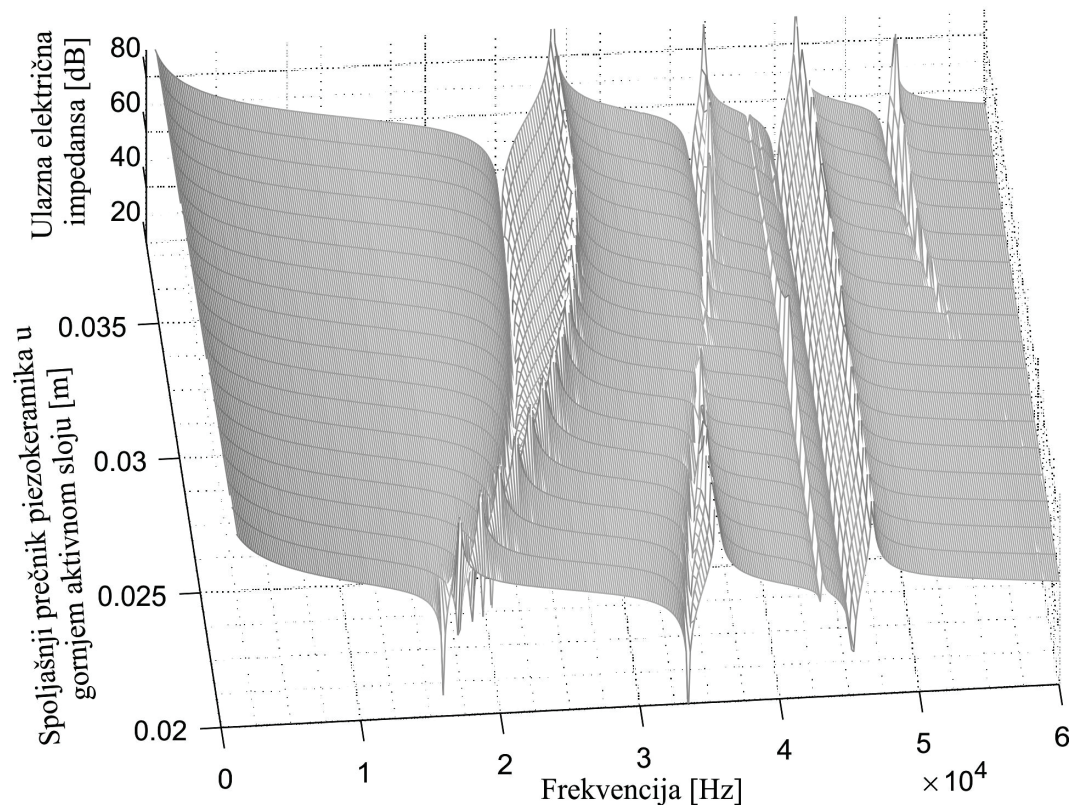
Na osnovu uticaja spoljašnjeg prečnika piezokeramičkih prstenova u gornjem aktivnom sloju na promene ulazne električne impedanse u funkciji frekvencije (slika 5.36), može se zaključiti da rezonantna frekvencija trećeg moda ne zavisi od radijalnih promena dimenzija piezokeramika u posmatranom opsegu. Sa smanjenjem spoljašnjeg prečnika, smanjuju se i vrednosti rezonantnih frekvencija drugog moda. Na prvi i četvrti mod ove promene imaju uticaj tek pri odnosu spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika (a/b) manjem od dva, pri čemu daljim smanjivanjem dužine spoljašnjeg prečnika vrednosti rezonantnih frekvencija prvog moda opadaju, dok se četvrti mod gubi.



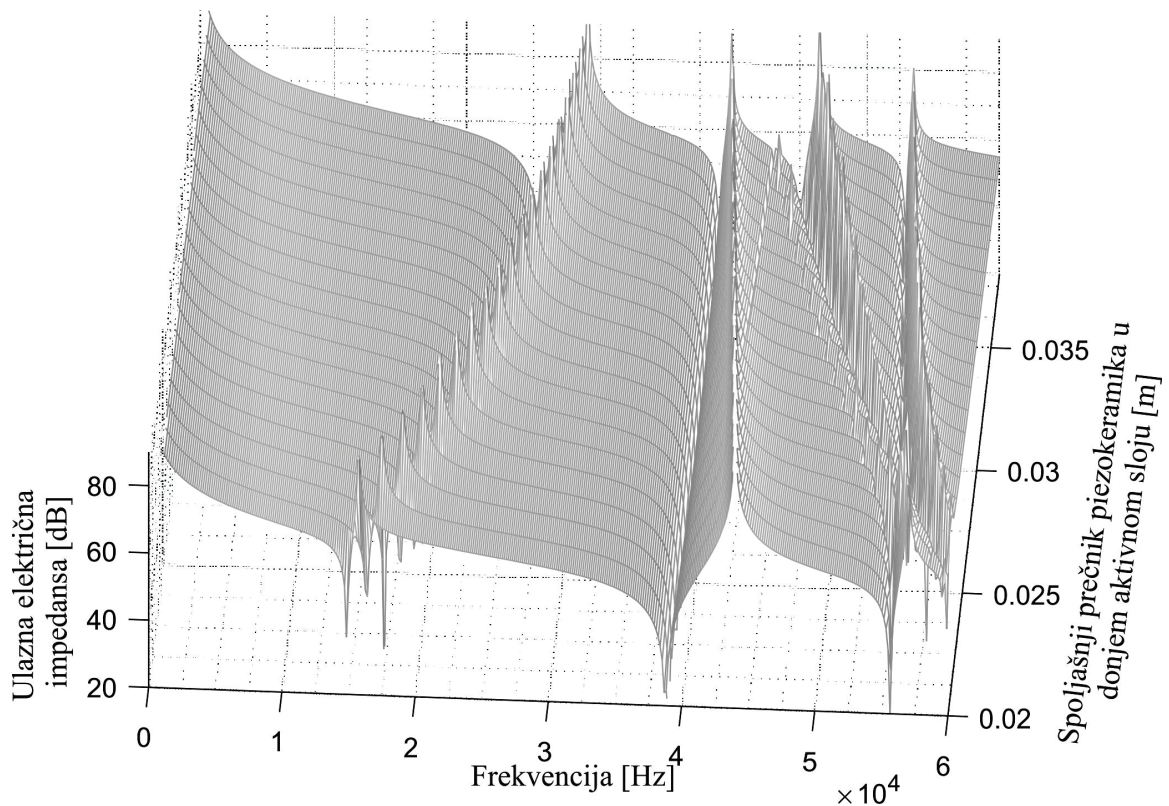
Slika 5.34. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika srednje mase



Slika 5.35. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i akustičkog opterećenja Z_{92} na spoljašnjoj cilindričnoj površini srednje mase



Slika 5.36. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika piezokeramika u gornjem aktivnom sloju



Slika 5.37. Promena ulazne električne impedanse kompozitnog ultrazvučnog pretvarača_2 u funkciji frekvencije i spoljašnjeg prečnika piezokeramika u donjem aktivnom sloju

Prikazanom analizom uticaja promena dimenzija sastavnih delova kompozitnog pretvarača_2 na oblik i položaj rezonantnih modova pokazano je da prvi rezonantni mod zavisi od dimenzija svih sastavnih delova pretvarača samo u debljinskom pravcu. S obzirom na pokazanu zavisnost može se zaključiti da je prvi rezonantni mod debljinski mod. U praksi se najlakše na osnovni mod može uticati korigovanjem debljine emitora. Takođe, analizom je potvrđeno da je i drugi rezonantni mod debljinski. Na drugi mod, pored promena debljina piezokeramičkih prstenova u gornjem aktivnom sloju, uticaj imaju i radijalne promene dimenzija piezokeramičkih prstenova u donjem aktivnom sloju. Postojanje sprege između drugog (debljinskog) i trećeg (radijalnog) rezonantnog moda može se videti na osnovu zavisnosti posmatranih modova od radijalnih promena dimenzija piezokeramičkih prstenova u donjem aktivnom sloju. Postojanje sprege između trećeg (radijalnog) i četvrtog (debljinskog) rezonantnog moda može se videti na osnovu zavisnosti posmatranih modova od radijalnih promena dimenzija emitora. Dodatno, na četvrti mod uticaj imaju i promene debljina svih sastavnih delova pretvarača, kao i radijalne promene dimenzija srednje mase. Na ovaj način je potvrđen deo analize koji se odnosi na određivanje prirode prikazanih izmerenih i modelovanih rezonantnih modova (slika 5.23). Takođe, analizom uticaja promena akustičkog opterećenja na spoljašnjim površinama pretvarača_2 na promene ulazne električne impedanse potvrđeni su prethodno navedeni zaključci.

Prisustvo rezonantnih modova koji nisu obuhvaćeni prikazanim jednodimenzionalnim modelima se najbolje vidi sa zavisnosti prikazane na slici 5.23. Treći izmereni rezonantni mod ne predstavlja debljinski mod, tako da su modelovane zavisnosti trećeg debljinskog moda na nižim frekvencijama od merenih. Slično, modelovana zavisnost drugog debljinskog moda generalnim jednodimenzionalnim modelom je na višim frekvencijama od merenih.

