

Analiza mehaničkih čimbenika pri konstrukciji uređaja za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša

Blažević, David

Doctoral thesis / Disertacija

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:736687>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

David Blažević

**ANALIZA MEHANIČKIH ČIMBENIKA PRI
KONSTRUKCIJI UREĐAJA ZA
PRIKUPLJANJE NISKORAZINSKE
ENERGIJE VIBRACIJA IZ OKOLIŠA**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2014.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

David Blažević

**ANALIZA MEHANIČKIH ČIMBENIKA PRI
KONSTRUKCIJI UREĐAJA ZA
PRIKUPLJANJE NISKORAZINSKE
ENERGIJE VIBRACIJA IZ OKOLIŠA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Saša Zelenika

Rijeka, 2014.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

David Blažević

**ANALYSIS OF MECHANICAL ASPECTS
IN THE DESIGN OF VIBRATION
ENERGY HARVESTERS**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2014.

Mentor rada: prof. dr. sc. Saša Zelenika

Doktorski rad obranjen je dana _____ na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. prof. dr. sc. Dubravka Siminiati, mag. ing. mech., predsjednik
2. prof. dr. sc. Saša Zelenika, mag. ing. mech., mentor, član
3. prof. dr. sc. Nenad D. Pavlović, dipl. ing., član,
(Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, Srbija)

„Vjerujem da ništa ne znamo zasigurno, ali i da sve znamo vjerojatno.“

— Christiaan Huygens u pismu Pierre Perraultu 1673. godine.

Zahvale

Prije svega, htio bih se zahvaliti svom mentoru prof. dr. sc. Saši Zeleniki koji mi je ponudio ovu zanimljivu temu istraživanja te svojim znanjem, vođenjem i podrškom omogućio nastajanje ovog rada. Nadalje, zahvalio bih kolegama sa Zavoda za konstruiranje u strojarstvu na sugestijama, a u vidu pomoći i podrške ovom istraživanju bih svakako naglasio doprinos kolege Ervina Kamenara tijekom rada na projektu BAST/SAV i kolege dr. sc. Gorana Gregova pri razvoju pojedinih eksperimentalnih postava. Većina mjerenja izvedenih na Fakultetu ne bi bila moguća bez stručne pomoći (i posuđene opreme) profesora sa zavoda za Tehničku mehaniku: prof. dr. sc. Roberta Žigulića, prof. dr. sc. Marka Čanađije i izv. prof. dr. sc. Sanjina Brauta. Glavnina eksperimentalnih rezultata korištenih u radu proizašla je iz suradnje s Laboratorijem za Mehaniku, Sveučilišta u Udinama, pa bih ovim putem zahvalio prof. dr. sc. Dennisu Benasciuttu i Lucianu Moru na savjetima i udijeljenom znanju. Nastajanje numeričkog modela je u ključnim trenucima potpomognuto znanjem prof. Lihue Tanga sa Sveučilišta u Aucklandu.

Zahvalu upućujem i Tehničkoj službi Fakulteta na račun brojnih posudbi alata i pomoći oko prilagodbi Laboratorija, Nevenki na vrhunskom crnom humoru koji razbija uredsku rutinu, Radojki na birokratskoj ekspeditivnosti, Ireni iz La Tappe na macchiatu koji ne zakazuje, živopisnoj ekipi joga Banderovo na svakodnevnom uvidu u stvarnost, Gabrijeli 'Gabi-San' Tkalec na osamljenom uredu i svemu nužnom za nastajanje ovog rada kao i Viktoru Tkalecu na razbijanju 'umnih miogelozu'.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj ženi amazonki Dori Tkalec koja je zajedno s Ladom izdržala ovaj na trenutke izluđujući period nastajanja disertacije i koja me bezrezervno podržava u odigravanju svih životnih uloga. Volim vas rudlavci.

Konačno, ovaj rad posvećujem svojim roditeljima Lidiji Jenko i Hrvoju Blaževiću kao zahvalu za svu ljubav i znanje koje su mi pružili.

Sažetak

Doktorska disertacija posvećena je karakteriziranju uređaja za pretvorbu niskorazinske kinetičke energije vibracija i eksperimentalnom ispitivanju čimbenika koji utječu na konstrukciju piezoelektričnih uređaja za prikupljanje vibracijske energije iz okoliša i konverziju iste u električnu energiju. Pritom se u radu uzimaju u obzir različite dimenzije uređaja, i frekvencijski raspon odziva radi ostvarivanja što veće izlazne snage. Posebice su opisani i analitički i numerički (MKE) modeli te različiti učinci koji proizlaze iz elektromehaničke sprege piezoelektričnih materijala s vibrirajućim strukturama. Poseban naglasak stavljen je na razvoj eksperimentalnih metoda za klasificiranje navedenih uređaja te na patentirano inovativno konstrukcijsko rješenje uređaja s potencijalnom primjenom na pneumaticima automobilskih vozila.

Abstract

This thesis has as its main goal a thorough analytical, numerical and experimental characterization of piezoelectric energy harvesting devices. The process of collecting low level ambient energy and its conversion into electric energy is commonly termed energy harvesting or energy scavenging. In order to maximise output power, different configurations and eigenfrequency bands are taken into account. Hereby presented work includes a detailed state art analysis of energy harvesting technologies, numerical implementation of analytical models presented in literature, an original FEM model of a piezoelectric bimorph structure with large deformation effects included and a comprehensive comparison of dynamics experiments with the implemented analytical and numerical models. The developed experimental set-ups, used to classify the mechanical aspects of proposed devices, are explained in detail together with a patented solution for future use in automobile pneumatics.

Ključne riječi

Ključne riječi:

- Prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša
- Kinetička energija vibracija
- Spregnuta analiza
- Euler-Bernoulli teorija grede
- Piezoelektrični efekt

Key words:

- Energy scavenging
- Vibrational kinetic energy
- Coupled analysis
- Euler-Bernoulli beam theory
- Piezoelectric effect

Sadržaj

| | |
|---|----|
| Popis simbola | 1 |
| 1. Uvod..... | 7 |
| 2. Analiza stanja tehnike na polju istraživanja i primjene koncepata prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša..... | 9 |
| 2.1 Prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša: motivacija, koncepti i primjene | 11 |
| 2.2 Primjene koncepata žetve energije | 15 |
| 2.3 Koncept fotonaponske pretvorbe..... | 17 |
| 2.4 Koncept termoelektrične pretvorbe | 19 |
| 2.5 Koncept pretvorbe radiofrekvencija – RFID..... | 22 |
| 2.6 Koncepti pretvorbe kinetičke energije..... | 24 |
| 2.6.1 Elektrostatički koncept..... | 26 |
| 2.6.2 Elektromagnetski koncept..... | 28 |
| 2.6.3 Piezoelektrični koncept | 31 |
| 2.6.3.1 Piezoelektrični efekt i piezoelektrični materijali | 31 |
| 2.6.3.2 Piezoelektrične konstante i temeljne jednadžbe piezoelektričnosti..... | 34 |
| 2.6.3.3 Izvedbe pretvarača temeljenih na piezoelektričnom konceptu..... | 36 |
| 2.7 Pregled radova na polju korištenja piezoelektričnog efekta kod prikupljanja niskorazinske kinematičke energije vibracija iz okoliša | 40 |
| 2.7.1 Pregled analitičkih modela i eksperimentalnih istraživanja..... | 40 |
| 2.7.2 Numeričko modeliranje piezoelektričnih konzola | 43 |
| 3. Modeliranje konzolnih piezoelektričnih uređaja za žetvu energije..... | 46 |
| 3.1 Savojsne vibracije konzole..... | 48 |
| 3.1.1 Euler-Bernoullijeva jednadžba savijanja konzole | 49 |
| 3.1.2 Problem vlastitih vrijednosti sustava pri slobodnim vibracijama: separacija domene vremena i domene prostora..... | 51 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1.3 | Rješenje problema vlastitih vrijednosti konzole s graničnim uvjetima koji uključuju koncentriranu masu | 53 |
| 3.2 | Spregnuti modalni model s distribuiranim parametrima | 56 |
| 3.2.1 | Pretpostavke modela i konfiguracija bimorfa | 56 |
| 3.2.2 | Spregnuti elektromehanički model i analiza vlastitih vrijednosti bimorfne konzole | 58 |
| 3.2.3 | Spregnuta jednadžba električnog kruga za tanki piezoelektrični sloj u uvjetima dinamičkog savijanja..... | 64 |
| 3.2.4 | Serijski spoj piezoelektričnih slojeva..... | 66 |
| 3.2.5 | Elektromehaničke funkcije frekvencijskog odziva pri jednoj ili više frekvencija | 70 |
| 3.3 | Implementacija modela u MATLAB programskom paketu..... | 72 |
| 3.3.1 | Postupak modeliranja | 72 |
| 3.3.2 | Postavke modela, geometrija konzole i svojstva materijala..... | 74 |
| 3.3.3 | Proračun izraza ekvivalentne savojne krutosti | 75 |
| 3.3.4 | Analiza vlastitih vrijednosti konzole..... | 77 |
| 3.3.5 | Simuliranje naponskog odziva piezoelektričnog bimorfa | 78 |
| 4. | Modeliranje piezoelektrične bimorfne konzole metodom konačnih elemenata..... | 91 |
| 4.1 | Analiza i odabir tipa konačnih elemenata..... | 93 |
| 4.1.1 | Strukturni konačni elementi s piezoelektričnim mogućnostima | 94 |
| 4.1.2 | Strukturni konačni elementi za modeliranje supstrata i utega..... | 95 |
| 4.1.3 | Konačni elementi za modeliranje električnog otpora..... | 96 |
| 4.2 | Modeliranje bimorfne piezoelektrične konzole..... | 97 |
| 4.2.1 | Početne postavke sustava | 98 |
| 4.2.2 | Modeliranje konzole..... | 98 |
| 4.2.3 | Umrežavanje elemenata | 99 |
| 4.2.4 | Uspostavljanje elektromehaničke sprege | 101 |
| 4.3 | Analiza vlastitih vrijednosti..... | 102 |
| 4.4 | Spregnuta harmonijska analiza..... | 104 |
| 4.5 | Spregnuta tranzijentna analiza..... | 112 |
| 4.5.1 | Definiranje harmonijske uzbude uklještenja | 112 |
| 4.5.2 | Postavke analize | 113 |
| 4.5.3 | Rezultati | 115 |
| 5. | Eksperimenti i usporedbe s teorijskim modelima | 118 |
| 5.1 | Midé piezoelektrične konzole..... | 118 |
| 5.2 | Utvrđivanje mehaničkih svojstava piezoelektričnih Midé konzola..... | 123 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.2.1 | Eksperimentalno utvrđivanje modula elastičnosti..... | 123 |
| 5.2.2 | Eksperimentalno određivanje koeficijenta mehaničkog prigušenja..... | 131 |
| 5.2.3 | Eksperimentalni postav za mjerenje dinamičkog odziva | 138 |
| 5.2.3.1 | Temeljne postavke eksperimenta | 138 |
| 5.2.3.2 | Eksperimentalni postav u Laboratoriju za mehaniku na Sveučilištu u Udinama | 139 |
| 5.2.3.3 | Eksperimentalni postav u Laboratoriju za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci..... | 143 |
| 5.3 | Usporedba eksperimenata i modela | 147 |
| 5.3.1 | Svojstva materijala Midé konzole | 150 |
| 5.3.2 | ANSYS model Midé piezoelektrične konzole | 150 |
| 5.3.3 | Usporedba analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata | 152 |
| 6. | Primjena uređaja za pretvorbu niskorazinske energije vibracija iz okoliša – originalno rješenje sustava za bežično mjerenje tlaka u automobilskim pneumaticima | 163 |
| 6.1 | Mjerenja i analiza vibracija u okolini automobilskog kotača..... | 165 |
| 6.2 | Arhitektura sustava za bežično autonomno motrenje tlaka u automobilskim pneumaticima | 169 |
| 6.3 | Piezoelektrični bimorfni pretvarač | 169 |
| 6.4 | Uklještenje konzole | 171 |
| 6.5 | Elektronika za upravljanje prikupljenom energijom | 172 |
| 6.6 | Mjerni modul s odašiljačem | 173 |
| 6.7 | Laboratorijski eksperimenti | 175 |
| 6.7.1 | Količina energije potrebna za napajanje sustava..... | 175 |
| 6.7.2 | Izbor pasivnih elemenata za upravljačku elektroniku | 177 |
| 6.7.3 | Laboratorijski eksperimenti na konačnoj izvedbi sustava..... | 179 |
| 6.8 | Eksperimenti u realnim uvjetima na prometnici..... | 182 |
| 6.9 | Samoregulirajući autonomni ventil - SAV | 184 |
| 6.9.1 | Kratki opis predložene tehnologije | 184 |
| 6.9.2 | Stanje tehnike | 185 |
| 6.9.3 | Suština izuma | 185 |
| 6.9.4 | Razrada komponenata sustava | 187 |
| 6.9.5 | Opis rada sustava s jednosmjernom mikropumpom | 192 |
| 6.9.6 | Opis rada sustava s dvosmjernom mikropumpom | 194 |
| 7. | Zaključak..... | 196 |
| | Literatura | 199 |
| | Popis slika | 207 |
| | Popis tablica | 215 |

| | |
|---|-----|
| Prilozi | 216 |
| A. MATLAB implementacija analitičkog modela opisanog u 3. poglavlju | 216 |
| B. ANSYS APDL kod korišten u 4. poglavlju..... | 222 |
| B.1 Harmonijska analiza | 222 |
| B.2 Tranzijentna analiza..... | 228 |
| Životopis..... | 231 |
| Popis objavljenih radova | 232 |