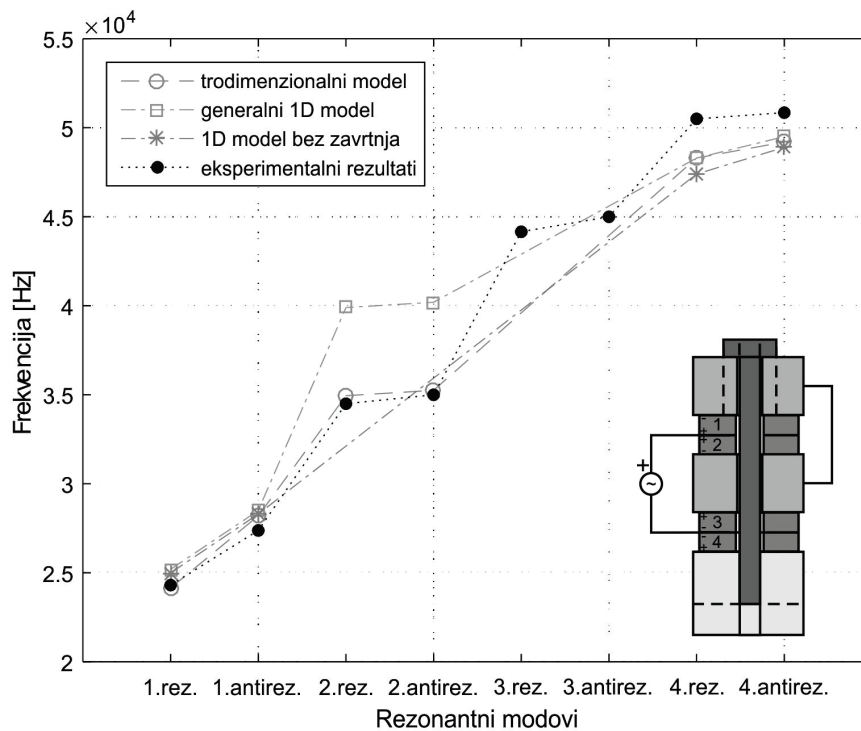
U nastavku ove disertacije grafički su prikazane rezonantne frekvencije kompozitnog pretvarača_3 sa različitim električnim povezivanjima, izračunate uz pomoć predloženih modela. Sastavni delovi pretvarača_3 su PZT8 piezokeramički prstenovi, emitor od duraluminijuma, i reflektor i srednja masa od čelika. Dimenzije sastavnih delova pretvarača_3 date su u tabeli 5.3. Na slikama 5.38 - 5.44 prikazane su vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija svih izmerenih i modelovanih modova koji se nalaze u opsegu do 60 kHz. Takođe, šematski prikaz električnog povezivanja kompozitnog pretvarača sa pobudom predstavljen je na istim slikama.

Na slici 5.38 prikazane su vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za kompozitni

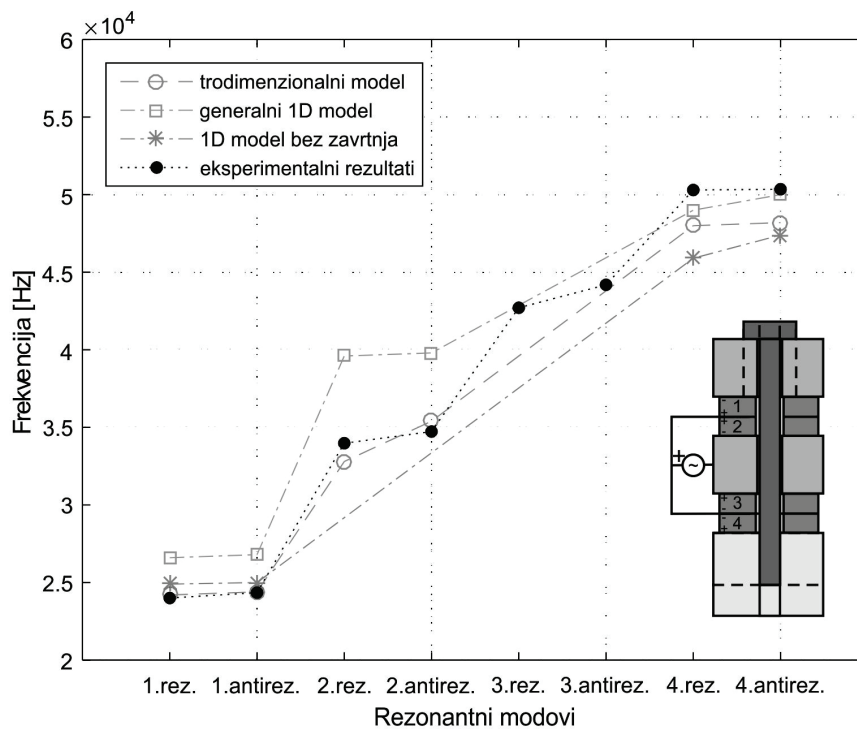
pretvarač_3 dobijene predloženim modelima i eksperimentalnim merenjima. Jednake vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija se dobijaju sa i bez kratkospojnika prikazanog na istoj slici. Greške koje prave predloženi modeli pri predviđanju rezonantne frekvencije osnovnog moda su zanemarljive. Dodatno, primenom trodimenzionalnog modela prave se minimalne greške kako u predviđanju prvog, tako i u predviđanju ostalih rezonantnih modova. Različitim kombinacijama električnog povezivanja kompozitnog pretvarača na isti pobudni generator, ili kombinacijom različitih pobuda, mogu nastati snažne sprege modova, pri čemu je moguće generisanje i drugih rezonantnih modova. Kod ovakvih složenih struktura pretvarača, odgovarajućom pobudom najčešće se javljaju torzioni, ivični i fleksioni modovi. S obzirom da treći izmereni mod sa rezonantnom frekvencijom od 44.16 kHz nije obuhvaćen predloženim modelima, može se zaključiti da nije ni radijalne ni debljinske prirode. Greške koje se prave generalnim jednodimenzionalnim modelom u predviđanju drugog i četvrtog moda, kao i greške koje se prave predloženim trodimenzionalnim modelom u predviđanju četvrtog moda, nastaju zbog prisustva trećeg moda.

Na slikama 5.39 i 5.40 prikazane su izmerene i modelovane vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za pretvarač_3 pri različitim kombinacijama električnog povezivanja ulaza. Izmerene frekvencije prvog rezonantnog moda pretvarača_3 električno povezanog kao na slikama 5.39 i 5.40 su 24 kHz i 24.23 kHz, respektivno. Posmatrani prvi mod u oba slučaja ne predstavlja radni mod pretvarača. Pretvarač je potrebno pobuditi na rezonantnoj frekvenciji drugog moda 33.98 kHz (slika 5.39), odnosno 33.5 kHz (slika 5.40), u odnosu na koju predloženi generalni jednodimenzionalni model pravi veliku grešku. Međutim, jednodimenzionalni model koji ne uključuje uticaj zavrtnja ne može predvideti posmatrani mod. Trodimenzionalni model pri predviđanju radnog moda pravi minimalne greške. Navedene greške u izračunavanju su posledica nemogućnosti modela da predvide izmerene treće modove pretvarača_3 električno povezanog kao u posmatranim slučajevima.

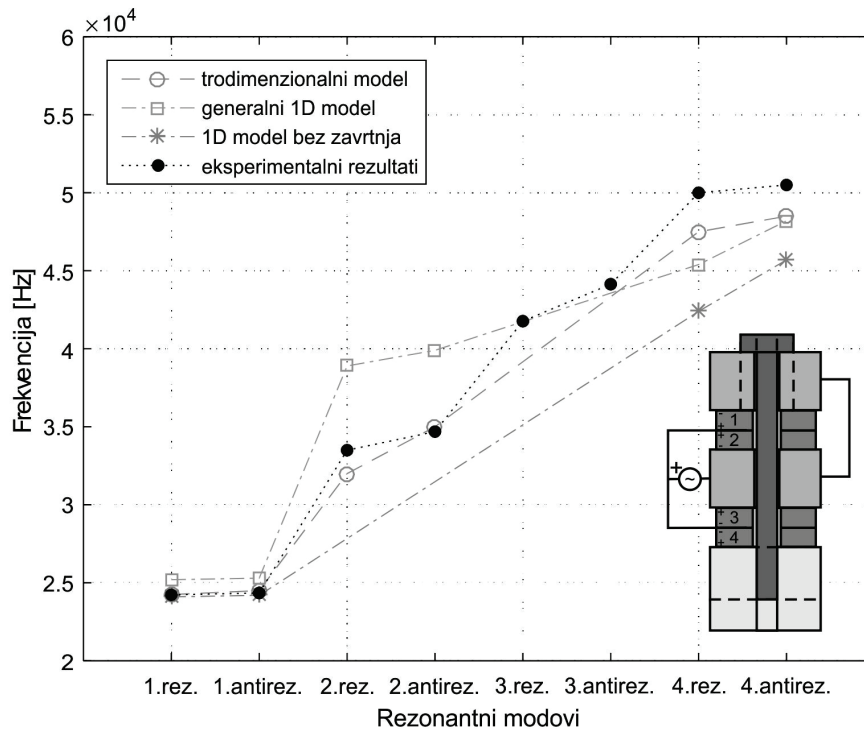
Na slikama 5.41 - 5.44 prikazana su analogna poređenja za pretvarač_3, preko uticaja kratkospajanja piezokeramičkih prstenova u gornjem i donjem aktivnom sloju na rezonantne modove. Uticaj kratkospojnika na ponašanje kompozitnih pretvarača pri promeni frekvencije pobudnog napona najuočljiviji je pri posmatranju rezonantnih frekvencija osnovnog moda, pri čemu su rezonantne frekvencije pretvarača sa kratkospojnikom niže od onih bez kratkospojnika. Oblik modova, izračunate vrednosti impedansi, kao i izračunate vrednosti rezonantnih frekvencija približni su odgovarajućim eksperimentalno dobijenim rezultatima.



Slika 5.38. Poređenje modelovanih i merenih vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za prikazani kompozitni pretvarač_3 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima

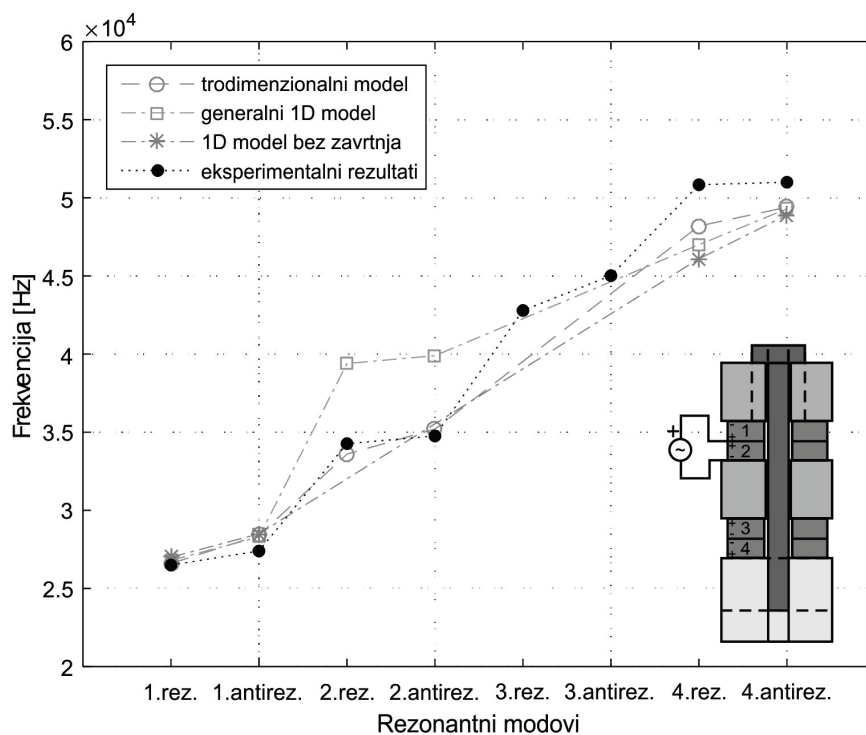


Slika 5.39. Poređenje modelovanih i merenih vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za prikazani kompozitni pretvarač_3 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima

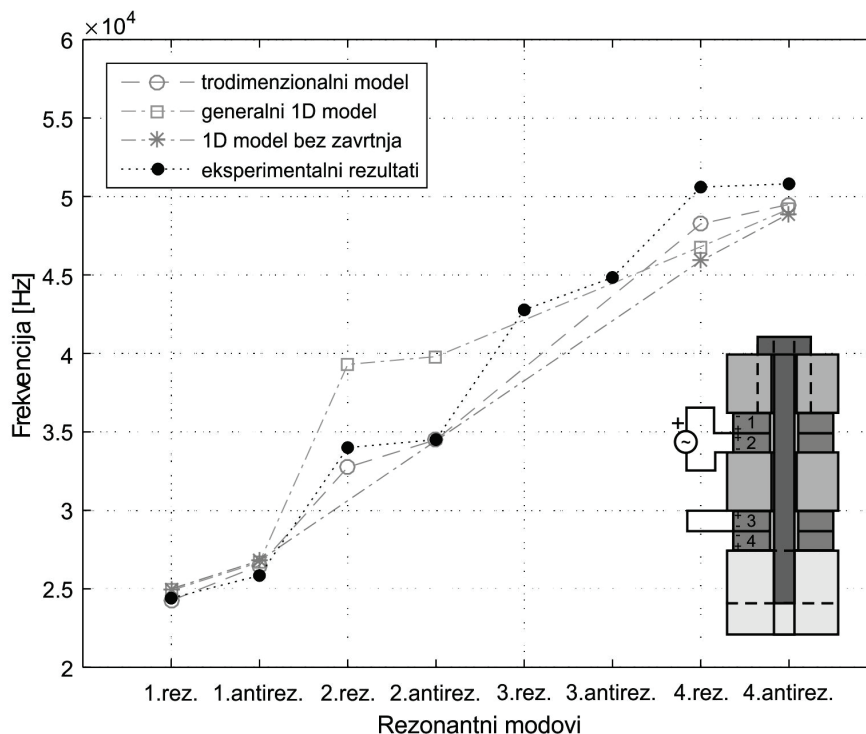


Slika 5.40. Poređenje modelovanih i merenih vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za prikazani kompozitni pretvarač_3 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima

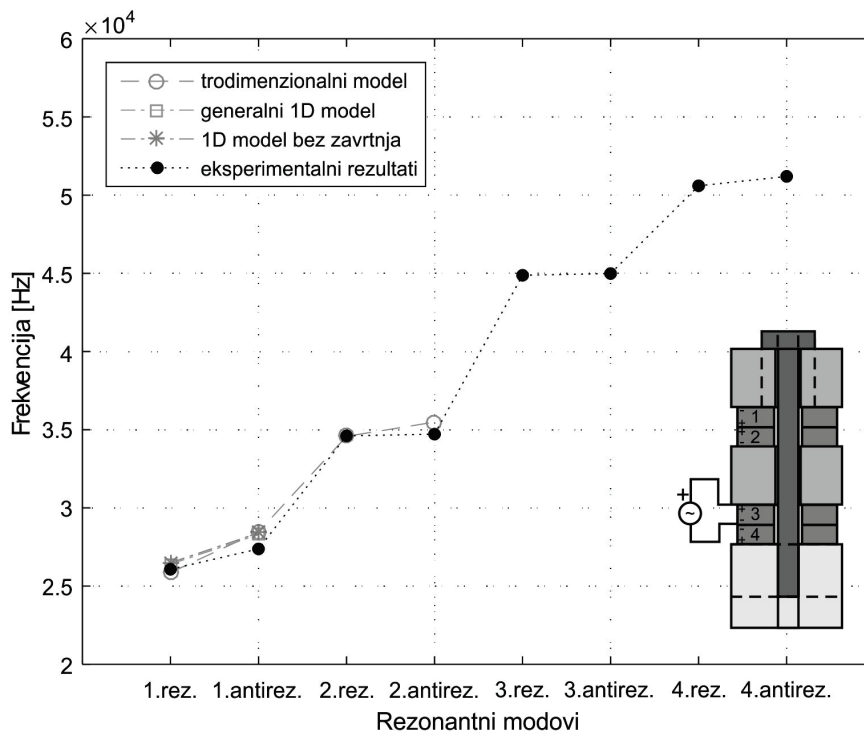
Merene rezonantne frekvencije prvog moda realizovanog pretvarača_3 električno povezanog kao na slikama 5.41 - 5.44 su: 26.58 kHz, 24.41 kHz, 26.08 kHz i 24.48 kHz, respektivno. Greške koje pravi generalni jednodimenzionalni model su minimalne i iznose 0.83% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 26.8 kHz, 2.01% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 24.9 kHz, 1.23% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 26.4 kHz, i 1.72% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 24.9 kHz, respektivno. Jednodimenzionalnim modelom koji ne uzima u obzir uticaj zavrtnja se prave sledeće greške u predviđanju rezonantne frekvencije osnovnog moda: 1.58% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 27 kHz, 2.42% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 25 kHz, 1.61% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 26.5 kHz, i 1.92% za modelovanu rezonantnu frekvenciju od 24.95 kHz, respektivno. Dakle, u svim prikazanim slučajevima generalnim jednodimenzionalnim modelom predviđaju se tačniji rezultati rezonantnih frekvencija osnovnog rezonantnog moda. Greške koje se prave izračunavanjem rezonantnih frekvencija uz pomoć trodimenzionalnog modela su zanemarljive, i u slučaju osnovnog moda su u opsegu od 0.38% do 0.94% za posmatrana četiri slučaja.



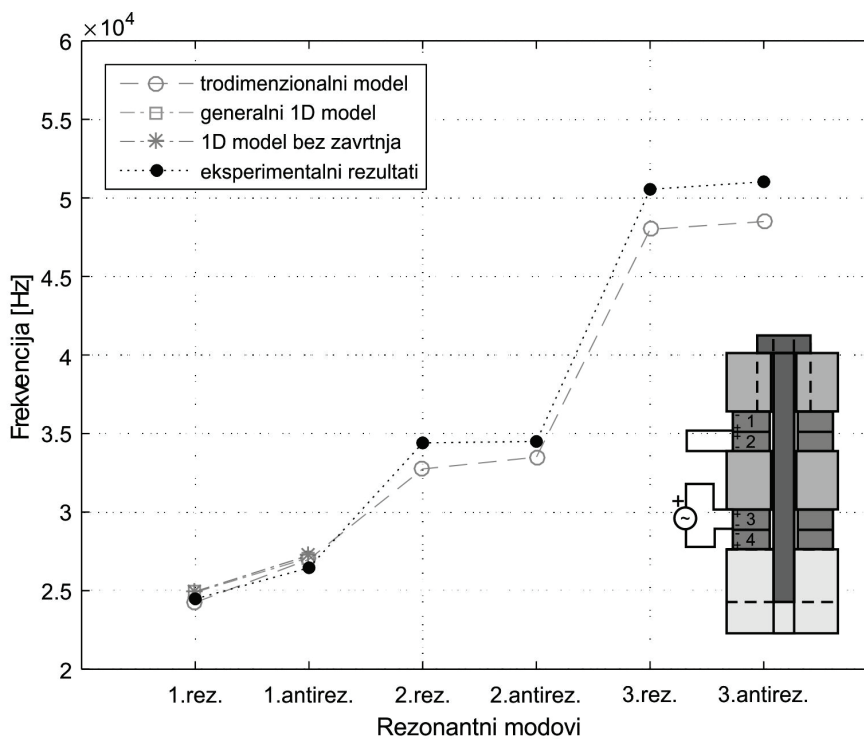
Slika 5.41. Poređenje modelovanih i merenih vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za prikazani kompozitni pretvarač_3 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima



Slika 5.42. Poređenje modelovanih i merenih vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za prikazani kompozitni pretvarač_3 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima



Slika 5.43. Poređenje modelovanih i merenih vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za prikazani kompozitni pretvarač_3 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima



Slika 5.44. Poređenje modelovanih i merenih vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija za prikazani kompozitni pretvarač_3 sa pobudnim PZT8 piezokeramičkim prstenovima

Slično razmatranjima u analizi ponašanja pretvarača_1, rezonantne frekvencije kompozitnog pretvarača_3 zavise od dimenzija i karakteristika materijala sastavnih delova pretvarača, ali i od promena električnih graničnih uslova. Na slikama 5.43 i 5.44 se jasno vidi uticaj kratkospojnika na treći rezonantni mod, tačnije uticaj kratkospajanja drugog piezokeramičkog prstena u gornjem aktivnom sloju. Treći rezonantni mod, čija je frekvencija 44.8 kHz (slika 5.43), u potpunosti se gubi kratkospajanjem drugog piezokeramičkog prstena u gornjem aktivnom sloju (slika 5.44).