Popis simbola

| | | |
|------------------|---|--|
| A | – | površina elektrode, m^2 |
| A_{\max} | – | maksimalna amplituda ubrzanja, m |
| a | – | ubrzanje, m/s^2 |
| b | – | širina konzole, m |
| $b_{FR_{eq}}$ | – | modificirana širina FR4 sloja, m |
| $b_{P_{eq}}$ | – | modificirana širina piezoelektričnog sloja, m |
| $b_{ES_{eq}}$ | – | modificirana širina ESPANEX sloja, m |
| b^* | – | modificirana širina konzole, m |
| C | – | modalna amplituda |
| C_{IN} | – | kapacitet ulaznog kondenzatora, F |
| C_{OUT} | – | kapacitet izlaznog kondenzatora, F |
| $C_{\bar{p}}$ | – | unutarnji kapacitet piezoelektričnog sloja, nF |
| C_r | – | konstanta modalne amplitude, |
| \bar{c}_{11}^E | – | modul elastičnosti piezokeramičkog sloja napregnutog i polariziranog u smjeru '1' pri konstantnom električnom polju, N/m^2 |
| c_a | – | koeficijent viskoznog prigušenja zrakom, Ns/m |
| c_s | – | koeficijent unutarnjeg prigušenja, Ns/m |
| D_3 | – | električni pomak (odnosno gustoća naboja) u smjeru '3', C/m^2 |
| d_{31} | – | konstanta piezoelektričnog naboja, za induciranu polarizaciju u smjeru '3' po jedinici naprezanja u smjeru '1', C/N |
| d | – | debljina ploče, m |

| | | |
|-----------------------|---|--|
| E | – | Youngov modul elastičnosti, N/m ² |
| E_{FR4} | – | Youngov modul elastičnosti FR4 sloja, N/m ² |
| E_{ES} | – | Youngov modul elastičnosti ESPANEX sloja, N/m ² |
| E_P | – | Youngov modul elastičnosti piezoelektričnog sloja, N/m ² |
| $E_{\bar{s}}$ | – | Youngov modul elastičnosti supstrata, N/m ² |
| \mathcal{E}_3 | – | električno polje u smjeru '3', N/C |
| \bar{e}_{31} | – | konstanta piezoelektričnog naprezanja, C/m ² |
| EI | – | krutost pri savijanju, svojna krutost, Nm ² |
| $F(t)$ | – | vremenski promjenjiva amplituda vlastitih oblika, m |
| F_r | – | amplituda uzbudne sile, N |
| f_1 | – | početna uzbudna frekvencija, Hz |
| f_2 | – | krajnja uzbudna frekvencija, Hz |
| $f(t)$ | – | funkcija poprečne sile, uzbudne sile, N |
| $f_r(t)$ | – | vremenski ovisan iznos uzbudne sile za r -ti oblik vibriranja, N |
| $g(t)$ | – | vertikalna translacija baze tj. uklještenja, m |
| h | – | ukupna debljina konzole, m |
| $h(t)$ | – | rotacija oko baze tj. uklještenja, rad |
| h_{Cu} | – | debljina bakrenog sloja (elektrode), m |
| h_{ES} | – | debljina ESPANEX sloja, m |
| h_{FR4} | – | debljina FR4 sloja, m |
| h_P | – | debljina PZT sloja, m |
| $h_{\bar{p}}$ | – | debljina piezoelektričnog sloja, m |
| $h_{\bar{p}c}$ | – | udaljenost između neutralne osi i središta piezoelektričnog sloja, m |
| $h_{\bar{s}}, h_{ss}$ | – | debljina supstrata, m |

| | | |
|------------|---|---|
| I | – | moment tromosti poprečnog presjeka za os z , m^4 |
| I_A , | – | momenti tromosti poprečnog presjeka modificiranog sloja, m^4 |
| I_C | – | momenti tromosti poprečnog presjeka modificiranog sloja, m^4 |
| I_D | – | momenti tromosti poprečnog presjeka modificiranog sloja, m^4 |
| I_{TPMS} | – | Električna struja u sustavu za mjerenje tlaka u automobilskim gumama, A |
| I_t | – | moment tromosti vršne mase, $kg \cdot m^2$ |
| $i_p(t)$ | – | strujni izvor – piezoelektrik, A |
| k_{31} | – | faktor elektromehaničkog sprežanja |
| k_w | – | geometrijski faktor ovisan o omjeru L_y/L_x , |
| L | – | duljina sloja supstrata i piezoelektrika, m |
| L | – | zavojnica, μH |
| L_x | – | duljina ploče između oslonaca, m |
| L_y | – | širina ploče, m |
| M | – | moment savijanja, Nm |
| M_t | – | vršna masa, težina utega postavljenog na slobodnom kraju konzole, g |
| m | – | masa po jedinici duljine, kg/m |
| N | – | faktor definiran kao $N = d^3 \cdot E / 12$, Nm |
| n | – | jedinična normala vektora gustoće naboja |
| P | – | sila opterećenja, N |
| P_{LOAD} | – | snaga na trošilu, W |
| P_{max} | – | maksimalna snaga, W |
| P_{sr} | – | prosječna snaga, W |
| P_T | – | snaga na trošilu, W |

| | |
|----------------------|---|
| $P_{TPMS}(t_{TPMS})$ | – električna snaga za vrijeme mjerenja i odašiljanja vrijednosti tlaka, mW |
| Q | smična sila, N |
| R_l | otpor trošila, Ω |
| S_1 | – deformacija u smjeru '1', m/m |
| s_{11}^E | – koeficijent podatljivosti piezoelektričnog materijala za naprezanje i deformaciju u smjeru '1', mjeren pri konstantnom električnom polju, m^2/N |
| T_1 | – komponenta naprezanja u smjeru '1', N/m^2 |
| $T_1^{\bar{p}}$ | – komponenta naprezanja u piezokeramici, N/m^2 |
| $T_1^{\bar{s}}$ | – komponenta naprezanja u supstratu, N/m^2 |
| T_d | – period prigušenih titraja, s |
| t_{LOAD} | – vremenski interval rada elektroničke komponente, s |
| t_n | – vrijeme n-tog maksimuma, s |
| t_{TPMS} | – vrijeme trajanja bežične transmisije, s |
| V_{IN} | – ispravljeni ulazni napon, V |
| V_{R_RMS} | – prosječni napon na otporniku za vrijeme mjerenja i odašiljanja vrijednosti tlaka, V |
| V_{TPMS} | – vrijednost napona na trošilu – mjerno/komunikacijskom uređaju, V |
| $V_{UVLOFALLING}$ | – granični iznos napona pri kojem se gasi uzlazno-silazni pretvarač, V |
| $v(t)$ | – naponski odziv na radnom trošilu, V |
| $v_p(t)$ | – naponski odziv na radnom trošilu serijskog spoja piezoelektrika, V |
| $v_s(t)$ | – naponski odziv na radnom trošilu paralelnog spoja piezoelektrika, V |
| W_0 | – translacijski pomak baze, m |
| w | – progib, m |

| | | |
|-----------------------------|---|---|
| w_b | – | pomak uklještenja, m |
| w_{rel} | – | relativni pomak konzole u odnosu na uklještenje, m |
| $Y_0 e^{-\xi \omega_n t_n}$ | – | promjenjiva amplituda osciliranja u funkciji vremena, m |
| y | – | poprečni pomak, m |
| y_n | – | pomak pri n-tom periodu, m |
| $Z(x)$ | – | vlastiti profil, oblik ili konfiguracija u ovisnosti o prostornoj varijabli x |
| α | – | množitelj matrice masa |
| α_s | – | amplituda napona u ovisnosti o translaciji uklještenja, N |
| $ \alpha_s _{RMS}$ | – | apsolutna prosječna amplituda napona u ovisnosti o translaciji uklještenja, N |
| $ \alpha_s _{max}$ | – | apsolutna maksimalna amplituda napona u ovisnosti o translaciji uklještenja, N |
| β | – | množitelj matrice krutosti |
| β^A | – | pomoćna veličina |
| δ | – | logaritamski dekrement |
| $\delta(x)$ | – | Diracova delta funkcija |
| δ_{rs} | – | Kronecker delta funkcija |
| ε | – | permitivnost, F/m |
| ε_{33}^S | – | komponenta permitivnosti pri konstantnoj deformaciji u smjeru '3', F/m |
| ε_{33}^T | – | električna permitivnost mjerena pri konstantnom naprezanju u smjeru '3', F/m. |
| ζ | – | faktor mehaničkog prigušenja |
| η | – | faktor iskoristivosti uzlazno-silaznog pretvarača |
| η | – | faktor transformacije materijala |
| $\eta_r^s(t)$ | – | dinamički mehanički odzivi za serijski spoj, m |

| | | |
|------------------|---|---|
| $\eta_r^p(t)$ | – | dinamički mehanički odzivi za paralelni spoj, m |
| θ_0 | – | zakretanje baze, rad |
| \mathcal{G}_s | – | koeficijent povratne sprege za serijski spoj piezoelektrika |
| κ_r | – | modalno sprezanje |
| λ_r | – | vlastite vrijednosti r -tog oblika vibriranja |
| μ_s | – | amplituda napona u ovisnosti o rotaciji uklještenja, N |
| $\rho_{\bar{p}}$ | – | gustoća piezokeramike, kg/m ³ |
| $\rho_{\bar{s}}$ | – | gustoća supstrata, kg/m ³ |
| σ_r | – | translacijska komponenta amplitude amplitude modalne prisile |
| τ_r | – | rotacijska komponenta amplitude amplitude modalne prisile |
| ϕ | – | fazni kut, rad |
| $\phi_r(x)$ | – | vlastita funkcija r -tog oblika vibriranja |
| $\phi_s(x)$ | – | vlastita funkcija s -tog oblika vibriranja |
| χ_r^s | – | elektromehaničko sprezanje, |
| ω | – | kružna frekvencija osciliranja, s ⁻¹ |
| ω_n | – | vlastita kružna frekvencija sustava, s ⁻¹ |
| ω_d | – | kružna frekvencija prigušenja jednaka $\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, s ⁻¹ |
| ω_r^2 | – | kvadrat kružne frekvencije osciliranja pri r -tom obliku, s ⁻² |

1. Uvod

U trenutnom periodu tehnološkog razvoja svjedočimo intenzivnoj integraciji prijenosne potrošačke elektronike i bežičnih komunikacijskih mreža u svakodnevnom okruženju. Ova integracija omogućena je konstantnim napretkom na polju digitalnih procesora koji postaju sve snažniji i manji, dok u isto vrijeme svaka nova generacija uređaja troši manje energije za uobičajeni rad od prethodne. Kako bi ova integracija postala sveobuhvatna tj. kako bilo moguće u svakom trenutku biti povezan sa svojim okruženjem i pratiti stanja okoline radi povećanja učinkovitosti svakodnevnog djelovanja i održavanja višeg stupnja sigurnosti okoliša, u posljednje vrijeme ulažu se znatni naponi u proučavanje koncepta mreža bežičnih senzora. Prijenosna tehnologija povezana je, doduše, s visokom cijenom. Za pogon se većinom koriste punjivi, ali konačni spremnici energije – baterije. Tehnologija baterija ne pokazuje značajan napredak u vidu većih kapaciteta, manjih dimenzija i povećanja ciklusa punjenja i pražnjenja, a već sada predstavlja značajan rizik za okoliš (kroz izvlačenje elemenata iz prirode, npr. litija iz oceana, ali i kroz nepropisno odlaganje u okoliš). S intenzivnijom integracijom mreža bežičnih senzora vrlo brzo bi se povećao broj baterija koje služe za napajanje glavnih dijelova bežičnih mreža, minijaturnih osjetnika u našoj okolini. Kako bi se doskočilo ovom problemu, u posljednjih petnaest godina, a na temelju spomenutog napretka na polju digitalnog procesiranja, znanstvenici su pojačali istraživanje konceptata koji bi omogućili da navedeni uređaji postaju neovisni, tj. da ne koriste konačne spremnike energije za svoj rad. Ovo polje istraživanja naziva se *energy harvesting* tj. prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša i kao glavnu zadaću ima proučavanje metoda za pretvaranje sveprisutnih izvora energije iz okoliša u električnu energiju.

Ova disertacija posvećena je spomenutom polju istraživanja s naglaskom na pretvaranje niskorazinske kinetičke energije vibracija iz okoline u električnu energiju uz pomoć piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični koncept žetve energije predstavlja jedan od glavnih izvora niskorazinske energije za pogon autonomnih uređaja u slučajevima kada je nemoguće koristiti daleko elegantniji fotonaponski koncept tj. energiju Sunca. Uređaji koji su najčešće korišteni za piezoelektričnu pretvorbu vibracija izvode se kao inercijalni generatori: ukliještena konzola od piezoelektričnog materijala postavlja se u vibracijsko okruženje te počinje prisilno

oscilirati. Na temelju prirodnih svojstava piezoelektričnih materijala, progib konzole pretvara se u električni napon putem mehanizma piezoelektričnog efekta. Ovako dobivena električna energija je izmjenična i mora se pravilno ispravljati i potom pohranjivati za napajanje elektroničkih komponenata.

Za pobliže upoznavanje s navedenim konceptima, u drugom poglavlju dat je pregled najčešće istraživanih koncepata pretvorbe energije iz okoline s posebnim osvrtom na piezoelektričnu žetvu i piezoelektrični efekt kao osnovni mehanizam pretvorbe vibracija u električnu energiju. Treće poglavlje posvećeno je analitičkim modelima kojima će se simulirati ponašanje uređaja temeljenog na predloženom konceptu pretvorbe, a radi ostvarivanja mogućnosti predviđanja maksimalne snage dostupne iz inercijskog sustava pretvorbe. U četvrtom poglavlju razvijen je numerički model metodom konačnih elemenata koji omogućuje simuliranje različitih konfiguracija uređaja koje nije moguće analitički modelirati, a samim time i razvoj novih klasa uređaja za pretvorbu. Peto poglavlje bavi se razvitkom eksperimentalnih metoda za karakteriziranje uređaja za piezoelektričnu pretvorbu, ali i direktnom usporedbom analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata. U posljednjem, šestom poglavlju predstavljeno je originalno prototipno rješenje uređaja za autonomno bežično praćenje tlaka u automobilskim gumama te uređaj za autonomno održavanje tlaka u gumama cestovnih vozila, a koji je trenutno u procesu patentnog ispitivanja za potpunu patentnu zaštitu u RH. U priložima se nalaze u radu korišteni programski kodovi analitičkih i numeričkih metoda.

2. Analiza stanja tehnike na polju istraživanja i primjene koncepata prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša

U uvodu ovog poglavlja opisani su koncepti i tehnologije korištene u području prikupljanja niskorazinske energije iz okoline s naglaskom na piezoelektrični koncept pretvorbe. Kraj poglavlja sadrži pregled najvažnijih znanstvenih radova iz područja piezoelektričnog prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša.

Proces prikupljanja energije niže razine¹ iz okoline koja okružuje sustav te konverzije iste u električnu energiju uobičajeno se u stranoj literaturi naziva „žetvom energije“ [Kazmierski i Beeby, 2011.]. Motivacija za istraživanje koncepata prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša počiva na povijesti ljudskog nastojanja iskorištavanja obnovljivih izvora energije na makro razini (vodeno kolo – Egipat, 4. st. pr.n.e., vjetrenjača – Heron iz Aleksandrije, 1. stoljeće). Tehnologije i materijali za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša danas čine multidisciplinarno istraživačko područje koje se ubrzano razvija kako u znanstvenom tako i u industrijskom pogledu, a sve zahvaljujući znatnom napretku na području bežične sensorike i MEMS tehnologija (engl. *Micro-Electro-Mechanical Systems*) [Torah et al., 2008.]. Pritom u stručnoj literaturi treba razlikovati raširene pojmove *energy harvesting* i *energy scavenging*. Pod prvim se pojmom podrazumijeva iskorištavanje slobodno dostupne energije koja je produkt fizikalnih procesa na planetu i u Sunčevom sustavu (sunce, vjetar, tekuća voda, mjesečeve mijene) dok se pod drugim podrazumijeva djelomično recikliranje otpadne² energije elektromehaničkih sustava pogonjenih vanjskim izvorima energije kao što su npr. obradni

¹ Reda veličine $\mu\text{W} - \text{mW}$.

² Pod „otpadnom energijom“ podrazumijevaju se, primjerice, vibracije i temperaturni gradijenti nastali za vrijeme rada strojeva.