U tabeli 5.4 prikazane su vrednosti rezonantnih i antirezonantnih frekvencija prvog debljinskog moda dobijene simulacijom uz pomoć predloženih modela (f_r i f_a respektivno), i merenjem ulazne električne impedanse (f_{mr} i f_{ma} respektivno) za kompozitni pretvarač_4. Prikazane vrednosti u tabeli važe za sledeće relacije: $\Delta_r = |f_r - f_{mr}| / f_{mr}$ i $\Delta_a = |f_a - f_{ma}| / f_{ma}$.

Tabela 5.4. Rezonantne i antirezonantne frekvencije za kompozitni pretvarač_4 sa pobudnim PZT4 piezokeramičkim prstenovima električno paralelno povezanim sa pobudom

Kompozitni pretvarač_4	f_r (Hz)	f_a (Hz)	f_{mr} (Hz)	f_{ma} (Hz)	Δ_r (%)	Δ_a (%)
trodimenzionalni model	31280	38680			0.1	12.82
generalni 1D model	33230	38680	31250	34286	6.34	12.82
1D model bez zavrtnja	34200	49500			9.44	44.37

Kod pretvarača_4 sa kraćim metalnim nastavcima najbolje se vide ograničenja jednodimenzionalnog modelovanja. Greške koje se prave prilikom navedenog modelovanja su veoma izražene, tako da je preporučljivo korišćenje višedimenzionalnih modela.

Tačniji rezultati modelovanja kompozitnih pretvarača prikazanih u ovoj disertaciji dobijaju se predloženim generalnim jednodimenzionalnim modelom u odnosu na rezultate dobijene jednodimenzionalnim modelom koji ne uzima u obzir uticaj zavrtnja.

S obzirom da predloženi modeli ne uzimaju u obzir mehaničke i dielektrične gubitke, minimalne i maksimalne vrednosti modelovanih impedansi izraženije su na modelovanim zavisnostima u odnosu na one kod merenih zavisnosti. Takođe, na razliku između merenih i modelovanih vrednosti uticaj ima upotreba tipičnih umesto realnih (aktuelnih) vrednosti koeficijenata materijala sastavnih delova pretvarača.

6 ZAKLJUČAK

Korišćenje snažnog ultrazvuka u oblasti industrijske elektronike u stalnom je porastu, kako zbog primene novih, tako i zbog stalnog usavršavanja postojećih ultrazvučnih sistema.

Karakteristike materijala sastavnih delova snažnih ultrazvučnih pretvarača u električnom, mehaničkom i termičkom pogledu definišu efikasnost, kvalitet i pouzdanost pretvarača tokom njegovog rada. Postupci projektovanja, modelovanja i optimizacije pretvarača omogućavaju njihovu realizaciju, koja zadovoljava najviše kriterijume u pogledu efikasnosti i jačine ultrazvučne snage u zoni zračenja. Određivanje optimalne strukture pretvarača predstavlja kompleksan zadatak s obzirom da su u praktičnoj primeni pretvarači izloženi različitim radnim uslovima.

U ovoj disertaciji su prikazani projektovanje, razvoj i realizacija dve nove strukture kompozitnih ultrazvučnih pretvarača velike snage. Pored primarnih aspekata vezanih za primenu ultrazvučnih sistema u industriji, pružen je i uvid u osnovne konstrukcije najčešće korišćenih ultrazvučnih sendvič pretvarača.

Novorealizovane kompozitne pretvarače karakterišu mehaničke strukture koje predstavljaju nadogradnju Langevin-ovih sendvič pretvarača, što je detaljno opisano u drugom poglavlju. Predloženi kompozitni pretvarači kao novinu sadrže srednju metalnu masu, tako da se umesto klasične strukture Langevin-ovog pretvarača (reflektor - aktivni piezokeramički blok - emitor) dobija sledeća struktura: reflektor - aktivni piezokeramički blok - srednja masa - aktivni piezokeramički blok - emitor. Razlika između predloženih struktura je u tome što je kod prve strukture srednja masa spojena sa krajnjim metalnim nastavcima uz pomoć dva centralna zavrtnja, dok je u drugoj strukturi prednaprezanje izvršeno jednim centralnim zavrtnjem koji

povezuje samo krajnje metalne nastavke. U drugoj strukturi srednja masa nije u direktnom kontaktu sa zavrtnjem i ima veći stepen slobode pri oscilovanju između aktivnih piezokeramičkih blokova. Aktivni blokovi se sastoje od jednog ili više parova mehanički redno spojenih piezokeramičkih prstenova sa suprotno orijentisanim polarizacijama. Pri mehaničkom spajanju sastavnih delova pretvarača oba aktivna sloja moraju biti međusobno suprotno polarisana.

Navedene karakteristike predloženih kompozitnih ultrazvučnih pretvarača omogućavaju veću fleksibilnost i efikasnost korišćenja pretvarača u brojnim industrijskim primenama. Takođe, kombinacijom različitih električnih pobudnih signala predloženih kompozitnih pretvarača, kao i kombinacijom polariteta napajanja aktivnih blokova, mogu se dobiti različite oscilacije.

U ovoj disertaciji je razrađen pristup modelovanju koji zahteva direktno rešavanje talasne jednačine. U cilju modelovanja navedenih pretvarača korišćeni su analitički jednodimenzionalni i trodimenzionalni modeli. U trećem poglavlju dat je pregled modela i tehnika modelovanja sastavnih delova ultrazvučnih pretvarača. Prikazan je razvoj jednodimenzionalnih modela piezokeramika, od klasičnog Mason-ovog modela do KLM modela. Takođe, u trećem poglavlju prikazana je analiza oscilovanja metalnih cilindričnih nastavaka konačnih dužina, kao i razvoj jednodimenzionalnog modela metalnih nastavaka. Prikazani modeli oslanjaju se na tehnike razvijene u teoriji električnih mreža i pogodni su za upotrebu u savremenim programskim paketima za analizu električnih kola.

Za jednodimenzionalne modele potreban je ograničen skup fizičkih karakteristika materijala sastavnih delova pretvarača. Prema tome, jednodimenzionalne modele je preporučljivo upotrebljavati u situacijama projektovanja pretvarača sa novim materijalima, i u situacijama u kojima spoljašnji faktori (temperatura i pritisak) imaju jak uticaj na promene parametara materijala. Dodatno, jednodimenzionalnom analizom se vrši aproksimacija pod pretpostavkom da su radijalne dimenzije posmatranog elementa višestruko manje od aksijalnih, tako da se zanemaruju svi drugi rezonantni modovi, sem debljinskog. Međutim, u slučaju projektovanja pretvarača kod koga se odnos aksijalnih i radijalnih dimenzija ne može zanemariti, potrebno je koristiti višedimenzionalne modele.

Na osnovu detaljne analize zavisnosti ulazne električne impedanse od frekvencije predloženih pretvarača koja je prikazana u ovoj disertaciji, potvrđeno je da jednodimenzionalni modeli nisu pogodni za određivanje rezonantnih frekvencija debljinskih modova koji su u blizini

radijalnih modova. Prema tome, za preciznu analizu prikazanih kompozitnih pretvarača neophodno je poznavanje rezonantnih frekvencija radijalnih modova.

U disertaciji su korišćeni trodimenzionalni matrični modeli piezokeramičkog prstena i metalnog cilindričnog rezonatora opterećenih na svim konturnim površinama. Značaj korišćenja navedenih modela prikazanih u trećem poglavlju ogleda se u predviđanju kako debljinskih, tako i radijalnih rezonantnih modova, kao i njihove međusobne sprege.

U četvrtom poglavlju prikazan je postupak modelovanja predloženih kompozitnih pretvarača sa sastavnim delovima od različitih materijala, korišćenjem jednodimenzionalne teorije i trodimenzionalnog matričnog modela. Zbog kompleksnosti izraza za ulaznu električnu impedansu kompozitnih pretvarača razvijen je generalni jednodimenzionalni model predstavljen kao pasivno elektromehaničko ekvivalentno kolo. Dodatno, razvijen je i sličan jednodimenzionalni model koji ne uključuje u analizu uticaj zavrtnja. Prednost novorazvijenih jednodimenzionalnih modela, koji uključuju piezoelektrična svojstva piezokeramike i karakteristike pasivnih materijala, ogleda se u jednostavnosti njihove primene pri modelovanju celog kompozitnog pretvarača. Na osnovu korišćenja generalnog jednodimenzionalnog modela pretvarača koji uključuje sve sastavne delove pretvarača, i na osnovu korišćenja modela u kojem je uticaj zavrtnja zanemaren, potvrđeno je da u kompozitnoj strukturi tipa B uticaj zavrtnja ne treba zanemarivati. Ukoliko bi se u odgovarajućem modelu pretvarača tipa B uticaj zavrtnja zanemario, ne bi bilo moguće predviđanje drugog debljinskog rezonantnog moda, što bi za posledicu imalo lošu procenu performansi pretvarača tokom njegovog rada. Takođe, u pretvaračima sa malim aksijalnim dimenzijama, prisustvo zavrtnja postaje značajno u određivanju radne rezonantne frekvencije.

Zbog kompleksnosti predloženih kompozitnih struktura i upotrebe trodimenzionalnog modela, korišćena su modularna rešenja trodimenzionalnog modela piezokeramičkih prstenova, kao i trodimenzionalnog modela pasivnih metalnih sastavnih delova pretvarača. Njihova implementacija u programskom paketu Matlab/Simulink prikazana je u četvrtom poglavlju. Međusobnim mehaničkim rednim i paralelnim vezivanjem modela svih sastavnih delova pretvarača, dobijeni su trodimenzionalni elektromehanički modeli celih kompozitnih ultrazvučnih pretvarača. Prednost navedenih novorazvijenih trodimenzionalnih modela ogleda se u mogućnosti da se uz neznatnu modifikaciju modela odredi bilo koja prenosna funkcija posmatranog kompozitnog pretvarača.

Na kraju četvrtog poglavlja prikazan je postupak optimizacije strukture predloženih kompozitnih pretvarača na osnovu primene trodimenzionalnog modela. Optimizacija je ostvarena analizom zavisnosti efektivnog elektromehaničkog faktora sprege u funkciji dimenzija sastavnih delova pretvarača.

Na osnovu dobijenih rezultata u procesu optimizacije realizovan je pretvarač koji predstavlja optimalno rešenje. Pretvarač optimalne strukture je napravljen od PZT4 piezokeramičkih prstenova dimenzija $\varnothing 38/\varnothing 15/5$ mm. Reflektor, srednja masa i centralni zavrtnaj su od nerđajućeg čelika, dok je emitor od duraluminijuma. Odnos debljine emitora i srednje mase pretvarača optimalne strukture iznosi 0.9, dok odnos debljine reflektora i srednje mase iznosi 1.7.

Poređenje eksperimentalnih merenja ulazne električne impedanse projektovanih i realizovanih kompozitnih pretvarača sa rezultatima simulacije prikazano je u petom poglavlju ove disertacije. U slučaju kompozitnih pretvarača sa dugim metalnim nastavcima, predloženi generalni jednodimenzionalni model se pokazao korisnim za predviđanje njihovog ponašanja tokom rada. Međutim, poređenjem merenih karakteristika realizovanih kompozitnih ultrazvučnih pretvarača sa rezultatima simulacije, potvrđena je preciznost predloženih trodimenzionalnih modela u poređenju sa jednodimenzionalnim modelima.

Za razliku od većine postojećih analitičkih pristupa u projektovanju pretvarača, u ovoj disertaciji posebna pažnja posvećena je obliku i položaju viših rezonantnih modova, kao i uticaju različitih parametara na njihove karakteristike. U cilju identifikacije prirode samog moda oscilovanja, uz pomoć predloženog trodimenzionalnog modela izvršena je analiza rezonantnih modova kompozitnih pretvarača preko uticaja dimenzija svih sastavnih delova na promenu ulazne električne impedanse. Dodatno, u cilju što tačnijeg određivanja prirode posmatranih rezonantnih modova i dokazivanja postojanja njihove eventualne sprege, izvršena je i analiza uticaja akustičkog opterećenja na promenu ulazne električne impedanse.

Realizovani pretvarač sa prvom predloženom strukturom (pretvarač_1) u posmatranom opsegu frekvencija (0-60 kHz) sadrži pet rezonantnih modova. Prva dva moda su debljinske prirode, dok treći, četvrti i peti mod predstavljaju radijalne rezonantne modove. Prikazanom analizom potvrđena je jaka sprega između drugog i trećeg rezonantnog moda, kao i sprega između trećeg i četvrtog rezonantnog moda, pri čemu svi navedeni modovi nemaju uticaj na rad posmatranog pretvarača u osnovnom modu.

Realizovani pretvarač sa drugom predloženom strukturom (pretvarač_2) u navedenom opsegu frekvencija sadrži četiri rezonantna moda. Prvi, drugi i četvrti mod predstavljaju debljinske rezonantne modove, dok je treći mod radijalne prirode. Takođe, potvrđena je jaka sprega koju treći mod ostvaruje sa oba susedna rezonantna moda.

U petom poglavlju posebna pažnja posvećena je analizi rada pretvarača pri različitim kombinacijama električnog povezivanja ulaza. Primenom različitih redno-paralelnih kombinacija električnog povezivanja piezokeramičkih prstenova dodatno se usložnjava model pretvarača.

Modelovanjem različitih kombinacija električnog povezivanja ulaznih krajeva i upotrebom kratkospojnika potvrđeno je da na rezonantnu frekvenciju pretvarača pored promene dimenzija utiču i promene električnih graničnih uslova. Rezonantna frekvencija predloženih pretvarača u slučaju promene električnih graničnih uslova postaje promenljiva ili podesiva u određenom opsegu. Prikazanim analizama potvrđena je ispravnost i efikasnost upotrebe predloženih trodimenzionalnih modela pomoću kojih se sinteza pretvarača i ocena kvaliteta pojedinačnog pretvarača može brzo izvršiti, što ove modele čini pogodnim pri projektovanju snažnih ultrazvučnih pretvarača specifične namene.

Buduća istraživanja treba nastaviti u pravcu dalje analize prirode rezonantnih modova oscilovanja, posebno analize prirode spregnutih rezonantnih modova. Da bi se dalje analizirala priroda rezonantnih modova, potrebno je izvršiti adaptaciju predloženih trodimenzionalnih modela kompozitnih pretvarača kako bi se odredile komponente mehaničkih pomeraja tačaka sastavnih delova pretvarača u debljinskom i radijalnom pravcu oscilovanja. Preciznost adaptiranih trodimenzionalnih modela može se potvrditi poređenjem rezultata dobijenih simulacijama u programskom paketu Matlab/Simulink, i eksperimentalnim merenjima mehaničkih pomeraja pobuđenih kompozitnih pretvarača.

7 LITERATURA

- [1] L.Rayleigh, „Theory of Sound“, vol. 2, MacMillan & Co. Ltd. London, 1896.
- [2] K.S.Suslick, W.L.Nyborg, „Ultrasound: Its Chemical, Physical and Biological Effects“, Journal of The Acoustical Society of America, vol. 87, pp. 919-920, 1990.
- [3] G.Harvey, A.Gachagan, „Simulation and Measurement of Nonlinear Behavior in a High-Power Test Cell“, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 58, pp. 808-819, 2011.
- [4] T.J.Mason, „Sonochemistry“, Oxford Science Publications, 1999.
- [5] K.Gotoh, K.Harayama, „Application of ultrasound to textiles washing in aqueous solutions“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 20, pp. 747-753, 2013.
- [6] G.Mazue, R.Viennet, J.Hihn, L.Carpentier, P.Devidal, I.Albaïna, „Large-scale ultrasonic cleaning system: Design of a multi-transducer device for boat cleaning (20kHz)“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 18, pp. 895-900, 2011.
- [7] A.Yap, W.Bagnall, „High Power ultrasonics: a new and powerful tool for removing tartrate deposits and killing viable Brettanomyces cells in barrels“, Wine Industry Journal, vol. 25, pp. 29-39, 2009.
- [8] W.Kim, K.Park, J.Oh, J.Choi, H.Y.Kim, „Visualization and minimization of disruptive bubble behavior in ultrasonic field“, Ultrasonics, vol. 50, pp. 798-802, 2010.
- [9] A.Shoh, „Industrial Applications of Ultrasound - A Review I. High Power Ultrasound“, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol 22, pp. 60-71, 1975.
- [10] G.Harman, J.Albers, „The ultrasonic welding mechanism as applied to aluminium and gold wire bonding in microelectronics“, IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging. vol. 13, no. 4, pp. 406–412, 1977.

- [11] P.Harkness, M.Lucas, A.Cardoni, „Coupling and Degenerating Modes in Longitudinal-Torsional Step Horns“, *Ultrasonics*, vol. 52, no. 8, pp. 980-988, 2012.
- [12] S.Krüger, G.Wagner, D.Eifler, „Ultrasonic welding of metal/composite joints“, *Advanced engineering materials*, vol. 6, pp. 157-159, 2004.
- [13] J.M.Gibert, G.Fadel, M.F.Daqaq, „On the stick-slip dynamics in ultrasonic additive manufacturing“, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 19, pp. 4680-4695, 2013.
- [14] Y.Bar-Cohen, S.Sherrit, B.P.Dolgin, D.S.Pal, T.Peterson, J.Kroh, R.Krahe, „Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for in-situ planetary applications“, *Proc. SPIE* vol. 3992, *Smart Structures and Materials 2000: Active Materials: Behavior and Mechanics*, 2000.
- [15] Y.Bar-Cohen, S.Sherrit, B.P.Dolgin, X.Bao, C.Zensheu, D.S.Pal, R.Krahe, J.Kroh, S.Du, T.Peterson, „Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for planetary applications“, *Proc. SPIE* vol. 4327, *Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems*, 2001.
- [16] G.Preti, C.Peirolo, C.Russo, C.Manzanella, G.Schierano, „Biomolecular comparative analysis involved in oral implants: piezosurgery versus a drill technique“, in *Proceedings of the 25th Congresso Internazionale AIOP*, Bologna, 24-25 Novembre, no. P29, p. 58, Bologna, 2006
- [17] N.Aurette, D.Guyomar, C.Richard, P.Gonnard, L.Eyraud, „Nonlinear Behaviour of an Ultrasonic Transducer“, *Ultrasonics*, vol. 34, pp. 205-211, 1996.
- [18] M.C.Cartmell, „Introduction to Linear, Parametric and Nonlinear Vibrations“, Chapman and Hall, 1990.
- [19] T.J.Anderson, B.Balachandran, A.H.Nayfeh, „Observations of Nonlinear Interactions in a Flexible Cantilever Beam“, *33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Dallas, 13-15 April 1992, pp. 1678-1685, 1992.
- [20] F.C.N.Lim, M.P.Cartmell, A.Cardoni, M.Lucas, „A preliminary Investigation into Optimising the Response of Vibrating Systems used for Ultrasonic Cutting“, *Journal of Sound and Vibration*, vol 272, pp. 1047-1069, 2004.
- [21] M.Lucas, A.MacBeath, E.McCulloch, A.Cardoni, „A Finite Element Model for Ultrasonic Cutting“, *Ultrasonics*, vol. 44, pp. 503-509, 2006.
- [22] S.Harder, S.Wolfart, C.Mehl, M.Kern, „Performance of ultrasonic devices for bone surgery and associated intraosseous temperature development“, *The International journal of oral and maxillofacial implants*, vol. 24, pp. 484-490, 2009.