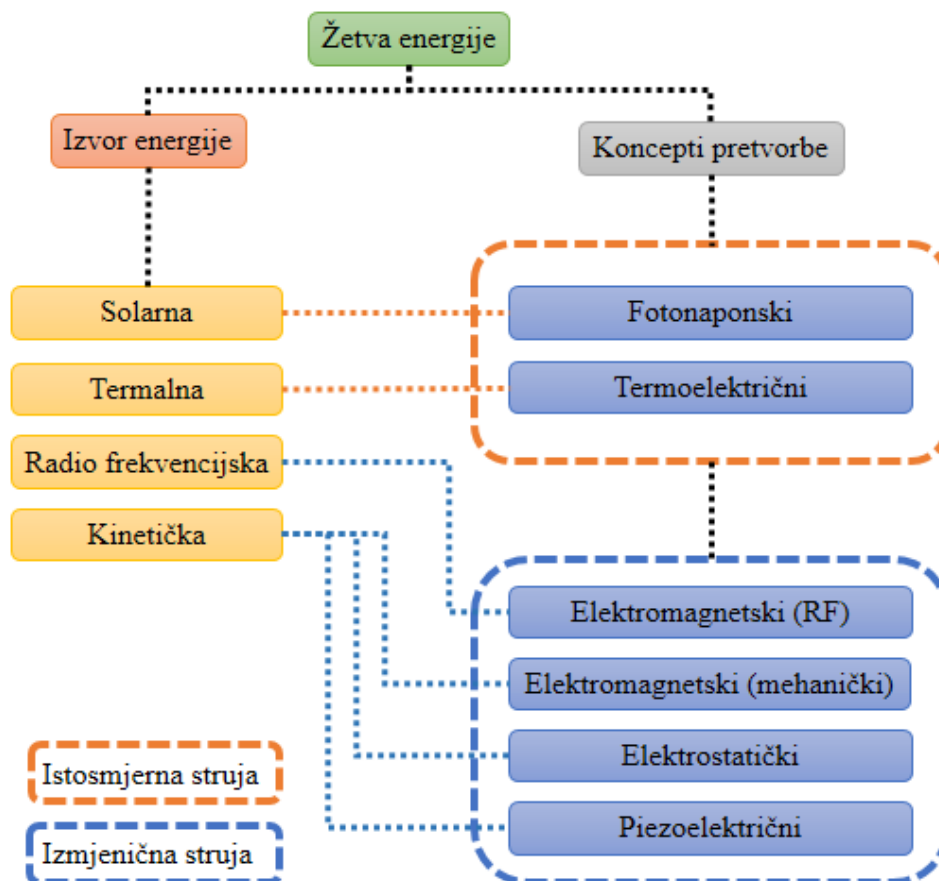
strojevi, prijevozna sredstva i ljudska aktivnost [Shahruz, 2006.]. Posljednje navedeno spada u posebnu kategoriju ove tehnologije usmjerene ka pogonjenju nosivih tehnologija (engl. *wearable technology*) pod kojima se podrazumijevaju elektronički uređaji nošeni od strane ljudi kao što su, primjerice, pametni ručni satovi i naočale [URL: Google glass], osobni generatori struje za nadopunjavanje baterija elektroničkih uređaja [URL: PEG] i različiti osjetnici ušiveni u robu ili pak razna medicinska pomagala, primjerice srčani stimulatori [Dagdeviren et al., 2013.], dozatori lijekova ili osjetnici srčanog tlaka/pulsa [Ong et al., 2011.]. Tehnologiju nosivih uređaja moguće je pogoniti korištenjem kinetičke ili toplinske energije ljudskog organizma. Potrebno je naglasiti da se u tom slučaju radi također o *energy scavenging* ali, za razliku od gore opisanog recikliranja otpadne energije, ovdje se radi o iskorištavanju korisne energije proizvedene od strane ljudskog tijela.

Primjene koncepta prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša uočljive su posebno na već spomenutim poljima bežične sensorike, MEMS uređaja niske potrošnje i sve raširenije potrošačke elektronike. Današnje prijenosne elektroničke komponente optimizirane su za rad s baterijama, ne s tehnologijom o kojoj se u disertaciji radi, što treba uzeti u obzir pri projektiranju uređaja koji zbog navedenog moraju uključivati i spremnike energije u vidu baterija s mogućnošću punjenja ili kao bolje rješenje, kondenzatora ili super kondenzatora koji omogućavaju velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja uz neznatno opadanje kapaciteta [Priya i Inman, 2009.].

Mnogi scenariji praćenja stanja okoline ili industrijskog okruženja zahtijevaju bežične instrumente malih dimenzija i dugog vijeka trajanja. Upravo je takva primjena najznačajnija za razvoj uređaja za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša. Mreže bežičnih senzora sastoje se od čvorova minijaturnih računala sa sensorima i radioodašiljačima koji su u stanju mjeriti jednostavna stanja u svojoj okolini kao što su temperatura, tlak, relativna vlažnost i sl., pa do kompliciranijih zapisa poput slika, zvuka ili videa. Ovi „čvorovi“ odašilju informacije centralnoj jedinici koja prikuplja informacije ili pak drugim čvorovima u mreži koji mogu reagirati na zaprimljenu informaciju [Alippi et al., 2009.]. Napredak na spomenutim područjima omogućava da se konceptom prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša ostvaruju višestruke praktične primjene u razvoju autonomnih izvora energije čime se zamjenjuje klasične oblike energije (npr. bateriju), poglavito tamo gdje je otežan pristup samim uređajima (nemogućnost zamjene baterije ili provođenja žičanih instalacija).

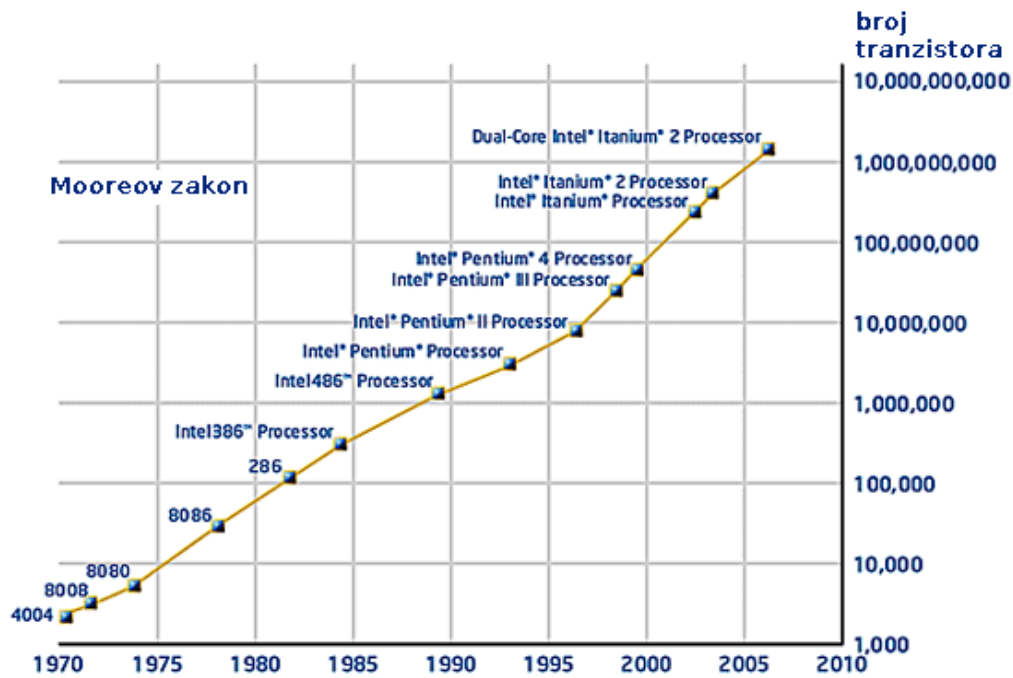
2.1 Prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša: motivacija, koncepti i primjene

U posljednjem je desetljeću razvijeno mnogo eksperimentalnih i komercijalnih sustava za pretvorbu niskorazinske energije iz okoline u električnu energiju korištenjem više mehanizama od kojih su glavni pojašnjeni u ovom potpoglavlju. Najveći naglasak je pritom stavljen na najdostupnije odnosno najobilnije izvore energije u okolini i to svjetlosnu energiju (prirodnu i umjetnu), radiofrekvencije, temperaturne gradijente i kinetičku energiju kao i koncepte koji se koriste za njihovu pretvorbu (Slika 1). Ove koncepte je moguće podijeliti i na one koji pretvorbom rezultiraju istosmjernom, odnosno one koji daju izmjeničnu električnu struju.



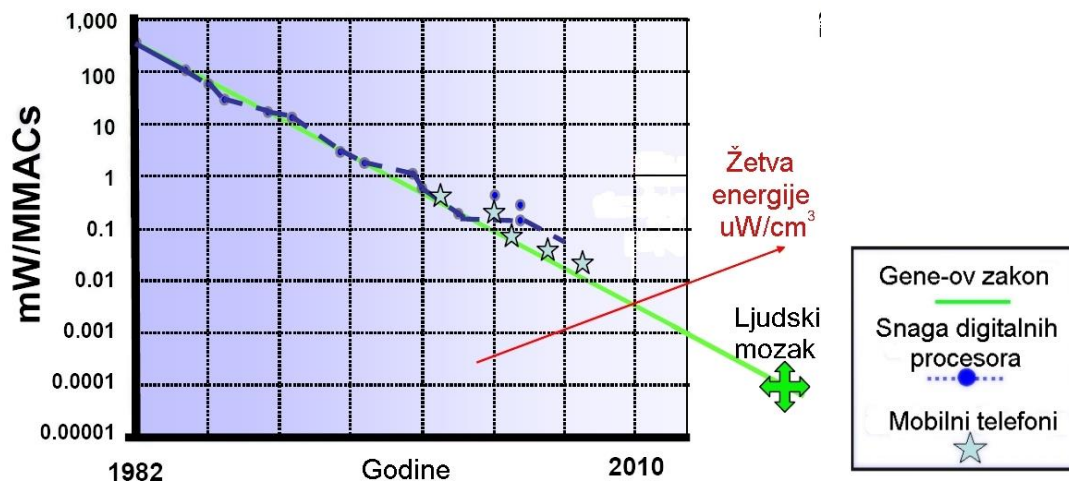
Slika 1. Prikaz najčešćih izvora energije i konceptata pretvorbe korištenih pri pretvorbi niskorazinske energije iz okoliša. Slika prilagođena prema: [Caliò et al., 2014.]

Razlog zbog kojeg potpuno autonomni uređaji za prikupljenje i konverziju niskorazinske energije iz okoline postaju mogući, očituje u dvama komplementarnim zakonima: Mooreovom zakonu i Geenovom zakonu.



Slika 2. Mooreov zakon [URL: Intel]

Prvi (Mooreov) prikazuje udvostručenje procesorske snage digitalnih procesora svakih 18 mjeseci (Slika 2) [URL: Intel], a drugi (Geenov) prikazuje dvostruko povećanje energetske učinkovitosti digitalnih procesora u istom vremenskom periodu (Slika 3) [Frantz, 2008.]. To znači da svakih 18 mjeseci na raspolaganju stoje dvostruko jači i ujedno dvostruko štedljiviji digitalni procesori. Geenov zakon (Slika 3) je posebno bitan za razvoj tehnologija prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša, koje ne samo da su moguće i funkcionalne u ovom trenutku tehnološkog razvoja, već je, na temelju ovih dvaju zakona, moguće uvidjeti da će imati i sigurnu budućnost.

Slika 3. Geneov zakon [Frantz, 2008.], MMACS – (engl. *Million Multiply Accumulate Cycles per Second*), označava broj računskih ciklusa koje procesor može izvesti u jednoj sekundi

U samim počecima rada na tematici koja se ovdje obrađuje, znanstvenici su istražili pojedine izvore energije iz okoline kako bi se fokusirali na one s najvećom energetsom gustoćom ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$, Tablica 1). Ova vrijednost je kao podatak bitnija od izvora dostupne energije zbog glavnih načina primjene tehnologija prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša, a koje obično moraju biti smještene u skućene gabarite, pa treba uzeti u obzir i dimenzije predloženih uređaja (npr. minijturni čvorovi bežičnih mreža male mase, lagane nosive tehnologije itd.) [Roundy, 2003.]

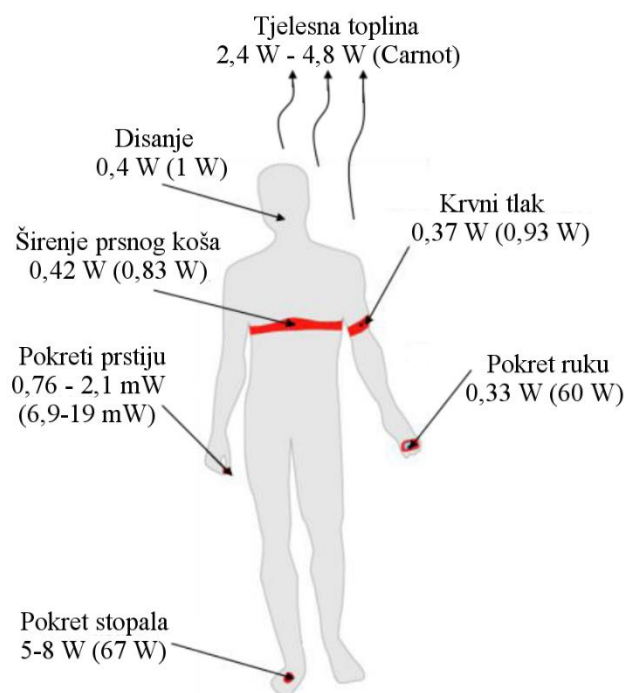
Tablica 1. Usporedba gustoće energije pri iskorištavanju dostupnih obnovljivih izvora iz okoline i potrošnih spremnika energije [Roundy², 2003.]

| | Izvor energije | Gustoća snage, $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ | |
|-----------------------------------|--|--|--|
| | | Ciklus korištenja: | Ciklus korištenja: |
| | | 1 godina | 10 godina |
| Energija iz okoline | Solarna (vanjski uvjeti) | 15000 – sunčani uvjeti | 15000 – sunčani uvjeti |
| | | 150 – oblačni uvjeti | 150 – oblačni uvjeti |
| | Solarna (unutarnji uvjeti) | 6 – unutar ureda | 6 – unutar ureda |
| | Vibracije | 200 | 200 |
| | Buka | 0,003 pri 75 dB 0,96 pri 100 dB | 0,003 pri 75 dB 0,96 pri 100 dB |
| | Dnevna promjena temperature | 10 | 10 |
| | Temperaturni gradijent | 15 ($\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$) | 15 ($\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$) |
| Piezoelektrični umetci u cipelama | 330 | 330 | |
| Potrošni spremnici energije | Neobnovljive litijske baterije | 45 | 3.5 |
| | Obnovljive litijske baterije | 7 | 0 |
| | Fosilna goriva (mikro stroj s unutarnjim izgaranjem) | 333 | 33 |
| | Gorive ćelije (Metanol) | 280 | 28 |
| | Nuklearni izotopi (uran) | $6 \cdot 10^6$ | $6 \cdot 10^5$ |

Vidljivo je kako u kategoriji energije iz okoline veliku prednost ima solarna energija u vanjskim uvjetima pretvorbe, a koja se istodobno nameće i kao najelegantniji pristup prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša. Trenutno ima najveću iskoristivost od čak 36,5% u stvarnim

uvjetima, što je više od iskoristivosti dizelskog motora s unutarnjim izgaranjem [Sheng et al., 2014]. Podatak koji navodi na daljnje istraživanje drugih koncepata pretvorbe energije iz okoliša je drastičan pad učinkovitosti iskorištavanja solarne energije u zatvorenim uvjetima pri umjetnim izvorima svjetlosti. Kao glavni konkurenti u tom slučaju istraženi su kinetička energija vibracija i energija dostupna iz varijacije dnevnih temperatura ili temperaturnih gradijenata u industrijskim okruženjima. U tablici nije navedena gustoća energije iskorištavanja radiofrekvencija, ali u literaturi je dostupan podatak od $0,26 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pri električnom polju od $1 \text{ V}/\text{m}$ u zraku [Georgiadis, 2012.] (za razliku od prethodne tablice ovdje je, zbog same izvedbe uređaja za iskorištavanje energije radiofrekvencija u obliku tankih plošnih antena ugrađenih u naljepnice, kao mjerna jedinica korištena površinska gustoća).

Kada se pak promišlja autonomni pogone nosivih tehnologija spomenutih u uvodu, potrebno je sagledati i energiju koju proizvodi ljudsko tijelo uzimajući u obzir moguće postotke iskoristivosti svakog pojedinog izvora (Slika 4, u zagradama se nalaze ukupni iznosi dostupne energije.) [Starner i Paradiso, 2004.]. Tjelesnu toplinu je moguće pretvarati putem termoelektričnog koncepta uzimajući u obzir Carnotov stupanj iskoristivosti, a sve ostale izvore pomoću koncepata pretvaranja kinetičke energije [Mateu i Moll, 2005.]



Slika 4. Energija ljudskog tijela koju je moguće iskoristiti bez prevelikog opterećenja na organizam. Slika prilagođena prema: [Starner i Paradiso, 2004., Khan i Bang 2009.]