- [23] T.J.Mason, „Ultrasound in Synthetic Organic Chemistry“, Chemical Society Reviews, vol 26, pp. 443-451, 1997.
- [24] A.Gedanken, „Using sonochemistry for the fabrication of nanomaterials“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 11, pp. 47-55, 2004.
- [25] S.K.Khanal, M.Montalbo, J.H.Van Leeuwen, G.Srinivasan, D.Grewell, „Ultrasound enhanced glucose release from corn in ethanol plants“, Biotechnology and bioengineering, vol. 98, pp. 978-985, 2007.
- [26] T.J.Mason, „Sonochemistry and the environment—Providing a „green“ link between chemistry, physics and engineering“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 14, pp. 476-483, 2007.
- [27] R.T.Roberts, „High Intensity Ultrasonics in Food Processing“, Chemistry and Industry, vol 4, pp. 119-121, 1993.
- [28] F.Chemat, Z.E.Huma, M.K.Khan, „Application of ultrasound in food technology“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 18, no. 4, pp. 813-835, 2011.
- [29] P.Piyasena, E.Mohareb, R.C.McKellar, „Inactivation of microbes using ultrasound: a review“, International Journal of Food Microbiology, vol. 87, pp. 207-216, 2003.
- [30] H.Kiani, D.W.Sun, „Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review“, Trends in Food Science and Technology, vol. 22, no. 8, pp. 407-426, 2011.
- [31] J.Riener, F.Noci, D.A.Cronin, D.J.Morgan, J.G.Lyng, „A comparison of selected quality characteristics of yoghurts prepared from thermosonicated and conventionally heated milks“, Food Chemistry, vol. 119, pp. 1108-1113, 2010.
- [32] J.Mason, E.Joyce, S.S.Phull, J.P.Lorimer, „Potential uses of ultrasound in the biological decontamination of water“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 10, pp. 319-323, 2003.
- [33] N.N.Mahamuni, Y.G.Adewuyi, „Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for waste water treatment: A review with emphasis on cost estimation“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 17, pp. 990-1003, 2010.
- [34] 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.
- [35] D.Stansfield, „Underwater Electroacoustic Transducers“, Bath University Press, Bath, UK, 1991.
- [36] P.Langevin, French Patent Nos: 502913 (29.5.1920); 505703 (5.8.1920); 575435 (30.7.1924).

- [37] W.P.Mason, „Electromechanical transducers and wave filters“, Second edition, Van Nostrand, New York, 1948.
- [38] R.Krimholtz, D.A.Leedom, G.L.Matthaei, „New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers“, *Electronic Letters*, vol. 6, no. 13, pp. 398-399, 1970.
- [39] D.Mančić, G.Stančić, „New Three-dimensional Matrix Models of the Ultrasonic Sandwich Transducers“, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 12, pp. 63-80, 2010.
- [40] R.J.Urick, „Principles of Underwater Sound“, Peninsula Publishing, Los Alton, California, 1983.
- [41] F.V.Hunt, „Electroacoustics: The Analysis of Transduction, and its Historical Background“, John Wiley and Sons, New York, 1954.
- [42] A.Manbachi, R.S.C.Cobbold, „Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection“, *Ultrasound*, vol. 19, no. 4, pp. 187-196, 2011.
- [43] H.J.Pain, „The Physics of Vibrations and Waves“, 5th ed., John Wiley and Sons, Chichester, 1999.
- [44] A.J.Moulson, J.M.Herbert, „Electroceramics“, John Wiley and Sons, Chichester, 2003.
- [45] D.A.Berlincourt, D.R.Curran, H.Jaffe, „Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers“, in: Mason W.P., ed. *Physical Acoustics*, Academic Press, pp. 169-270, 1964.
- [46] M.Redwood, „Transient performance of a piezoelectric transducer“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 33, pp. 527-536, 1961.
- [47] C.H.Sherman, J.L.Butler, „Transducers and Arrays for Underwater Sound“, Springer, New York, 2007.
- [48] S.Sherrit, B.K.Mukherjee, „Characterisation of Piezoelectric Materials for Transducers“, arXiv:0711.2657v1 [cond-mat.mtrl-sci], pp. 1-45, 2007.
- [49] C.Chen, R.Zhang, Z.Wang, W.Cao, „Electromechanical coupling coefficient k_{eff}^{31} for arbitrary aspect ratio resonators made of [001] and [011] poled $(1-x)\text{Pn}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ single crystals“, *Journal of applied physics*, vol. 105, pp. 064104/1-4, 2009.
- [50] R.S.C.Cobbold, „Foundations of Biomedical Ultrasound“, Oxford University Press, NY, 2007.
- [51] M.Kim, J.Kim, W.Cao, „Experimental technique for characterizing arbitrary aspect ratio piezoelectric resonators“, *Applied Physics Letters*, vol. 89, no. 16, pp. 162910/1-3, 2006.

- [52] M.Radmanović, D.Mančić, „Efektivni elektromehanički faktor sprege piezokeramičkih prstenova”, IV Simpozijum Industrijska elektronika - INDEL 2002, Banja Luka, 14-15. novembar 2002, pp. 10-13, 2002.
- [53] J.D.B.Cheeke, „Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves“, CRC Press, FL, USA, 2002.
- [54] S.A.Morris, C.G.Hutchens, „Implementation of Mason’s model on circuit analysis programs“, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 33, no. 3, pp. 295-298, 1986.
- [55] I.Jovanović, Lj.Perić, U.Jovanović, D.Mančić, „Stressing Issue of a Piezoceramic Cantilever with Electrode Coatings and Transversal Polarization”, Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection, vol. 12, no. 1, pp. 123-137, 2015.
- [56] K.K.Wong, „Lithium Niobate“, Inspec, London, England, 2002.
- [57] G.F.Iriarte, J.G.Rodriguez, F.Calle, „Synthesis of c-axis oriented AlN thin films on different substrates: A review“, Materials Research Bulletin, vol. 45, no. 9, pp. 1039-1045, 2010.
- [58] A.C.S.Parr, R.O’Leary, G.Hayward, „Improving the thermal stability of 1-3 piezoelectric composite transducers“, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 52, pp. 550-563, 2005.
- [59] C.S.DeSilets, J.Fraser, G.S.Kino, „The design of efficient broadband piezoelectric transducers“, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. 25, no. 3, pp. 115-125, 1978.
- [60] A.Abdullah, M.Shahini, A.Pak, „An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer“, Journal of Electroceramics, vol. 22, pp. 369-382, 2009.
- [61] J.R.Frederick, „Ultrasonic Engineering“, Wiley, NewYork, 1965.
- [62] J.Randeraat, „Piezoelectric Ceramics“, Mullard, London, 1974.
- [63] M.Toda, „Ultrasonic Transducer Having Impedance Matching Layer“, US Patent no. 0027400, 2002.
- [64] H.Jaffe, D.A.Berlincourt, „Piezoelectric Transducer Materials“, Proceedings of the IEEE, vol. 53, no. 10, pp. 1372-1386, 1965.
- [65] R.S.Woollett, „Power Limitations of Sonic Transducers“, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. 14, no. 4, pp. 218-228, 1968.
- [66] M.Jevtić, „Sonohemijska sinteza i karakterizacija hidroksiapatita i poli(d,l-laktid-koglikolid)/hidroksiapatit kompozita“, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Fakultet

za fizičku hemiju, Beograd, 2008.

- [67] M.Radmanović, D.Mančić, „Projektovanje i modeliranje snažnih ultrazvučnih pretvarača“, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, 2004.
- [68] A.S.Peshkovsky, S.L.Peshkovsky, „Industrial-scale processing of liquids by highintensity acoustic cavitation-the underlying theory and ultrasonicequipment design principles“, in: Sonochemistry: Theory Reactions and Syntheses, and Applications, Nova Science publishers, Hauppauge, NY, 2010.
- [69] S.L.Peshkovsky, A.S.Peshkovsky, „Matching a transducer to water at cavitation:acoustic horn design principles“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 14, pp. 314-322, 2007.
- [70] A.S.Peshkovsky, S.L.Peshkovsky, „Acoustic cavitation theory and equipment design principles for industrial applications of high-intensity ultrasound“, in: Book Series: Physics Research and Technology, Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, 2010.
- [71] T.Stevenson, D.Martin, P.Cowin, A.Blumfield, A.Bell, T.Comyn, P.Weaver, „Piezoelectric materials for high temperature transducers and actuators“, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 26, pp. 9256-9267, 2015.
- [72] I.C.Rosca, S.T.Chiriacescu, N.C.Cretu, „Ultrasonic horns optimization“, Physics Procedia, vol. 3, no. 1, pp. 1033-1040, 2010.
- [73] E.Eisner, „Design of sonic amplitude transformers for high magnification“, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 35, pp. 1367-1377, 1963.
- [74] E.Eisner, „Methods and Devices“, Part B, vol. 1, Academic Press, New York, 1964.
- [75] A.Bangviwat, H.K.Ponnekanti, R.D.Finch, „Optimizing the performance of piezoelectric drivers that use stepped horns“, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 90, pp. 1223-1229, 1991.
- [76] K.Adachi, S.Ueha, „Modal vibration control of large ultrasonic tools with the use of wave-trapped horns“, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 87, pp. 208-214, 1990.
- [77] A.Cardoni, M.Lucas, „Enhanced vibration performance of ultrasonic block horns“, Ultrasonics, vol. 40, pp. 365-369, 2002.
- [78] J.A.Gallego-Juárez, G.Rodríguez, V.Acosta, E.Riera, „Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing“, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 17, pp. 953-964, 2010.
- [79] W.M.Rubio, F.Buiocchi, J.C.Adamowski, E.C.N.Silva, „Modeling of functionally graded piezoelectric ultrasonic transducers“, Ultrasonics, vol. 49, pp. 484-494, 2009.