2.2 Primjene koncepata žetve energije

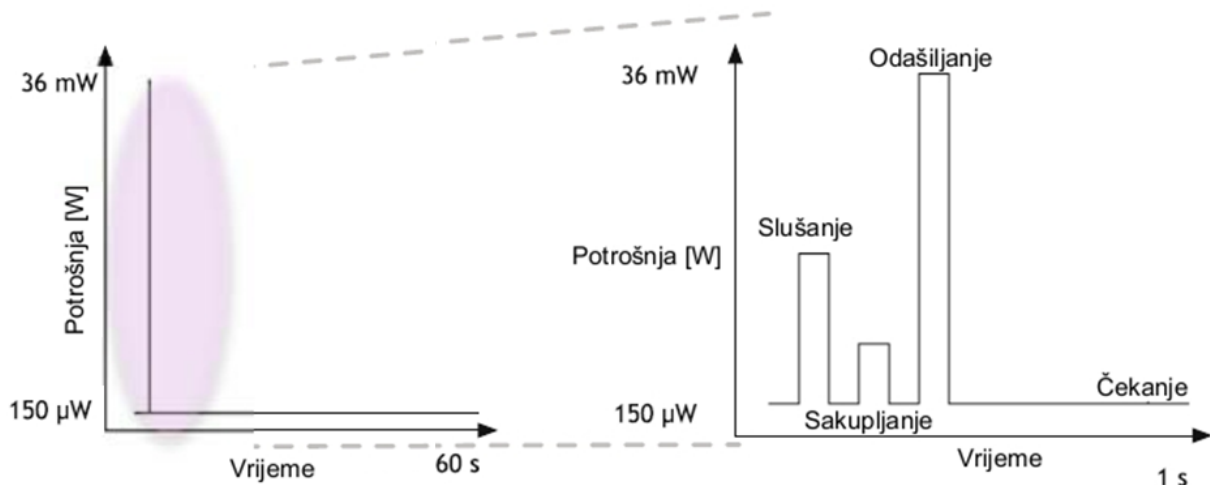
Kao što je navedeno u uvodu ovog poglavlja, postoje brojne potencijalne primjene koncepata prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša koji mehatroničkim uređajima omogućavaju samostalan rad. Mreže bežičnih senzora postat će bitna tehnologija u mnogim područjima, te su zbog toga i glavni pokretači razvoja uređaja za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša. Trenutna rješenja, kojima se osigurava rad na udaljenim lokacijama i u zahtjevnim uvjetima [URL: Microstrain] pogonjena su baterijama s ograničenim vijekom trajanja. Kako bi mreže bežičnih senzora postale sveprisutna tehnologija u okolišu, moraju se upotrijebiti alternativni izvori energije.

Čvorovi mreža bežičnih senzora su mala računala sa senzorom i primopredajnikom, koja su sposobna mjeriti i odašiljati određene veličine iz svoje okoline, a u slučaju MEMS uređaja mogu pokretati i određene aktivnosti (npr. otvaranje ili zatvaranje mikro ventila). Mjeriti se mogu jednostavne veličine, kao što su temperatura, tlak ili vlaga, a zapisi mogu biti i u obliku slike, zvuka ili videa. Ovi uređaji odašilju podatke ili u centralnu radnu stanicu ili susjednim čvorovima koji primjereno reagiraju na temelju primljenih podataka. Takve mreže mogu tvoriti zamršene topologije s višestrukim protokolima usmjeravanja podataka i standardima bežične komunikacije kojima se pokušava minimizirati potrošnja energije, a da pri tome održavaju mrežnu i podatkovnu cjelovitost. Mjerenja se izvode svakih nekoliko sekundi ili čak sati kako bi se dobio točan pregled određene pojave ili procesa unutar predefiniiranog vremenskog intervala [Priya i Inman, 2009.].

Pri napajanju takvih čvorova naglasak je stavljen na dugoročnu stabilnost nasuprot kratkoročnoj razlučivosti.

Radne cikluse čvorova bežičnih mreža moguće je podijeliti na (Slika 5):

- niskozahtjevne mjerne cikluse;
- cikluse čekanja male potrošnje (10 do 300 μW);
- visokopotrošne radne cikluse koji uključuju obradu, slanje i primanje podataka, pri čemu se pri slanju troši između 500 μW do 60 mW, dok je trajanje radioimpulsa kratko (500 ms i manje).



Slika 5. Tipični ciklus rada čvora mreže bežičnih senzora [Steingart et al., 2008.]

Neke od ostalih primjena koncepta prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša su:

- bežično motrenje strukturne ispravnosti mostova,
- aktivne skije i reketi za tenis, [URL: Head]
- bežično motrenje rada stroja [URL: Perpetuum],
- bežični prekidači i daljinski upravljači bez baterija [URL: Enocean],
- bežična mreža senzora u automobilima (smanjuje težinu automobila),
- pokretanje sustava naplate karata u podzemnoj željeznici,
- senzori za dojavu šumskih požara,
- nosive tehnologije:
 - pametni satovi, naočale,
 - osobni generatori električne energije (engl. *PEG – personal energy generator*), [URL: PEG]
 - tjelesni senzori i odašiljači stanja (puls, tlak ili čak i pad starije osobe), srčani stimulatori, dozatori lijekova.

U sljedećim su potpoglavljima detaljnije opisani najznačajniji koncepti pretvorbe niskorazinskih izvora energije, dok će piezoelektrična pretvorba kao koncept, koji čini osnovu ove disertacije, biti objašnjena posljednja.

2.3 Koncept fotonaponske pretvorbe

Fotonaponska³ žetva energije je već razvijena tehnologija za obnovljivu proizvodnju energije. Do danas je razvijeno mnoštvo fotonaponskih sustava mogu proizvesti električnu energiju u rasponu od minijaturnih uređaja koji služe za pogon bežičnih senzora čija je snaga reda veličine miliwatta do velikih elektrana snage izražene u megawattima. Slika 7 prikazuje minijaturni uređaj za primjenu u poljoprivredi i to za motrenje vlage i temperature tla, a proizvodi 3,3 mW električne energije pri direktnom suncu i 20 μW u zatvorenim uvjetima. Moguć je veliki broj različitih primjena: od ručnog sata do fotonaponskih sustava spojenih u električnu mrežu. U prirodi je sunčevo zračenje izvor energije za fotonaponski sustav. Sunčevo zračenje je različito po površini planeta zbog vremenskih uvjeta i položaja (zemljopisna širina i dužina). Za svaku lokaciju postoji optimalni kut i orijentacija fotonaponskih ćelija kojima se ostvaruje maksimalno zračenje po površini solarne ćelije. Tako je na primjer količina godišnjeg zračenja u Nizozemskoj 992 kWh/m² dok je u Tanzaniji to 2026 kWh/m². Međutim, zračenje u unutarnjim prostorima mnogo je manje, od 3,5 do 20 W/m². Solarne se ćelije izrađuju od kristaličnog silicija (89%), amorfno silicija (10%), kadmij-telurida (0,5%), bakar-iridija, diselenida i galij-arsenida [Mateu i Moll, 2005.]. Danas već postoje fleksibilne verzije solarnih ćelija koje omogućavaju korištenje ove tehnologije na svim oblicima površina (Slika 6).

Učinkovitost pretvorbe snage solarnih ćelija definirana je kao omjer između izlazne snage solarne ćelije i solarnog zračenja kojem je izložena površina solarne ćelije. Jedna solarna ćelija površine 100 cm², uz zračenje od 1000 W/m² i učinkovitost od 10% može proizvesti 1 W snage [Mateu & Moll, 2005.].



Slika 6. Fleksibilna tanka solarna ćelija [URL: Ecofriend]

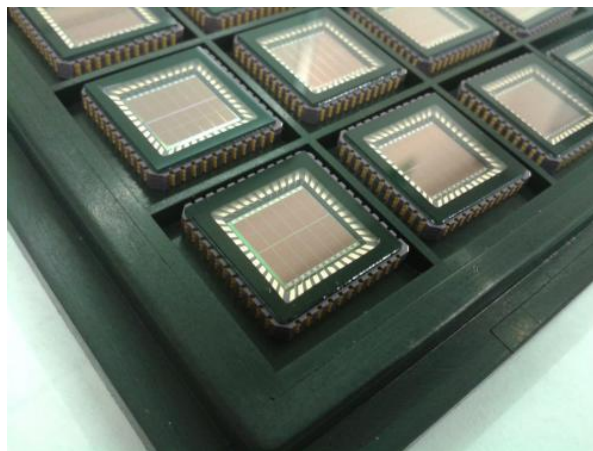
³ Fotonaponski ili fotoelektrični efekt je fenomen pri kojemu nastaje emisija elektrona iz tvari (metala ili nemetala) nakon apsorpcije energije elektromagnetskog zračenja kao što su x-zrake ili vidljivo svjetlo.

Eksperimentom je dokazano drastično opadanje učinkovitosti solarnih ćelija u zatvorenim uvjetima, kada učinkovitost opada za više od 90% pa tako solarne ćelije nisu primjenjive za pogon elektroničkih uređaja jer im gustoća snage opada daleko ispod $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ što je rubni uvjet isplativosti ove tehnologije (Tablica 2) [Roundy², 2003.].

Ako jedna ćelija od kadmij telurida (CdTe) površine $6,45 \text{ cm}^2$ stvara jačinu struje od 13 mA pri naponu od 700 mV, tada je potrebno 5 ćelija u seriji za pogon bilo kojeg standardnog mikrokontrolera od 3,3 V (podaci za dnevnu primjenu). Ukoliko je potreban rad i tijekom noći, tada je nužno koristiti bateriju ili superkondenzator i drastično srezati ciklus rada odnosno smanjiti frekvenciju mjernih i odašiljačkih ciklusa rada uređaja. Kako solarne ćelije generiraju istosmjernu struju (fotonaponski efekt), DC-DC konverter nije potreban iako se njime postiže optimalna regulacija uz 5% gubitaka. [Priya i Inman, 2009.]

Tablica 2. Gustoća energije solarnih ćelija pri različitim uvjetima [Roundy², 2003.]

| Uvjeti | Vani, sredina dana | 10 cm od žarulje 60 W | 40 cm od žarulje 60W | Uredsko osvjetljenje |
|----------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Snaga, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ | 14000 | 5000 | 567 | 6,5 |



Slika 7. Bežični senzori s integriranim solarnim ćelijama veličine poštanske marke. [URL: Solchip]

Unatoč nedostacima, fotonaponsko prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša je još uvijek najrašireniji i najlakše primjenjivi oblik iskorištavanja okolišne energije u instalacijama s vijekom trajanja od deset i više godina. Istražuju se i različiti novi pristupi iskorištavanju solarne energije kao što je npr. mehanizam fotosinteze. Zbog slabe iskoristivosti upotrebljavanih materijala kao i progresivnog opadanja učinkovitosti tijekom uporabe. Najznačajniji napredak na ovom polju je postignut ove godine i to minijaturizacijom fotonaponskih ćelija uz dvostupanjsko fokusiranje svjetlosti (Slika 8) čime je postignuta

iskoristivost od 36,5% u stvarnim uvjetima (za razliku od dosad postignutih $\approx 25\%$ u laboratorijskim uvjetima) [Sheng et al., 2014].



Slika 8. Minijaturna solarna ćelija s dvostrukim sustavom fokusiranja svjetlosti površine 2 cm x 2 cm [Sheng et al., 2014.]

2.4 Koncept termoelektrične pretvorbe

Toplinska je energija još jedan oblik energije prisutne u okolišu. Termoelektrični uređaji za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša mogli bi koristiti toplinsku energiju iz više izvora: ljudi i životinja ili strojeva te drugih prirodnih izvora toplinske energije. Ovaj koncept se višestruko istražuje i primjenjuje⁴, a predstavlja budućnost prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša zbog konstantnog napretka u pronalasku novih termoelektričnih materijala, povećanja učinkovitosti i minijaturizacije uređaja [Mateu i Moll, 2005.].

Termoelektrični generatori se sastoje od termočlanaka koje čine P- i N- tipovi poluvodiča (Bi_2Te_3 - bizmut-telurid) električno povezanih u seriju. Termoelektrični generator (koji se temelji na Peltier-Seebeckovom efektu⁵) proizvodi istosmjernu električnu struju proporcionalnu temperaturnoj razlici između toplog i hladnog spremnika. Seebeckov

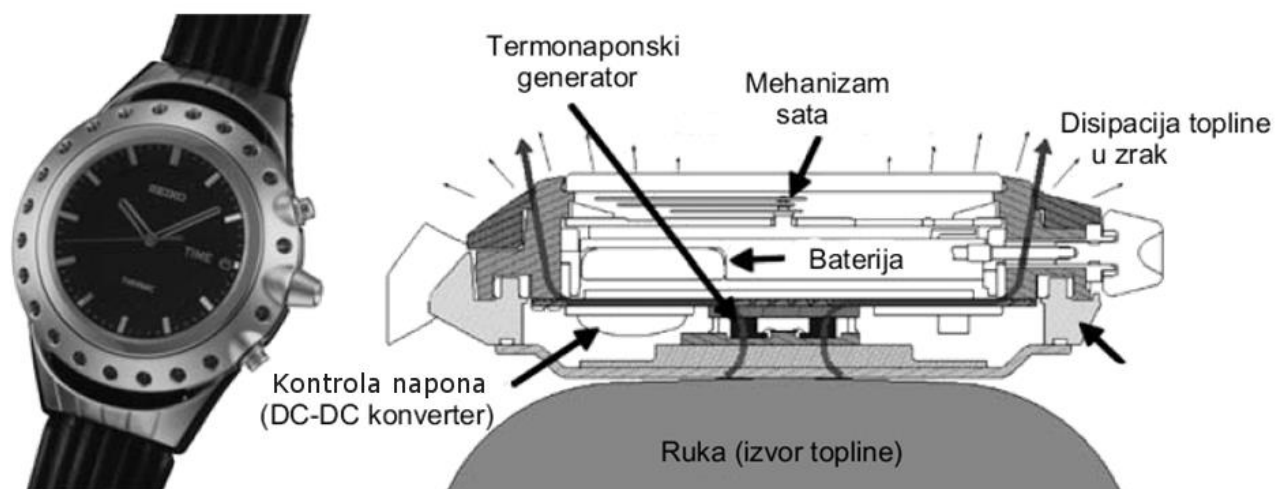
⁴ Već 36 godina termoelektrični princip služi za pogon svemirskih istraživačkih sonda Voyager 1 i 2 na putu kroz galaksiju Mliječne staze. Doduše, u tom slučaju princip ne koristi okolišnu toplinsku energiju već energiju koja se otpušta raspadom radioaktivnog materijala. Sonda Voyager 1 je 2013. postala prva ljudska struktura u međuzvezdanom prostoru – 19 milijardi km udaljena od Sunca.

⁵ Peltier-Seebeckov efekt je efekt pretvorbe temperaturnih razlika izravno u protok elektrona odnosno električnu struju.

koeficijent je pozitivan za materijale P-tipa (poluvodički materijali u koji su unesene 'pozitivne' nečistoće sklone prihvatu elektrona [URL: P-type] i negativan za materijale N-tipa (termoelektrični materijali skloni stvaranju dodatnih elektrona usmjerenih ka baznom materijalu [URL: N-type]). Toplina koja ulazi ili izlazi iz spoja termoelektričnog uređaja ima dvostruki učinak: stvara temperaturni gradijent u članku i apsorbira ili oslobađa energiju zbog Seebeckovog efekta [Mateu i Moll, 2005.]. Današnji termoelektrični generatori na mikro i nano razini (snage $\ll 1$ W) imaju veću iskoristivost od motora s unutarnjim izgaranjem [Vining, 2009.].

Gornja granica iskoristivosti toplinske energije u termoelektričnim uređajima definirana je Carnotovom učinkovitošću. U slučaju temperaturne razlike između ljudskog tijela i okoliša, npr. pri sobnoj temperaturi (20 °C), Carnotova učinkovitost se procjenjuje na 5,5%. U toplijem okolišu Carnotova učinkovitost pada, dok u hladnijem raste. Energija dobivena konceptom pretvorbe energije ljudskoga tijela termoelektričnim principom nalazi se u rasponu od 3,7 do 6,4 W [Mateu i Moll, 2005.].

Gubitak topline isparavanjem znoja iznosi 25% ukupne disipacije topline ljudskoga tijela pa je stoga maksimalna raspoloživa snaga u tom slučaju u rasponu od 2,8 do 4,8 W. Ovaj proračun izveden je na temelju pretpostavke da sva toplina koju zrači ljudsko tijelo može biti iskorištena i pretvorena u električnu energiju, što znači da je raspoloživa snaga precijenjena. Jedan od mogućih problema je i smještaj uređaja namijenjenog prikupljanju topline ljudskog tijela (primjer termoelektrične narukvice, Slika 10). U trenutku kada koža detektira hladan zrak, nastupa naglo sužavanje krvnih žila u koži čime se automatski smanjuje temperatura kože, a samim time opada i Carnotova učinkovitost termoelektričnog uređaja. [Mateu i Moll, 2005.]



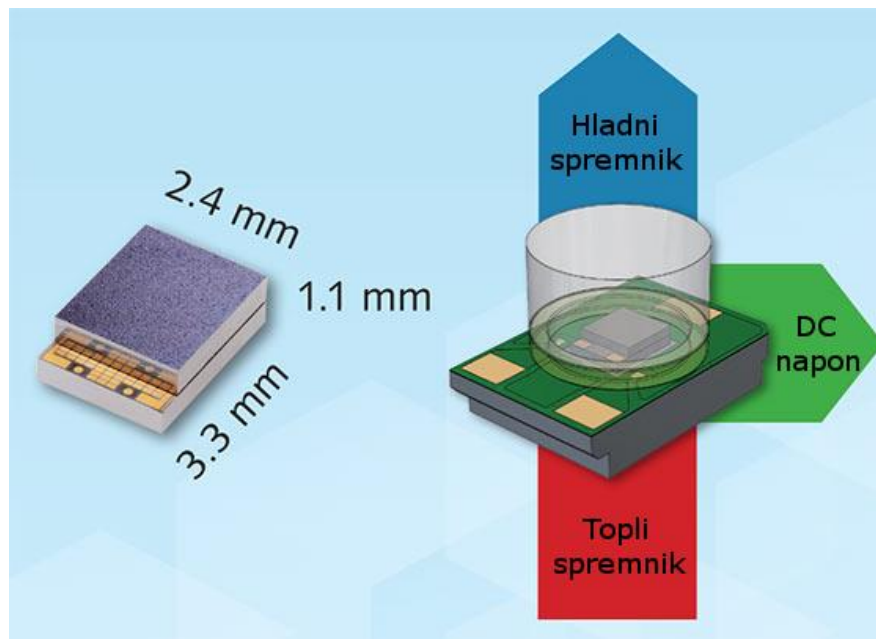
Slika 9. Seiko Thermic ručni sat i princip rada [Priya i Inman, 2009.]

Roundy i Wright su izračunali, uzimajući u obzir Carnotovu učinkovitost, da bi pri koeficijentu toplinske vodljivosti od 140 W/mK na duljini od 1 cm i gradijentu temperature od 5 K iznad sobne temperature, termočlanak mogao teorijski proizvesti 117 mW/cm² [Roundy i Wright, 2004.]. Nažalost, većina termonaponskih uređaja u stanju je ostvariti samo djelić te snage. Pri korištenju pretvorbe niskorazinske termoelektrične energije iz okoliša mora biti prisutan dovoljan broj termo parova kako bi se stvorio dovoljan električni potencijal i eliminirala upotreba DC-DC konvertera. Kod većine industrijskih primjena radna temperatura se nalazi u području iznad 60 °C čak i noću pa je samim time osiguran velik i konstantan gradijent iz kojeg se može crpiti energija. 2006. godine je zabilježeno razvijanje 60 mW snage pri temperaturi 20 °C većoj od sobne uz P-N termoelektrične članke površine 16 cm². [Priya i Inman, 2009.]



Slika 10. Termoelektrična narukvica [URL: KAIST]

Poznata komercijalna primjena termoelektričnog efekta do danas su Seiko Thermic i Bulova Thermatron (1982) ručni satovi koji rade na principu Peltier-Seebeckovog efekta (Slika 9) [Priya i Inman, 2009.]. Najčešća primjena ovog koncepta je kod bežičnih senzora za motrenje temperature cjevovoda, radnih strojeva i slično (proizvođači: ABB WiTemp, Logimesh) [URL: ABB, URL: Logimesh]. Najveći napredak u ovom području ostvarila je tvrtka Micropelt koja se bavi proizvodnjom termoelektričnih čipova sa stotinama ugrađenih mikro termočlanaka koji su u mogućnosti proizvesti električnu snagu od 20 mW pri razlici temperatura toplog i hladnog spremnika od $\Delta T = 20$ °C [URL: Micropelt] – Slika 11. Od značajnijih primjena koje se očekuju u budućnosti valja istaknuti recikliranje otpadne topline digitalnih procesora. Naime, termoelektrični generatori mogu biti integrirani u arhitekturu digitalnih procesora i otpadnu toplinu pretvarati u korisnu električnu energiju za pogon procesora [Siegel, G. et al. 2014].



Slika 11. Micropelt termoelektrični generator [URL: Micropelt]

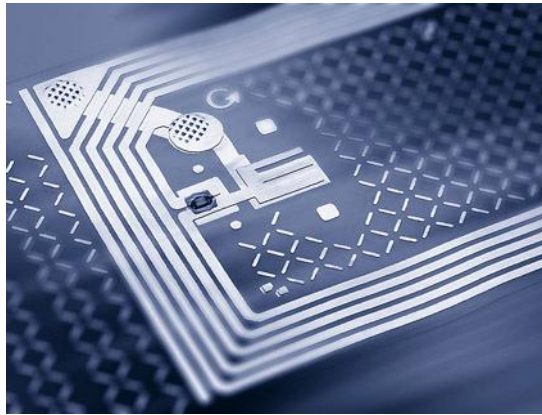
2.5 Koncept pretvorbe radiofrekvencija – RFID

RFID (engl. *Radio Frequency IDentification*) je tehnologija koja koristi radiofrekvencije za razmjenu informacija između prijenosnih uređaja/memorija (npr. proizvodi u skladištima, poštanske pošiljke) i stacionarnih računala. RFID sustav obično se sastoji od naljepnice (engl. *tag*) koja sadrži podatke spremljene u memoriju, zatim zavojnice, antene za komunikaciju te kontrolera koji upravlja i nadzire komunikaciju između antene i PC računala (Slika 12). Naljepnice s integriranom elektronikom za pohranu podataka i bežičnu komunikaciju nalaze se na ambalaži ili na samom proizvodu i predstavljaju bazu podataka koja putuje zajedno s proizvodom [URL: RFID].

Radiofrekvencijsko zračenje koristi se za pokretanje identifikacijskih uređaja usmjeravanjem jake elektromagnetske energije izvora koji se nalazi blizu pogonjenog uređaja tj. naljepnice. Uz slanje energije omogućeno je i slanje informacija. Pri prolasku naljepnice s RFID zavojnicom i čipom pored RFID čitača u zavojnici se inducira električna struja koja pokreće bežični komunikacijski čvor i razmjenu podataka. [Mateu i Moll, 2005.]

U gradovima i naseljenim područjima postoji veliki broj potencijalnih RF izvora: radio- i TV-odašiljači, mobilna telefonija, bežične mreže itd. Problem predstavlja prikupljanje svih tih različitih izvora i pretvaranje istih u korisnu energiju. Pretvorba niskorazinske energije iz okoliša se u tom slučaju temelji na korištenju ispravljачke antene konstruirane sa Schottkyevom

diodom⁶ postavljenom između dipolova antene [Mateu i Moll, 2005.]. RFID naljepnice mogu biti potpuno pogonjene zaprimljenom RF transmisijom (pasivne naljepnice) ili aktivirane istom transmisijom te zatim pogonjene pomoću interne baterije ili izvora energije (polu-aktivne naljepnice) [Priya & Inman, 2009.].



Slika 12. Uvećan RFID uređaj: zavojnica, antena i mikročip [URL: RFID2]

Snaga koju RFID sustav može razviti može se ilustrirati sljedećim primjerom. Pretpostavi li se da je udaljenost između odašiljača i senzora 5 m te da se odašilje uz pomoć Zigbee⁷ protokola čija je frekvencija 2,4 GHz (valna duljina se računa prema formuli $\lambda = 300 / f$ (MHz)), a uz regulacijsku granicu koja kaže da snaga zračenja ne smije prelaziti 1W, maksimalna snaga korištenjem formule $P_{RF} = (P_0 \lambda) / (4\pi R^2)$ na udaljenosti od 5 m iznosila bi 50 μ W [Priya & Inman, 2009.].

Međutim, RFID tehnologija ne razvija se samo u smjeru identifikacije proizvoda i ljudi, već će, slijedeći ostale koncepte prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša, u budućnosti pogoniti i MEMS uređaje. Danas je to slučaj s Nokiinim mobitelom, gdje se uporabom RFID tehnologije, puni baterija dok je uređaj ugašen, proizvodeći snagu od 3-5 mW [URL: Nokia].

Najveći napredak na polju RFID koncepta u vidu nosivih tehnologija postignut je 2012. godine kada su inženjeri sveučilišta Stanford otkrili i eksperimentalno dokazali da elektromagnetski valovi uz pomoć novootkrivenog mehanizma širenja valova, prodiru mnogo dublje u tijelo. Time su omogućili razvoj novih klasa autonomnih bežičnih senzornih implantata [Kim et al, 2012.].

⁶ Specijalni tip diode s jako malim padom napona (omogućuje vrlo brzu izmjenu signala i povećanu učinkovitost) [http://en.wikipedia.org/wiki/Schottky_diode]

⁷ Protokol za bežičnu komunikaciju ciljano specificiran za primjene koje koriste nisku stopu prijenosa podataka i imaju malu potrošnju baterija [<http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>]

2.6 Koncepti pretvorbe kinetičke energije

Iz izloženih koncepata pretvorbe niskorazinske energije iz okoliša dolazi se do zaključka da je za napajanje vanjske mreže bežičnih senzora, najpogodnija fotonaponska žetva energije (Tablica 1). Ovu metodu se trenutno ne može koristiti u zatvorenim prostorima gdje nema pristupa prirodnoj svjetlosti (pogotovo u volumenu uređaja od 2 cm² ili manje). U tom slučaju izvori vibracijske energije izgledaju obećavajuće, posebice u industrijskim uvjetima.

Prikupljanje niskorazinske kinetičke energije vibracija iz okoliša definira se kao:

pretvorba kinetičke energije vibracija u električnu energiju koja se temelji na pomicanju pokretnih dijelova ili deformacijama određenih struktura unutar samog uređaja za pretvorbu, pri čemu se pomak ili deformacija pretvaraju u električnu energiju koja je snagom proporcionalna stupnju pomaka ili deformacije.

Zbog oscilatorne prirode energije (Tablica 3), koju se ciljano želi pretvoriti opisanim konceptom, dobivena električna energija je izmjeničnog karaktera te ju za daljnju uporabu treba pretvoriti u istosmjernu, pri čemu se očekuju i određeni gubitci. S obzirom na mehaničku strukturu uređaja, postoje dva tipa mogućih pretvarača: inercijalni i neinercijalni. Kod inercijalnih sustava pretvorena energija ovisi o vibracijskom odzivu mase (utega) postavljene na opružnu strukturu, dok kod neinercijalnih sustava pretvorena energija ne ovisi o pomaku mase (utega) već isključivo o stupnju deformacije podatljivih struktura⁸ [Mateu i Moll, 2005.].

Mnogi inercijalni uređaji za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša temelje se na sustavu mase i opruge koji postiže rezonanciju pri točno određenoj frekvenciji. Kada je frekvencija mehaničke uzbude jednaka vlastitoj frekvenciji sustava, sustav ulazi u rezonanciju pa je iznos pretvorene energije maksimalan (pri velikim pomacima mase). Ovo svojstvo predstavlja ograničenje u primjeni ove tehnologije u MEMS uređajima. Zbog malih dimenzija MEMS uređaja rezonantne frekvencije su vrlo visoke, a mogu biti i višestruko više od frekvencija koje se uobičajeno pronalaze u okolišu (Tablica 3). Rezultat toga je vrlo niska učinkovitost pretvorbe energije jer bi sustav bio u podrezonantnom stanju uzbude. Kako bi se zaobišlo ovo ograničenje, istraživači su različitim pristupima pokušali osmisliti inercijalne uređaje koji rade u širem rasponu frekvencija [Zhu et al., 2010.].

⁸ Neinercijalne izvedbe su rezervirane isključivo za piezoelektrični koncept pretvorbe.

Tablica 3. Popis različitih izvora vibracija u ljudskom okruženju s najvišim iznosima ubrzanja i pripadajućim frekvencijama [Roundy², 2003.]

| Izvor vibracija | Najviši iznos ubrzanja, m/s ² | Frekvencija pri najvišem iznosu ubrzanja, Hz |
|--|--|--|
| Temelj troosnog obradnog stroja | 10 | 70 |
| Kuhinjski mješač (blender) | 6,4 | 121 |
| Sušilo | 3,5 | 121 |
| Okvir vrata netom nakon zatvaranja vrata | 3 | 125 |
| Mikrovalna pećnica | 2,25 | 121 |
| Otvori sustava klimatizacije uredskih zgrada | 0,2 – 1,5 | 60 |
| Drvena terasa za vrijeme kretanja ljudi | 1,3 | 385 |
| Pekač kruha | 1,03 | 121 |
| Prozori okrenuti na prometnu ulicu | 0,7 | 100 |
| Prijenosno računalo pri čitanju CD-ROM-a | 0,6 | 75 |
| Perilica rublja | 0,5 | 109 |
| Hladnjak | 0,1 | 240 |

Dosad najrašireniji i najistraženiji koncepti prikupljanja i pretvorbe niskorazinske kinetičke energije vibracija su sljedeći [Priya i Inman, 2009.]:

- Elektrostatički koncept⁹ pri kojem, pod utjecajem oscilatornog gibanja, dolazi do promjene veličine zračnosti između ploča mikrokondenzatora konstantnog električnog naboja, a rezultira povećanjem napona u kondenzatoru.
- Elektromagnetski (indukcijski) koncept pri kojem, pod utjecajem oscilatornog gibanja, magnet naizmjenice prolazi kroz zavojnicu inducirajući u njoj električnu struju na temelju Faradayevog zakona.
- Piezoelektrični koncept pri kojem se, pod utjecajem oscilatornog gibanja, mehanička naprezanja u slojevima piezoelektričnih materijala pretvaraju u površinske električne naboje.

⁹ Za funkcioniranje ovog koncepta uvijek je potreban vanjski izvor napona radi ostvarivanja i održavanja početnog naboja u mikrokondenzatoru.

U sljedećim dvjema tablicama prikazana je usporedba triju koncepata s naglaskom na gustoću energije koju je moguće proizvesti.