- [80] J.Wu, Y.Mizuno, M.Tabaru, K.Nakamura, „Airborne ultrasonic transducer using polymer-based elastomer with high output-to-weight ratio“, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 8, pp. 087201, 2015.
- [81] L.G.Merkulov, A.B.Kharitinov, „Theory and analysis of sectional concentrators“, *Soviet physics. Acoustics*, vol. 5, pp. 183-190, 1959.
- [82] Z.Fu, X.Xian, S.Lin, C.Wang, W.Hua, G.Li, „Investigations of the barbell ultrasonic transducer operated in the full-wave vibrational mode“, *Ultrasonics*, vol. 52, no. 578-586, 2012.
- [83] S.Lin, „Optimization of the performance of the sandwich piezoelectric ultrasonic transducer“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, pp. 182-186, 2004.
- [84] S.Lin, C.Xu, „Analysis of the sandwich ultrasonic transducer with two sets of piezoelectric elements“, *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 6, pp. 065008, 2008.
- [85] S.Lin, „Study on the multifrequency Langevin ultrasonic transducer“, *Ultrasonics*, vol. 33, pp. 445-448, 1995.
- [86] H.Al-Budairi, M.Lucas, P.Harkness, „A design approach for longitudinal–torsional ultrasonic transducers“, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 198, pp. 99-106, 2013.
- [87] H.Kim, Y.Roh, „Design and fabrication of a wideband Tonpilz transducer with a void head mass“, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 239, pp. 137-143, 2016.
- [88] F.Bejarano, A.Feeney, M.Lucas, „A cymbal transducer for power ultrasonics applications“, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 210, pp. 182-189, 2014.
- [89] S.Lin, L.Xu, W.Hu, „A new type of high power composite ultrasonic transducer“, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, pp. 1419-1431, 2011.
- [90] D.G.Wayment, D.J.Casadonte, „Design and calibration of a single-transducer variable-frequency sonication system“, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 9, pp. 189-195, 2002.
- [91] R.Coates, R.F.Mathams, „Design of matching networks for acoustic transducers“, *Ultrasonics*, vol. 26, pp. 59-64, 1988.
- [92] D.Mančić, A.Kocić, V.Dimić, M.Radmanović, D.Stefanović, „Jedno rešenje elektronskog generatora za pobudu ultrazvučnih pretvarača“, *Zbornik XXXVII konferencije ETAN-a*, sv. II-E, Beograd, 20-23. septembar 1993, pp. 129-134, 1993.
- [93] W.J.Fry, R.B.Fry, W.Hall, „Variable resonant frequency crystal system“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 23, pp. 94-105, 1951.

- [94] G.A.Steel, B.V.Smith, B.K.Gazey, „Tunable sonar transducer“, *Electronics Letters*, vol. 22, pp. 758-159, 1986.
- [95] S.Yamamizu, N.Chubachi, „Ultrasonic transducer composed of two piezoelectric layers with variable weighting“, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 1, pp. 68–70, 1985.
- [96] H.A.B.Alwi, B.V.Smith, J.R.Carey, „Factors which determine the tunable frequency range of tunable transducers“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100, pp. 840-847, 1996.
- [97] S.C.Butler, F.A.Tito, „A broadband hybrid magnetostrictive piezoelectric transducer array“, *Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, 11-14 September 2000, vol. 3, pp. 1469-1475, 2000.
- [98] European Patent Application: 0 209 230 A2, Gould Inc., Stephen Thompson, Date of publication: 21.01.1987, Bulletin 87/04.
- [99] M.Prokić, „Piezoelectric transducers modeling and characterization“, MPI, Switzerland, 2004.
- [100] X.Long, „Investigation of a cup-shaped ultrasonic transducer operated in the full-wave vibrational mode“, *Ultrasonics*, vol. 59, pp. 109-118, 2015.
- [101] D.Mančić, I.Jovanović, M.Radmanović, Z.Petrušić, „Poređenje jednodimenzionalnih modela ultrazvučnih sendvič pretvarača“, XXII Konferencija sa međunarodnim učešćem „Buka i vibracije“, 20-22. oktobar 2010, Niš, pp. 119-127, 2010.
- [102] D.Leedom, R.Krimholtz, G.L.Matthaei, „Equivalent circuits for transducers having arbitrary even- or odd-symmetry piezoelectric excitation“, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 18, no. 3, pp. 128-141, 1971.
- [103] J.L.Dion, E.Cornieles, F.Galindo, K.Agbossou, „Exact one-dimensional computation of ultrasonic transducers with several piezoelectric elements and passive layers using the transmission line analogy“, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 44, no. 5, pp. 112031, 1997.
- [104] E.K.Sittig, „Transmission parameters of thickness-driven piezoelectric transducers arranged in multilayer configurations“, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 14, pp. 167–174, 1967.
- [105] P.E.Bloomfield, „Multilayer transducer transfer matrix formalism“, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1300-1311, 2002.

- [106] U.Jovanović, Lj.Perić, I.Jovanović, D.Mančić, „Analysys of longitudinal oscillations of Free prismatic piezoceramic beams”, 24th International Conference “Noise and Vibration”, Niš, Serbia, 29-31. October 2014, pp. 229 - 235, 2014.
- [107] T.L.Rhyne, „An improved interpretation of Mason’s model for piezoelectric plate transducers“, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. 25, no. 2, pp. 98-103, 1978.
- [108] S.Saitoh, H.Honda, N.Kaneko, M.Izumi, S.Suzuki, „The Method of Determining k_t and Q_m for low Q piezoelectric materials“, Proceedings of the IEEE Symposium on Ultrasonics, San Francisco, CA, pp. 620-623, 1985.
- [109] M.J.Zipparo, K.K.Shung, T.S.Shroud, „Piezoceramics for High Frequency (20-100 MHz) Single Element Imaging Transducers“, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 44, pp. 1038-1048, 1997.
- [110] Q.Zhang, P.A.Lewin, P.E.Bloomfield, „PVDF Transducers - A Performance Comparison of Single-Layer and Multilayer Structures”, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 44, pp. 1148-1156, 1997.
- [111] L.Spicci, M.Cati, „Design and Optimization of a High Performance Ultrasound Imaging Probe Through FEM and KLM Models“, COMSOL Conference, 1. July 2011, Stuttgart, pp. 1-9, 2011.
- [112] L.R.Goldberg, S.W.Smit, „Multilayer Piezoelectric Ceramics for Two-Dimensional Array Transducers”, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 41, no. 5, pp. 761-771, 1994.
- [113] G.E.Martin, „On the Theory of Segmented Electromechanical Systems“, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 36, no. 7, July 1964, pp. 1366-1370.
- [114] P.Derks, „The design of ultrasonic resonators with wide output cross-sections“, Doctoral dissertation, Technische Hogeschool Eindhoven, Eindhoven, 1984.
- [115] Q.Zhang, S.Shi, W.Chen, „An electromechanical coupling model of a longitudinal vibration type piezoelectric ultrasonic transducer”, Ceramics International, vol. 41, no. 1, pp. s638-s644, 2015.
- [116] H.Al-Budairi, M.Lucas, „An analytical model of a longitudinal-torsional ultrasonic transducer”, Journal of Physics: Conference Series, vol. 382, pp. 1-6, 2012.
- [117] F.Wang, H.Zhang, C.Liang, Y.Tian, X.Zhao, D.Zhang, „Design of High-Frequency Ultrasonic Transducers With Flexure Decoupling Flanges for Thermosonic Bonding“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 4, pp. 2304-2312, 2016.

- [118] A.Iula, N.Lamberti, M.Pappalardo, „An Approximated 3-D Model of Cylinder-Shaped Piezoceramic Elements for Transducer Design“, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 45, no. 4, pp. 1056-1064, 1998.
- [119] G.Hayward, D.Gillies, „Block Diagram Modeling of Tall, Thin Parallelepiped Piezoelectric Structures“, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 86, no. 5, pp. 1643-1653, 1989.
- [120] D.Mančić, M.Radmanović, „Piezoceramic Ring Loaded on Each Face: a Three-dimensional Approach“, Journal of Technical Acoustics, vol. 2, pp. 1.1-1.7, 2002.
- [121] S.Janković, P.Protić, K.Hedrih, „Parcijalne diferencijalne jednačine i integralne jednačine sa primenama u inženjerstvu“, Univerzitet u Nišu, Niš, 1999.
- [122] D.Bancroft, „The Velocity of Longitudinal Waves in Cylindrical Bars“, Physical Review, vol. 59, pp. 588-593, 1941.
- [123] D.Mančić, M.Radmanović, Z.Petrušić, „Trodimenzionalni matrični model metalnih prstenova i diskova“, Proc. 49th ETRAN Conference, Budva, June 5-10, 2005, Vol. II, 2005.
- [124] I.Malecki, „Physical Foundations of Technical Acoustics“, Pergamon Press, Oxford, 1969.
- [125] M.Prokić, M.Radmanović, K.Hedrih, „The Change of Electrical and Mechanical Resonant Characteristics under Conditions of Various Transducers Loads“, GAMM, Dubrovnik, 1-4. April 1985, pp. 1-24, 1985.
- [126] I.Jovanović, U.Jovanović, D.Mančić, „A Matlab/Simulink 3D Model of Unsymmetrical Ultrasonic Sandwich Transducers“, Serbian Journal of Electrical Engineering, vol. 15, no. 1, pp. 41-52, 2018.
- [127] I.Jovanović, U.Jovanović, D.Mančić, „A Matlab/Simulink Model of a Langevin's Ultrasonic Power Transducers“, 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETAN 2017, Serbia, Kladovo, 5-8 June 2017, Paper no. ELI3.5, pp. 1 - 5, 2017.
- [128] L.Chong-Mao, H.Li-Qi, Y.Chung-Fu, „Analysis of Broad-band Piezoelectric Sandwich Transducer with Perforated Structure“, Archives of Acoustics., vol. 9, no. 3, 1984, pp. 349-354, 1984.
- [129] D.Mančić, M.Radmanović, „Projektovanje snažnih ultrazvučnih sendvič pretvarača“, Elektronika-ETF Banjaluka, vol. 1, no. 1, pp. 66-69, 1997.
- [130] K.Hornišová, P.Billik, „Some properties of horn equation model of ultrasonic system vibration and of transfer matrix and equivalent circuit methods of its solution“,