Tablica 4. Usporedba snage i volumena uređaja [Steingart et al., 2008.]

| Metoda | Snaga | Uvjeti uzbude (M, a, ω) | Volumen |
|------------------|----------|--------------------------------------|----------------------|
| Piezoelektrična | 0,375 mW | 9,1 g, 2,25 m/s ² , 85 Hz | 1 cm ³ |
| Elektrostatička | 3 mW | 50 g, 0,5 m/s ² , 50 Hz | 41 cm ³ |
| Elektromagnetska | 3,7 μW | 1,2 mg, 10 m/s ² , 800 Hz | 0,75 cm ³ |

Tablica 5. Usporedba teorijske i praktično ostvarive gustoće snage [Roundy², 2003.]

| Metoda | Praktični maksimum | Teoretski maksimum |
|------------------|-------------------------|------------------------|
| Piezoelektrična | 17,7 mJ/cm ³ | 335 mJ/cm ³ |
| Elektrostatička | 4 mJ/cm ³ | 44 mJ/cm ³ |
| Elektromagnetska | 4 mJ/cm ³ | 400 mJ/cm ³ |

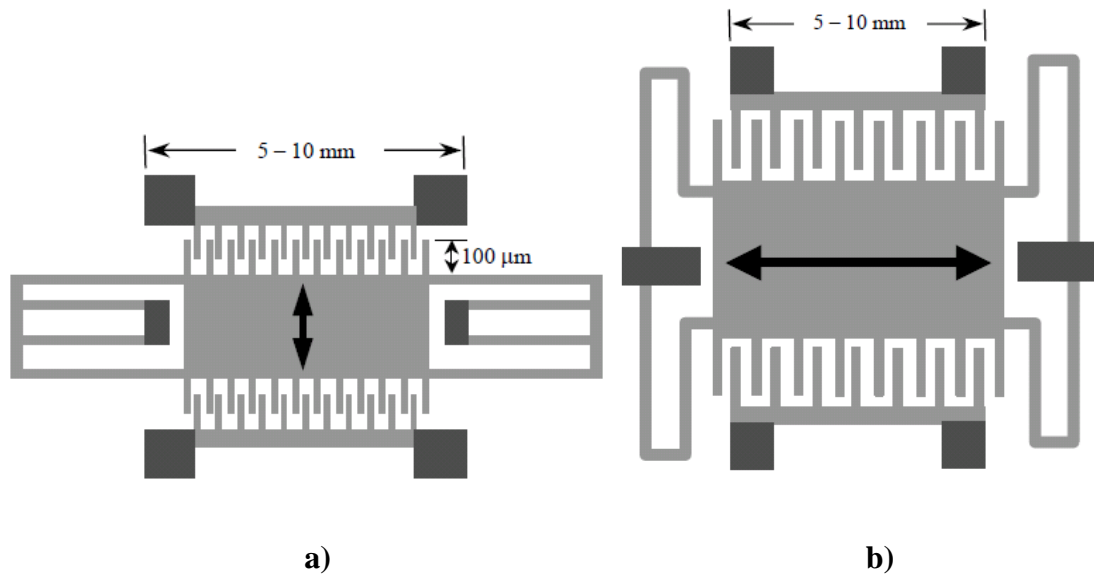
U sljedećim potpoglavljima zasebno su objašnjena sva tri koncepta pretvorbe kinetičke energije vibracija.

2.6.1 Elektrostatički koncept

Elektrostatički koncept prikupljanja niskorazinske kinematičke energije vibracija iz okoliša (primarno na mikrorazinama) temelji se na promjeni kapaciteta mikrokondenzatora razdvajanjem ploča prethodno nabijenog kondenzatora pod utjecajem vibracija, a zbog inercijalne mase postavljene na kondenzator. Kondenzator se obično sastoji od dviju zrakom, vakuumom ili izolatorom međusobno odijeljenih ploča.¹⁰ Ploče kondenzatora spojene su na izvor napona iznosa V pri čemu se na njima stvaraju jednaki, suprotno nabijeni naboji Q . U kondenzatoru ostaje pohranjen naboj Q i nakon iskapčanja izvora napona. Veza između napona, kapaciteta i naboja definirana je izrazom $C = Q / V$, gdje je C kapacitet. Promjenom kapaciteta zbog promjene razmaka između ploča kondenzatora, a pod uvjetom da je naboj na pločama kondenzatora konstantan, dolazi do promjene napona. To znači da savladavanjem elektrostatske sile između ploča, dolazi do pretvorbe mehaničke energije u električnu. Postoji

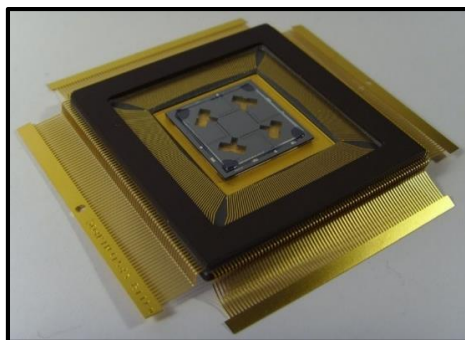
¹⁰ Pri mikroizvedbama razmak između ploča je obično reda veličine nm - μm.

više izvedaba ovog koncepta od kojih se izdvajaju dvije: promjena duljine preklopa i promjena širine preklopa ploča kondenzatora (Slika 13). Izvedba s promjenom širine preklopa je dosad najbolji način pretvaranja energije putem elektrostatičkog koncepta. Ovom izvedbom moguće je ostvariti izlaznu gustoću energije od $100 \mu\text{W}/\text{cm}^3$, pri vrlo malim dielektričnim razmacima [Beeby et al. 2006].



Slika 13. Mikroelektrostatički pretvarači s pločama kondenzatora u konfiguraciji 'češlja': a) s promjenom duljine preklopa i b) s promjenom širine preklopa [Roundy, 2003.]

Koncept elektrostatičke pretvorbe niskorazinske kinematičke energije vibracija iz okoliša se zbog dimenzija lako uklapa u konstrukcije MEMS uređaja te se lako proizvodi dostupnim tehnologijama. Određene izvedbe omogućavaju i višeosno pretvaranje energije (Slika 14) za razliku od ranije opisanih jednoosnih izvedbi (Slika 13). Izlaznu energiju moguće je povećati smanjivanjem dielektričnog razmaka među pločama. Pri razmatranju ovakvog tipa pretvarača potrebno je uzeti u obzir da je, za funkcioniranje ovog koncepta, ploče kondenzatora nužno inicijalno nabiti vanjskim izvorom napona.

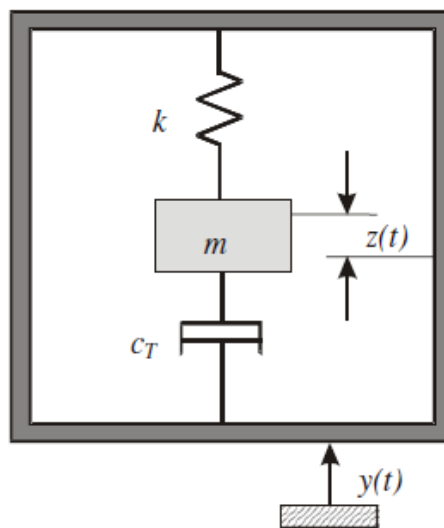


Slika 14. 3D mikroelektrostatički pretvarač energije vibracija s radnom frekvencijom ispod 150 Hz [URL: SPIE]

2.6.2 Elektromagnetski koncept

Generiranje električne struje u vodiču smještenom unutar magnetskog polja naziva se elektromagnetskom indukcijom.¹¹ Vodič je pritom obično u obliku zavojnice, a struja nastaje zbog relativnih pomaka zavojnice ili magneta, ili pak zbog promjena u magnetskom polju. U prvom slučaju snaga električne energije ovisi o jačini magnetskog polja, brzini relativnog gibanja i broju namotaja zavojnice. Metoda koja je dosad polučila najbolje rezultate temelji se na korištenju permanentnih magneta, zavojnice i rezonantne konzole. Na konzoli mogu biti montirani ili zavojnica ili magneti. Preporučuje se montiranje magneta na konzolu pa u tom slučaju on služi i kao inercijska masa (Slika 16).

Opći model ovog koncepta može se prikazati kao model linearnog inercijskog sustava s jednim stupnjem slobode gibanja sastavljenog od: opruge k (konzola), mase m (magneti montirani na konzolu) i prigušivača c (mehanizam indukcije, tj. inducirana struja) pod utjecajem seizmičke¹² uzbude $y(t)$ (Slika 15). [Beeby et al. 2006.]



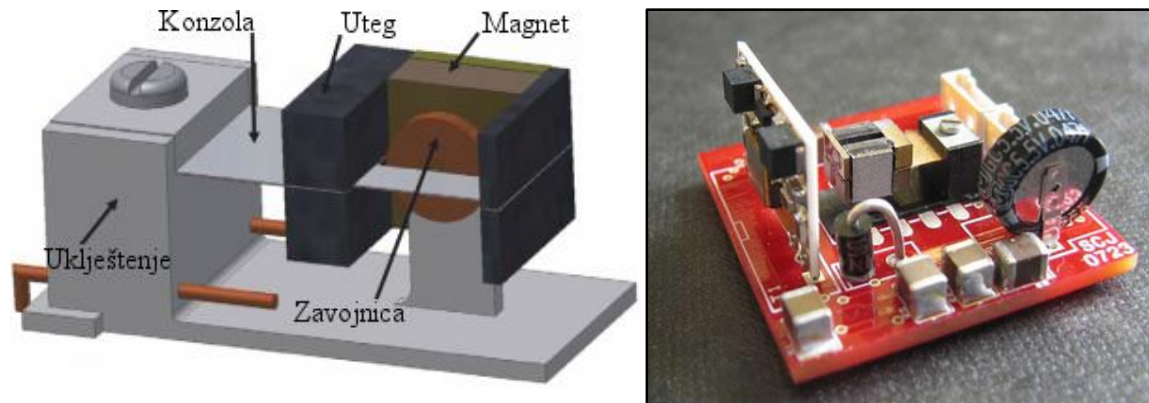
Slika 15. Model linearnog generatora s jednim stupnjem slobode gibanja [Beeby et al., 2006]

Ilustrirani koncept je pogodan kako za mikro- tako i makro- primjene te je uz piezoelektrični koncept, glavni način pretvorbe niskorazinske kinetičke energije vibracija iz okoliša u električnu energiju. Koncept karakteriziraju visoke jakosti izlazne struje i mali naponi (obično < 1 V). Dok je makro primjena lako izvediva i već postoji velik broj rješenja dostupnih na tržištu koji se mogu iskoristiti za konstrukciju pretvarača (zavojnice i permanentni neodimijski magneti), mikro primjena je komplicirana zbog loših svojstava plošnih magneta i ograničenja

¹¹ Faraday 1831.

¹² Pod seizmičkom uzbudom (grč. *seismos*, potres) smatra se uzbuda koja ne djeluje direktno na masu m već se prenosi inercijski kroz temelj, okvir ili uklještenje.

broja zavoja u mikrozavojnicama. Prikazano prototipno rješenje (Slika 16, desno) sadrži vertikalno postavljeni akcelermetar pogonjen elektromagnetskim konceptom pretvorbe. Dimenzije prototipnog uređaja su 7 mm x 7 mm x 8,5 mm, a proizvodi električnu snagu od 46 μ W [Beeby et al, 2006.].



Slika 16. Model i prototip elektromagnetskog konzolnog pretvarača kinetičke energije vibracija. [Beeby et al, 2006.]

Najznačajniji napredak na makro polju primjene elektromagnetskog koncepta ostvarila je tvrtka Perpetuum Ltd. čiji su uređaji za bežično motrenje rada industrijskih postrojenja u konstantnoj uporabi već deset i više godina. Uređaj VEH (engl. *vibration energy harvester*) može proizvoditi snagu od 27 mW pri naponu od 5 V ili 24 mW kod 8 V, a dostupan je u nekoliko uzbudnom frekvencijom definiranih izvedaba: 25 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 100 Hz i 120 Hz (Slika 17) [URL: Perpetuum].



Slika 17. Komercijalno dostupan uređaj za bežično motrenje stanja industrijskih postrojenja, cjevovoda i sl. [URL: Perpetuum]

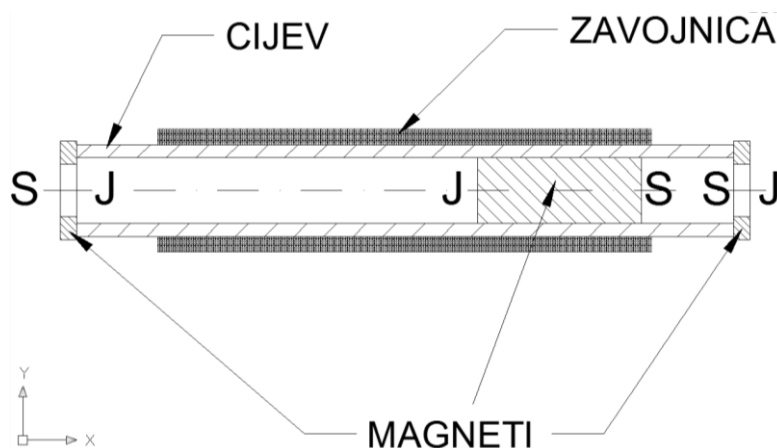
Jedna od značajnijih primjena u smislu regeneriranja energije, aktivni je regenerativni ovjes za motorna vozila koji proizvodi tvrtka Levant Power. Za razliku od standardnih amortizera u kojima se energija prigušenja nepovratno gubi, u ovoj se izvedbi prigušenje udaraca izvodi uz pomoć hidroelektro motora, a radi pretvaranja energije vibracija u električnu energiju. Projekt

je sufinancirala američka vojska i pri prvim testiranjima uređaji su proizvodili 600W pri brzinama od 1.5 m/s (rezultat, naravno, ovisi o uvjetima vožnje, ali generalno se kreće od nekoliko stotina W do kW) [URL: Levant].

U sklopu projekta BAST opisanog u 6. poglavlju, u Laboratoriju za precizno inženjerstvo Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci razvijen je pak prototip jednostavnog uređaja za pretvorbu niskorazinske kinetičke energije vibracija iz okoliša korištenjem opisanog koncepta elektromagnetske indukcije. Slika 18. prikazuje izrađeni prototip: u gornjem dijelu slike prikazan je prototip, a u donjem dijelu i struktura uređaja. Zavojnica je ručno namotana u i sastoji se od 3100 namotaja bakrene žice promjera 0,17 mm, a na krajevima plastične cijevi postavljene su magneti koji služe kao poklopci, ali i kao magnetske opruge koje odbijaju centralni magnet. Pri inicijalnom testiranju (ručna trešnja) uređaj je proizvodio 8 V napona. [Petković, 2011.]



a)



b)

Slika 18. Projekt elektromagnetskog uređaja za pretvorbu energije vibracija izveden u Laboratoriju za precizno inženjerstvo: a) izvedeni prototip, b) struktura uređaja. [Petković, 2011.]

2.6.3 Piezoelektrični koncept

Od navedenih koncepata pretvorbe niskorazinske kinetičke energije vibracija iz okoliša u električnu, piezoelektrični koncept posebno se ističe gustoćom pretvorene energije, jednostavnošću izvedbe, višestrukim mogućnostima konstrukcijskih rješenja za različite primjene i frekvencijske pojaseve, kao i izrazito jednostavnom MEMS/NEMS integracijom. Za razliku od elektrostatičkog i elektromagnetskog koncepta koji su inercijske prirode (odziv inercijskih masa na vibracijsku uzbuđu), piezoelektrični koncept omogućuje i neinercijske izvedbe koje ne ovise o inercijskoj masi nego samo o stupnju deformacije sustava [Priya i Inman, 2009.].

Prije detaljnijeg prikaza mehanizama koji omogućuju pretvorbu korištenjem piezoelektričnih materijala, potrebno je nešto više reći o piezoelektričnom efektu kao temeljnom pozadinskom mehanizmu pretvorbe kinetičke energije vibracija.