- Ultrasonic, vol. 54, no. 1, pp. 330-342, 2014.
- [131] L.Shuyu, X.Long, H.Wenxu, „A new type of high power composite ultrasonic transducer“, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, no. 7, pp. 1419-1431, 2011.
- [132] E.A.Neppiras, „The Pre-stressed Piezoelectric Sandwich Transducer“, *Ultrasonic International Conference Proceedings*, London, England, 27-29. March 1973, pp. 295-302, 1973.
- [133] S.Sheritt, B.P.Dolgin, Y.Bar-Cohen, „Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Applications“, *IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, Caesars Tahoe, USA, 17-20. Oct. 1999, pp. 647-651, 1999.
- [134] T.Li, J.Ma, A.F.Low, „Horn-Type Piezoelectric Ultrasonic Transducer: Modelling and Applications“, In: *Advances in Piezoelectric Transducers*, Dr. Farzad Ebrahimi (ed.), 2011.
- [135] S.Y.Lin, „Ultrasonic Transducer Principle and Design“, Science Press, Beijing, 2004.
- [136] I.Jovanović, U.Jovanović, D.Mančić, „General One-Dimensional Model of a New Composite Ultrasonic Transducer“, *Proceedings of the 7th Small Systems Simulation Symposium 2018*, 12-14 February 2018, Niš, pp. 50-54, 2018.
- [137] I.Jovanović, D.Mančić, V.Paunović, M.Radmanović, Z.Petrušić, „A Matlab/Simulink Model of Piezoceramic Ring for Transducer Design“, *XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies - ICEST 2011*, Serbia, Niš, 29 June - 1 July 2011, vol. III, pp. 952-955, 2011.
- [138] I.Jovanović, D.Mančić, V.Paunović, M.Radmanović, V.Mitić, „Metal Rings and Discs Matlab/Simulink 3D Model for Ultrasonic Sandwich Transducer Design“, *Science of Sintering*, vol. 44, no. 3, pp. 287-298, 2012.
- [139] N.Ghouthi, J.Helbo, „Equivalent Circuit Modeling of a Rotary Piezoelectric Motor“, *IASTED International Conference on Modelling and Simulation*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 15-17. May, 2000.
- [140] N.Lamberti, A.Iula, M.Pappalardo, „The electromechanical coupling factor in static and dynamic conditions“, *Acustica*, vol. 85, no. 1, pp. 39-46, 1999.
- [141] A.Berlincourt, D.R.Curran, H.Jaffe, „Physical Acoustics: Principles and Methods“, Academic Press, New York, vol. 1, pt. A, p. 170, 1964.
- [142] M.Kim, J.Kim, W.Cao, „Aspect ratio dependence of electromechanical coupling coefficient of piezoelectric resonators“, *Applied Physics Letters*, vol. 87, no. 13, pp. 074102/1-3, 2005.

- [143] M.Kim, J.Kim, W.Cao, „Electromechanical coupling coefficient of an ultrasonic array element“, *Journal of Applied Physics*, vol. 99, no. 7, pp. 074102/1-6, 2006.
- [144] I.Jovanović, D.Mančić, U.Jovanović, M.Prokić, „A 3D model of new composite ultrasonic transducer“, *Journal of Computational Electronics*, vol.16, no. 3, pp.977-986, 2017.
- [145] N.Lamberti, A.Iula, R.Carotenuto, G.Caliano, M.Pappalardo, „The Electromechanical coupling factor for longitudinal and transverse propagation modes“, *Revista de Acústica*, XXXIII, pp. 8-13, 2002.
- [146] N.Lamberti, S.Sherrit, A.Iula, M.Pappalardo, „The computation of the k factor for lossy materials around resonance“, *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, vol. 1, pp. 1038-1043, 2003.
- [147] D.Mančić, „Modeliranje snažnih ultrazvučnih sendvič pretvarača“, *Doktorska disertacija*, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, 2002.
- [148] IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Standard No. 176-1987, Inst. of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1988.
- [149] O.Leigh-Ann, A.J.Mulholland, R.L.O’Leary, A.Parr, R.A.Pethrick, G.Hayward, „Theoretical modelling of frequency dependent elastic loss in composite piezoelectric transducers“, *Ultrasonics*, vol. 47, no. 1-4, pp. 130–137, 2007.
- [150] 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.
- [151] L.Shuyu, „Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers“, *Ultrasonics*, vol. 43, no. 5, pp. 365-373, 2005.
- [152] L.Yingxiang, C.Weishan, L.Junkao, S.Shengjun, „A cylindrical traveling wave ultrasonic motor using longitudinal and bending composite transducer“, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 161, no. 1-2, pp. 158-163, 2010.
- [153] L.Yingxiang, L.Junkao, C.Aweishan, „Cylindrical traveling wave ultrasonic motor using a circumferential composite transducer“, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 58, pp. 2397-2404, 2011.
- [154] L.Yingxiang, L.Junkao, C.Weishan, S.Shengjun, „A U-shaped linear ultrasonic motor using longitudinal vibration transducers with double feet“, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 59, pp. 981-989, 2012.
- [155] Q.Zhang, S.Shi, W.Chen, „An electromechanical coupling model of a bending vibration type piezoelectric ultrasonic transducer“, *Ultrasonics*, vol. 66, pp. 18-26. 2015.

- [156] X.Lu, J.Hu, H.Peng, Y.Wang, „A new topological structure for the Langevin-type ultrasonic transducer“, *Ultrasonics*, vol. 75, pp. 1-8. 2017.
- [157] F.Sammoura, K.Smyth, S.G.Kim, „An equivalent network representation of a clamped bimorph piezoelectric micromachined ultrasonic transducer with circular and annular electrodes using matrix manipulation techniques“, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 60, pp. 1989–2003, 2003.
- [158] F.Sammoura, S.G.Kim, „Theoretical modeling and equivalent electric circuit of a bimorph piezoelectric micromachined ultrasonic transducer“, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 59, no. 5, pp. 990-998, 2012.
- [159] S.Firas, A.Sina, L.Liwei, „An analytical solution for curved piezoelectric micromachined ultrasonic transducers with spherically shaped diaphragms“, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 61, no. 9, pp. 1533-1544, 2014.
- [160] Technical Publication TP-226, Morgan Electro Ceramics.

BIOGRAFIJA

Jovanović D. Igor je rođen 25.04.1983. godine u Nišu, Republika Srbija. Osnovnu školu „Rodoljub Čolaković“ u Malči kod Niša završio je 1998. godine, a srednju Elektrotehničku školu „Mija Stanimirović“ u Nišu na smeru Elektronika završio je 2002. godine sa odličnim uspehom, pri čemu je proglašen za učenika generacije. Iste godine dobio je pohvalnicu Kraljevskog Doma Karađorđevića za iskazani izvanredni uspeh u završenom srednjem obrazovanju. U toku školovanja, juna 2001. godine je osvojio drugo mesto na 43. Republičkoj smotri radova naučnog i umetničkog stvaralaštva talenata u Kladovu, u oblasti elektronike.

Godine 2002. upisao je Elektronski fakultet Univerziteta u Nišu, na smeru za Elektroniku. Studije je završio 2008. godine sa srednjom ocenom u toku studija 8,92. Diplomski rad pod nazivom „Integrirani sistem za upravljanje radom ergo-bicikla” odbranio je ocenom 10.

Doktorske studije na studijskom programu Elektronika i mikroracunarska tehnika Elektronskog fakulteta Univerziteta u Nišu upisao je 2008. godine. Bio je stipendista Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj od februara 2009. do decembra 2011. godine. Položio sve ispite predviđene programom doktorskih studija na pomenutom studijskom programu sa prosečnom ocenom 10.

Od aprila 2008. do marta 2010. godine je kao stipendista-doktorand učestvovao u realizaciji naučno-istraživačkih projekata finansiranih od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, trenutno učestvuje u realizaciji dva naučno-istraživačka projekta finansirana od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u oblasti obnovljivih izvora energije i ekologije.

Od 02.12.2011. godine zapošljen je na Elektronskom fakultetu u Nišu kao saradnik u nastavi a od 01.11.2013. godine kao asistent, i do sada je izvodio auditivne i laboratorijske vežbe iz sledećih predmeta: Elektronska kola za upravljanje elektroenergetskim pretvaračima, Osnovi

energetske elektronike, Izvori za napajanje, Termovizija, Ultrazvučna tehnika i Elektroenergetski pretvarači.

Autor je ili koautor 49 saopštenih ili štampanih radova u zbornicima, međunarodnim i domaćim časopisima, kao i 18 tehničkih realizacija.

Oženjen je i otac jednog deteta.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

NOVI KOMPOZITNI ULTRAZVUČNI PRETVARAČI VELIKE SNAGE

koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 07.06.2018. godine

Potpis autora disertacije:

Igor D. Jovanović

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I
ŠTAMPANOG OBLIKA DOKTORSKE
DISERTACIJE**

Naslov disertacije:

NOVI KOMPOZITNI ULTRAZVUČNI PRETVARAČI VELIKE SNAGE

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, 07.06.2018. godine

Potpis autora disertacije:

Igor D. Jovanović

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

NOVI KOMPOZITNI ULTRAZVUČNI PRETVARAČI VELIKE SNAGE

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (**CC BY**)

2. Autorstvo – nekomercijalno (**CC BY-NC**)

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (**CC BY-NC-SA**)

5. Autorstvo – bez prerade (**CC BY-ND**)

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (**CC BY-SA**)

U Nišu, 07.06.2018. godine

Potpis autora disertacije:

Igor D. Jovanović