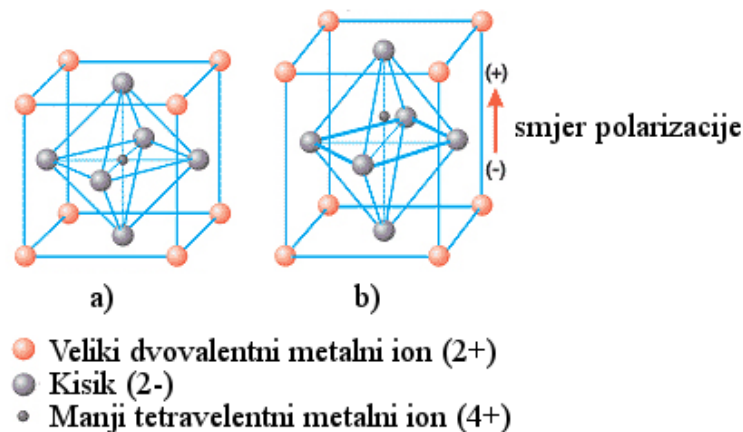
2.6.3.1 Piezoelektrični efekt i piezoelektrični materijali

Piezoelektrični efekt (grč. *piezein* - pritiskati, tlačiti) je pojava stvaranja električnog naboja na površinama nekih čvrstih tvari (minerala i polimera) prilikom njihove mehaničke deformacije. Godine 1880. Jacques i Pierre Curie otkrili su neuobičajeno svojstvo određenih kristaliničnih minerala koje se očitivalo u nastupanju električne polarizacije kristala pri primjeni mehaničke sile. Primijenjeno tlačno i vlačno opterećenje rezultiralo je naponom suprotnih polariteta na površini kristala iznosom koji je proporcionalan primijenjenom opterećenju. Nakon ovog otkrića potvrđen je i efekt suprotnog djelovanja: u slučaju da je kristal podvrgnut djelovanju električnog polja, dolazi do produljenja ili skraćanja dimenzija kristala ovisno o primijenjenom polaritetu električnog polja (Slika 20). Iznosi promjena dimenzija direktno su proporcionalni snazi električnog polja. Ove pojave su tada obilježene kao direktni (generiranje napona) i indirektni (generiranje pomaka) piezoelektrični efekt, a materijali koji ih omogućuju su piezoelektrici [APC International Ltd., 2011.].

Primjena piezoelektričnih materijala je vrlo široka pa ih je moguće pronaći u automobilskim svjećicama gdje se koriste kao upaljači, u tehnologiji senzora i dijagnostike zbog izrazite osjetljivosti na mehaničke podražaje i mogućnosti jednostavnog mjerenja (mehanički podražaj uzrokuje proporcionalno snažan električni signal), a često se koriste i kao ultraprecizni pokretači u sustavima za precizno pozicioniranje.

Pri mjerenju piezoelektričnog efekta, piezoelektrični materijal ponaša se kao dielektrik. U prisutnosti električnog polja, u dielektriku se induciraju dipoli (orijentirani suprotno smjeru silnica električnog polja). Svi pojedinačno inducirani dipolni momenti u dielektriku usmjereni su u istom smjeru, pa se mogu promatrati kao ukupan vektor polarizacije dielektrika, koji ima dimenziju, C/m^2 , tj. površinska gustoća naboja. Tada su električno polje i potencijal unutar i izvan takvog dielektrika ekvivalentni onima koji bi bili izazvani postojanjem samo površinskog naboja na dielektriku. Takav površinski naboj naziva se „vezani naboj“. Inducirani dipoli u dielektriku manifestiraju se kao površinski naboj [Đerek, 2002.].

Uz prirodne piezoelektrične materijale kao što je kvarc (SiO_2), u industriji se najčešće koriste umjetno stvoreni piezoelektrični materijali s višestruko boljim piezoelektričnim svojstvima kao što je, najčešće, olovo-cirkonat-titanat (komercijalni naziv PZT, opća formula $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$, $0 \leq x \leq 1$). PZT je kruti spoj olovo-cirkonata i olovo-titanata. Proizvodnja PZT-a odvija se u više koraka. Najprije se sirovi materijali metalnih oksida pomiješaju na temperaturi od 800-1000 °C pri čemu se formira perovskitni¹³ prašak koji se na kraju miješa s vezivnim sredstvom. Ova mješavina se tada sinterira u željeni oblik (diskovi, ploče, gredice...). Kada se ohlade, PZT kristali poprimaju tetragonalnu strukturu (Slika 19) s mehaničkom i električnom asimetrijom, te se na njih procesom metalizacije deponiraju elektrode [APC International Ltd., 2011.].



Slika 19. PZT kristalna rešetka : a) prije polariziranja – kubična rešetka i simetrični aranžman pozitivnih i negativnih naboja, b) nakon polariziranja – kristal s tetragonalnom rešetkom i električnim dipolom [APC International Ltd., 2011.]

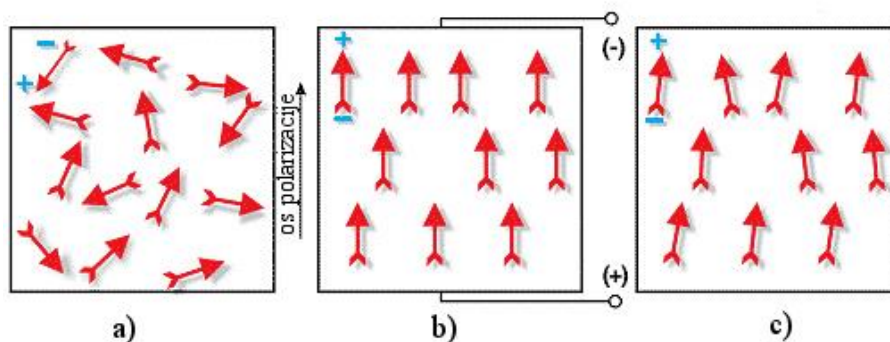
¹³ Perovskit je svaki materijal koji posjeduje strukturu jednaku strukturi $CaTiO_3$ [URL: Perovskit].

Kako bi materijal poprimio piezoelektrična svojstva, potrebno ga je polarizirati. Polariziranje se provodi zagrijavanjem materijala malo ispod Curieove temperature¹⁴ (čime se omogućuje slobodnije pomicanje molekula) i primjenom jakog električnog polja koje uzrokuje poravnavanje kristala unutar samog materijala u željenom smjeru ovisno o polaritetu električnog polja (Slika 20). Ova pojava se zadržava čak i kad se ukloni utjecaj električnog polja i materijal ohladi. Prije procesa polarizacije sve su dipolne domene u materijalu nasumično orijentirane i stoga je nemoguće koristiti piezoelektrična svojstva materijala. [APC International Ltd., 2011.].

PZT je najčešće korišteni piezoelektrični materijal (polikristalinična keramika) zbog izvrsnih piezoelektričnih svojstava iako je krhak. Dostupno je nekoliko različitih kombinacija i receptura PZT materijala s različitim svojstvima.

Poliviniliden-difluorid (PVDF) je pak piezoelektrični polimer¹⁵ koji se koristi za specifične primjene. Iako su mu svojstva daleko daleko slabija u odnosu na PZT, atraktivan je zbog visoke vlačne čvrstoće i zbog toga što nije krhak.

PZN-PT je monokristalni piezoelektrični materijal sličan PZT-u i dobrih piezoelektričnih svojstava, ali vrlo skup. [Roundy², 2003.]



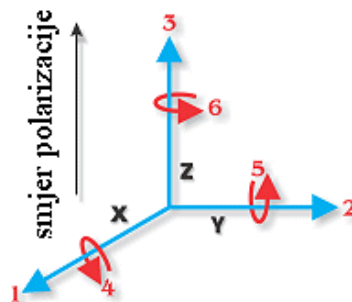
Slika 20. Polariziranje piezoelektrične keramike: a) nasumična orijentacija dipola, b) polariziranje pomoću DC električnog polja, c) zaostala polarizacija nakon prestanka djelovanja električnog polja [APC International Ltd., 2011.]

¹⁴ Curieva temperatura je temperatura pri kojoj kristalna struktura prolazi kroz fazu promjene iz nesimetrične rešetke (kao što je tetragonska – piezoelektrični oblik) u simetričnu rešetku (kao što je kubična – nepiezoelektrični oblik) ($150\text{ °C} < T_c < 250\text{ °C}$) [URL: Curie].

¹⁵ Prva opažanja piezoelektričnih svojstava polimera utvrdili su 1969. god. Kawai i Heiji [URL: PVDF]

2.6.3.2 Piezoelektrične konstante i temeljne jednadžbe piezoelektričnosti

Nepolarizirani piezoelektrični materijali su izotropni, a ako se nalaze u polariziranom stanju postaju anizotropni s izraženom izotropijom u smjeru polariziranja (Slika 19) pa se stoga konstante koje opisuju njihova fizikalna svojstva moraju odnositi na smjer primijenjene mehaničke sile ili električnog polja, kao i na smjerove okomite na primijenjene sile/polja. Shodno tome, svaka konstanta posjeduje dva indeksa: prvi se odnosi na smjer u kojem se proizvodi električno polje, dok drugi označava smjer mehaničkog napreznja koje materijal podnosi. Smjer pozitivne polarizacije obično se podudara sa z osi ortogonalnog koordinatnog sustava, a i većina monolitnih piezokeramika kao što je PZT pokazuje poprečnu izotropnost po osi z . Brojevi 1, 2 i 3 odnose se na glavne osi, dok se brojevi 4, 5 i 6 odnose na smične efekte oko osi 1, 2 i 3 (Slika 21). Polariziranje je najčešće izvedeno u smjeru broj '3' [APC International Ltd., 2011.].



Slika 21. Piezoelektrične osi s označenim indeksima i najčešćim smjerom polarizacije [APC International Ltd., 2011.]

Najčešće korišteni način općenite upotrebe piezoelektričnih materijala (senzori, aktuatori) je u '33' poretku, u kojem se materijal napreže u smjeru polarizacije. Iako je konstanta piezoelektričnog naboja d_{33} viša od d_{31} , '33' način rada je teže izvediv za pretvorbu energije zbog potrebe visokih rezonantnih frekvencija (ili velikih inercijalnih masa koje je potrebno koristiti za spužtanje radne frekvencije). Zbog toga je najčešći način na koji se koristi direktni piezoelektrični efekt pri pretvaranju kinetičke energije vibracija iz okoliša u električnu energiju tzv. '31' način rada, tj. naprežanjem u smjeru okomitom na smjer polarizacije (ako je piezoelektrik polariziran po osi z odnosno smjeru '3', tada je naprežanje primijenjeno po osi x , odnosno smjeru '1', (Slika 21). Temeljne jednadžbe piezoelektričnosti u tom slučaju glase¹⁶ [Roundy & Wright, 2004.]:

¹⁶ Indeksi 'E' i 'T' se odnose na uvjete konstantnog električnog polja odnosno konstantnog napreznja.

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} \mathcal{E}_3 \quad (2.1)$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T \mathcal{E}_3, \quad (2.2)$$

pri čemu su:

S_1 – deformacija u smjeru '1', m/m,

s_{11}^E – koeficijent podatljivosti piezoelektričnog materijala za naprezanje i deformaciju u smjeru '1', mjeren pri konstantnom električnom polju, m²/N,

T_1 – komponenta naprezanja u smjeru '1', N/m²,

d_{31} – konstanta piezoelektričnog naboja, za induciranu polarizaciju u smjeru '3' po jedinici naprezanja u smjeru '1', m/V, C/N,¹⁷

\mathcal{E}_3 – električno polje u smjeru '3', N/C,

D_3 – električni pomak (odnosno gustoća naboja) u smjeru '3', C/m², a

ε_{33}^T – električna permitivnost mjerena pri konstantnom naprezanju u smjeru '3', F/m.

Jednadžba (2.1) bez izraza $d_{31} \mathcal{E}_3$ predstavlja Hookeov zakon, a jednadžba (2.2) bez izraza $d_{31} T_1$ predstavlja oblik Gaussovog zakona. Ove jednadžbe predstavljaju dakle spregu između mehaničke i električne domene koja omogućuje pretvorbu mehaničke energije u električnu i obrnuto. Električno polje primijenjeno na materijal utječe na mehaničko ponašanje materijala (2.1), a naprezanje u materijalu utječe na njegova dielektrična svojstva (2.2) [Roundy², 2003.].

Veličina kojom se opisuje sposobnost materijala za pretvorbu mehaničke energije u električnu i obrnuto naziva se koeficijentom elektromehaničkog sprežanja i označava se slovom k . Pri tome prvi indeks označava smjer postavljanja elektroda (smjer polarizacije), a drugi indeks označava smjer primjene mehaničkog opterećenja¹⁸ [APC International Ltd., 2011.]:

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T}. \quad (2.3)$$

¹⁷ U slučaju kada se sila primjenjuje na cijeloj površini elektrode.

¹⁸ Ovdje je predstavljen oblik koeficijenta piezoelektričnog sprežanja za piezoelektrik u obliku ploče. Za disk, ili gredu izraz poprima drugačiji oblik.

Iz veze između konstante piezoelektričnog naboja d i koeficijenta elektromehaničkog sprežanja k , vidljivo je da materijali s većim koeficijentom elektromehaničkog sprežanja i većim naprežanjem posjeduju jači potencijal za pretvorbu energije (veći koeficijent d pogoduje učinkovitijoj pretvorbi energije). Permitivnost ϵ i modul elastičnosti $E=1/s_{11}^E$ su također dva izrazito bitna svojstva piezoelektričnog materijala. Visoka konstanta permitivnosti je poželjna jer smanjuje impedanciju¹⁹ izlaznog signala, a piezoelektrični materijali često imaju visoku impedanciju koja rezultira visokim naponom i niskom jačinom struje. Modul elastičnosti definira krutost (elastičnost) piezoelektričnog materijala [Roundy², 2003.].

2.6.3.3 Izvedbe pretvarača temeljenih na piezoelektričnom konceptu

Postoji mnogo različitih izvedaba pretvarača temeljenih na piezoelektričnom konceptu, i to od mikro- (μm – mm) do makro- razina ($> \text{cm}$). Većinu ovih izvedaba moguće je podijeliti na [Beeby et al., 2006.]:

1. Udarne izvedbe pri kojima se neperiodični ili periodični mehanički udari prenose na piezoelektrični materijal, a dio energije udara se pretvara u električnu energiju. Ove izvedbe pogodne su za pogon nosivih tehnologija i to na mikro i makro razinama (npr. umetci u tenisicama, Slika 22; c, g i h).
2. Izvedbe koje koriste nano/mikro žice cinkovog oksida (ZnO) pogodne su za izvedbe na mikro razini, npr. pretvaranje niskih frekvencijskih izvora kao što su protok fluida,²⁰ disanje ili pomicanje glasnica u električnu energiju.
3. Neinercijske izvedbe temeljene na deformacijama podatljivih piezoelektričnih struktura pri kojima se piezoelektrični materijal koristi u '33' načinu rada za razliku od '31' načina rada opisanog u 2.6.3.2. Ove izvedbe su korisne za autonomne električne prekidače (npr. na daljinskim upravljačima) ili već spomenute umetke u tenisicama, a često se koriste u obliku savitljivih membrana od piezoelektričnog materijala.
4. Najčešće korištena i najviše istraživana konzolna izvedba koja se, kao i najčešće primjenjivana izvedba elektromagnetskog koncepta, temelji na sustavu mase (utega) i opruge (konzole) (Slika 22 a).

¹⁹ Impedancija - mjera suprotavljanja prolasku izmjenične struje kroz strujni krug.

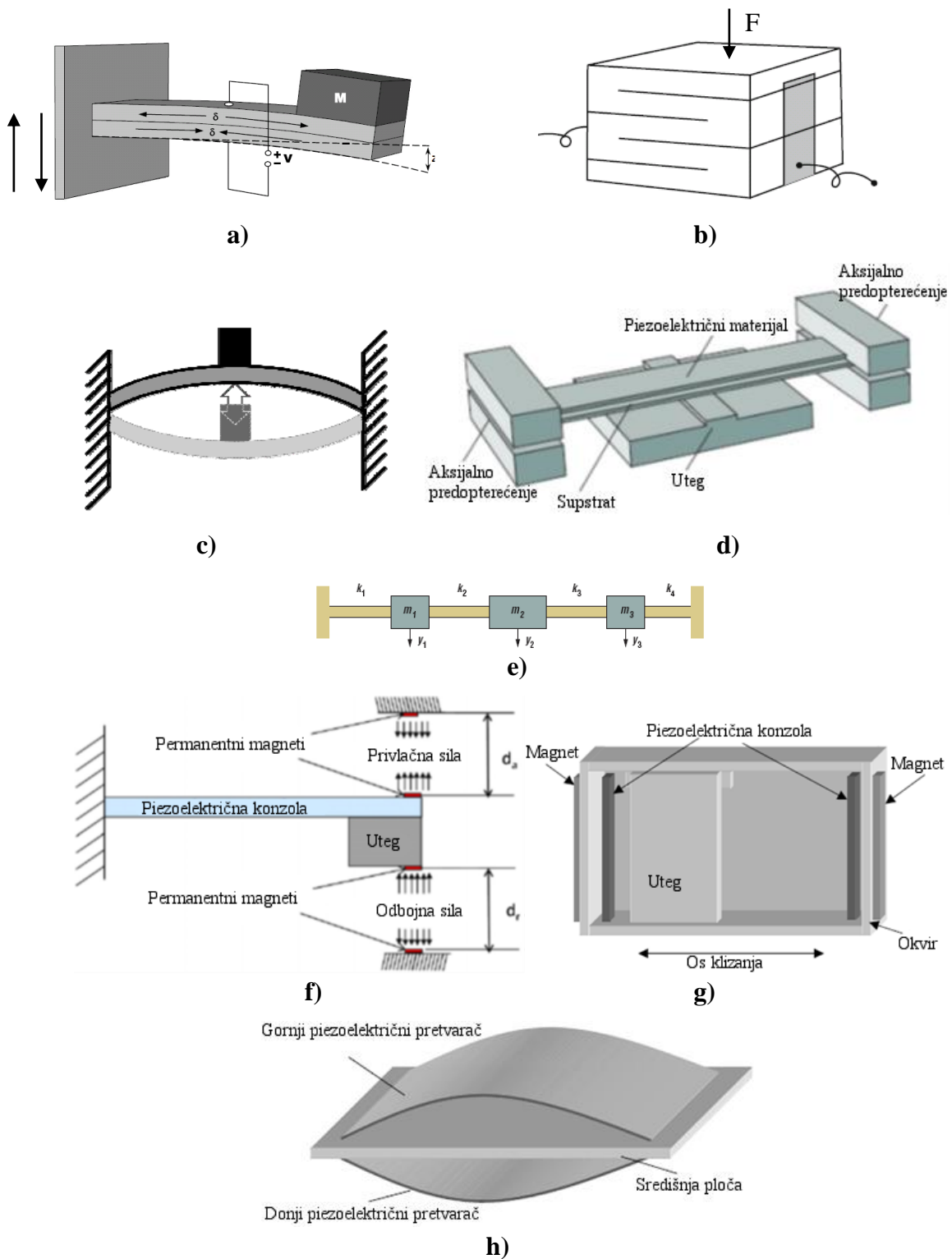
²⁰ Primjerice protok krvi u žilama.

Slika 22 prikazuje više različitih konfiguracija piezoelektričnih uređaja za prikupljanje niskorazinske kinetičke energije vibracija: a) najčešće korišteni piezoelektrični koncept – konzolni inercijski sustav mase i opruge, b) primjer neinercijskog pretvarača napravljenog od podatljive piezoelektrične strukture c) bi-stabilna konfiguracija koja omogućuje pretvaranje udara s velikim ubrzanjima [Beeby et al., 2006.], d) inercijski sustav s centralnim utegom za ugađanje frekvencije s aksijalnim tlačnim prednaprezanjem grede [Roundy et al., 2005.], e) sustav s više masa i opruga za pretvaranje šireg spektra kinetičke energije vibracija [Roundy et al., 2005.], f) konzolni sustav s magnetskom ugodom frekvencije osciliranja za pokrivanje šireg spektra okolišnih vibracija [Challa et al., 2007.], g) udarni sustav s kliznom masom i magnetima kao oprugama za uporabu u nosivim tehnologijama [Beeby et al., 2006.], i h) dvostruko prednapregnuti sustav za pretvorbu udarne kinetičke energije [Schenck i Paradiso 2001.]

U ovoj disertaciji temeljito je istražena četvrta metoda spomenuta na početku ovog potpoglavlja, koja se temelji na korištenju inercijalnog sustava mase i piezoelektrične konzole. Piezoelektrična konzola je najčešće sastavljena od centralnog supstratnog sloja metala ili materijala s karbonskim vlaknima na koji su zalijepljeni gornji i donji sloj piezoelektričnog materijala (Slika 22 a). Na slojeve piezoelektričnog materijala su postupkom metalizacije nanosene tanke metalne elektrode (na obje strane piezoelektričnog sloja, dakle četiri elektrode). Pri vibracijskoj uzbudi nastupaju prisilne oscilacije konzole pri čemu se slojevi piezoelektričnog materijala naizmjenice opterećuju na vlak i tlak. Za vrijeme osciliranja, na slojevima piezoelektrika nakupljaju se naboji suprotnih predznaka što na elektrodama koje prekrivaju piezoelektrik rezultira izmjeničnom električnom strujom [Roundy², 2003.].

Element opterećen savijanjem, radi postizanja funkcije generatora, može biti izveden na mnogo načina, ali se upravo opisana konfiguracija najčešće koristi i izdvaja od ostalih iz više razloga [Roundy et al., 2002.]:

- konzolna izvedba rezultira najmanjom krutošću za zadanu dimenziju sustava što je vrlo bitno u slučaju ograničenih konačnih dimenzija senzorskog čvora;
- sveprisutnost vibracija kao spremnika energije (poglavito u industrijskim uvjetima);
- velika gustoća dobivene snage po jedinici volumena uređaja (Tablica 4);
- linearnost elektromehaničke sprege (utjecaja električne domene na mehaničku i obrnuto);
- linearnost odnosa deformacije i naprezanja u elastičnom području;
- mogućnosti postizanja velikih deformacija i niskih vlastitih frekvencija;
- jednostavna minijaturizacija i integracija u MEMS/NEMS sustave.



Slika 22. Različite konfiguracije uređaja za žetvu energije: a) konzolni sustav [Roundy, 2003.] b) podatljiva piezoelektrična struktura [Priya i Inman, 2009.] c) bi-stabilna konfiguracija [Beeby et al., 2006.], d) aksijalno prednapregnuta konstrukcija [Roundy et al., 2005.], e) sustav s više masa [Roundy et al., 2005.], f) konzolni sustav s magnetskom ugodom frekvencije osciliranja [Challa et al., 2007.], g) udarni sustav [Beeby et al., 2006.] i h) dvostruki prednapregnuti sustavi [Schenck i Paradiso 2001.].

Što se komercijalne primjene tiče, zadnje desetljeće pojačanog istraživanja koncepta piezoelektrične pretvorbe iznjedrilo je brojne tvrtke koje su razvile komercijalno dostupna rješenja od kojih su neka i multi-modalna tj. objedinjuju više različitih koncepata pretvorbe energije iz različitih izvora u jednom proizvodu. Na tržištu su se posebice istaknuli proizvođači piezoelektričnih pretvarača kao što su: Advanced Cerametrics Inc. [URL: Advanced Cerametrics], Mide Technology Corp. [URL: Mide], Piezo Systems Inc. [URL: Piezo systems], AdaptivEnergy [URL: AdaptivEnergy], Ambio Systems [URL: Ambiosystems] i MicroStrain [URL: Microstrain]. Svi navedeni proizvođači nude gotove pretvarače s većim ili manjim stupnjem mogućnosti preinake za određenu primjenu (npr. ugađanje uređaja na određenu uzbudnu frekvenciju) (Slika 23 i Slika 24). Najveći proizvođač je konzorcij EnOcean [URL: EnOcean] specijaliziran za bezbaterijske prekidače temeljene na piezoelektričnom efektu.



Slika 23. Komercijalno dostupni uređaji za pretvaranje kinetičke energije vibracija u električnu energiju temeljeni na piezoelektričnom efektu: Midé Vulture (kombinacija sa solarnom žetvom energije), Advanced Cerametrics, Microstrain i AdaptivEnergy [URL: Advanced Cerametrics, URL: Mide, URL: AdaptivEnergy, URL: Microstrain]



Slika 24. Piezoelektrične konzole za razvoj uređaja za prikupljanje niskorazinske energije vibracija: Advanced Cerametrics i Piezo Systems [URL: Piezo systems, URL: Advanced Cerametrics]

Najveći napredak u vidu nosivih tehnologija ostvaren je 2013. godine kada su inženjeri i doktori medicine sa Sveučilišta u Illinoisu konstruirali sustav za pretvorbu energije unutarnjih ljudskih organa kao što su srce ili pluća (Slika 25.). Proveli su eksperimente na životinjama i utvrdili da je moguće proizvesti dovoljno energije za održavanje konstantnog napona na bateriji od 3,8V

(što je dovoljno za pogon bilo kojeg standardnog mikroupravljača). Ukupne dimenzije sustava s pripadajućom elektronikom za upravljanje energijom i punjivom baterijom bile su 2 x 2,5 cm [Dagdeviren et al, 2013.].



Slika 25. Piezoelektrična membrana za pretvaranje niskorazinske energije unutarnjih ljudskih organa u električnu energiju [Dagdeviren et al, 2013.].

2.7 Pregled radova na polju korištenja piezoelektričnog efekta kod prikupljanja niskorazinske kinematičke energije vibracija iz okoliša

Na temelju ranije iznesenoga i obrazloženih prednosti korištenja piezoelektričnog koncepta u obliku jednostavne konzolne konstrukcije za prikupljanje niskorazinske kinematičke energije vibracija iz okoliša, u ovom dijelu rada sažeto je izneseno stanje tehnike dosad istraženih analitičkih i numeričkih metoda korištenih za opisivanje ovih naizgled jednostavnih, ali elektromehaničkim odzivom kompleksnih sustava.

2.7.1 Pregled analitičkih modela i eksperimentalnih istraživanja

Hausler i Stein [Hausler i Stein, 1984.] prezentirali su jedan od prvih dokumentiranih eksperimenata prikupljanja niskorazinske kinematičke energije vibracija iz okoliša korištenjem piezoelektričnih materijala, točnije PVDF (poliviniliden fluorid) filma umetnutog u prsni koš psa koji bi svojim disanjem proizvodio energiju u elongacijskoj fazi disanja. Baza koncepta bila je iskoristiti dobivenu energiju za medicinske svrhe, te je predviđeno da bi uređaj mogao proizvoditi snagu reda veličine 1 mW. Međutim, mehanička simulacija udisanja pokazala je razvoj snage od samo 20 μ W, dok je stvarnim eksperimentom dobiveno 18 μ W. Deformacija je iznosila samo 0,5% u odnosu na predviđenih 2% te je snaga bila premala za predviđenu primjenu.

Starner [Starner, 1996.] je istražio količinu energije koju proizvodi i skladišti ljudsko tijelo. Izveo je više teorijskih proračuna količine snage koja može biti generirana putem uređaja koji

koristi energiju topline tijela, disanja ili krvnog tlaka, te zaključio da je najpogodnija i najpraktičnija metoda prikupljanja ljudske energije, koja ujedno i najmanje ometa u svakodnevnim aktivnostima, ljudsko hodanje.

Naširoko korišten model jednadžbi gibanja uređaja za prikupljanje niskorazinske energije (kasnije pokazan netočnim za neke primjene), a koji se sastoji od seizmičke mase, opruge i prigušivača, razvili su Williams i Yates prilikom predlaganja uređaja, koji bi vibracijsku energiju okružja u koji je postavljen, pretvarao u električnu [Williams i Yates, 1996.]. Izlazna energija izvedena je iz energije koja bi teorijski mogla biti disipirana u otporniku/prigušivaču pretvorbom mehaničke u električnu energiju. Temeljeno na izvedenim jednadžbama, uočeno je da je izlazna snaga takvog generatora proporcionalna trećoj potenciji vibracijske frekvencije, te da mora biti osigurana mogućnost velikih pomaka mase.

Kimura je 1998. godine zaštitio patent uređaja za piezoelektričnu pretvorbu niskorazinske energije bez vanjskog izvora napajanja koji je akumulirao električni naboj nakon ispravljanja generiranog izmjeničnog napona. Navedeni izvor napona bila je barem jedna slobodno vibrirajuća piezoelektrična ploča [Kimura, 1996.].

Korištenjem tri različita uređaja za "parazitsko" prikupljanje energije ljudskog hodanja, koja bi inače bila izgubljena u okolišu, Kymiss et al. uspjeli su izmjeriti 1 mJ po koraku za PVDF, 2 mJ za PZT (olovo-cirkonat-titanat) dok je rotacijski magnetski generator bio preglomazan i nepraktičan za ljudsku upotrebu [Kymiss et al. 1998.].

Roundy i suradnici [Roundy et al, 2002.] razmatrali su potencijal upotrebe vibracijske energije u okolišu kao izvora energije. U svome radu analizirali su moguće izvore energije za napajanje čvorova bežičnih senzora i prikupili podatke o ubrzanju i frekvenciji uobičajenih vibracijskih izvora. Istražili su i također ispitali i piezoelektrične i kondenzatorske pretvarače. Analiza je pokazala da piezoelektrični pretvarači omogućavaju proizvodnju više snage po jedinici volumena nego što je to moguće kod kondenzatorskih pretvarača, te da imaju svojstvo generiranja znatnih količina energije pri nižim frekvencijama, što ih čini poželjnijima za određene primjene [Roundy et al, 2002.].

Sodano et al. istražili su količinu snage koja može biti proizvedena vibriranjem piezoelektrične konzole. Pri istraživanju je korišten elektromagnetski vibracijski uređaj za uzbuđu koji je generirao rezonantne i nasumične signale te je pokazano da konzola može proizvesti 2 mW snage, napuniti kondenzatorski sklop ili obnoviti potpuno ispražnjenu bateriju [Sodano et al., 2002].

Modele predviđanja izlazne snage konzole koja sadrži piezoelektrične materijale istražio je Eggborn [Eggborn, 2003.]. Provedena je i parametarska studija radi određivanja optimalne lokacije PZT-a i uzbudne funkcije sustava. Eksperimentalno je pokazano da Euler-Bernoullijeva metoda omogućava najbolja predviđanja razvijene snage.

Roundy i suradnici predlažu trapezno oblikovanu konzolu kojom je moguće ujednačiti raspodjelu napreznja kroz strukturu, nasuprot pravokutnoj konzoli s nejednolikom raspodjelom. Eksperimentalno je pokazano da „gotovo trokutasta“ trapezna konzola jednakog volumena kao pravokutna proizvodi 30% više snage od pravokutne [Roundy et al., 2005.].

Kako bi razvio potpuno pasivni sustav ugađanja na rezonantnu frekvenciju, Shahruz je konstruirao uređaj koji ima mogućnost rezonantnog odziva pri različitim frekvencijama bez potrebe prilagođavanja. Uređaj se sastojao od više konzola različitih dužina i masa spojenih na zajednički temelj. Svaka konzola ima jedinstvenu vlastitu frekvenciju te se njihovom kombinacijom ostvaruje tzv. mehanički pojasni propusnik [Shahruz, 2006.].

Erturk i Inman dokazali su da dotadašnji model Williamsa i Yatesa (1996.), kojega su kasnije koristili i drugi istraživači za modeliranje piezoelektričnih konzola, nije primjenjiv na iste već samo na elektromagnetsko prikupljanje niskorazinske energije. Pri piezoelektričnom prikupljanju energije efekt piezoelektričnog spreznja ne može biti prikazan samo električno induciranim viskozim prigušivačem proporcionalnim isključivo brzini (kao što je to slučaj kod elektromagnetskih pretvarača, Slika 15). Dokazali su isto tako da bi se za pravilno predviđanje svih fenomena koji se javljaju pri rezonantnoj frekvenciji, utjecaj piezoelektričnog spreznja trebao detaljnije razmotriti u mehaničkoj domeni [Erturk i Inman, 2008.].

Erturk i Inman razvijaju i model kontinuirane strukture konzolnog uređaja za prikupljanje niskorazinske energije kojim se modificira osnovna Euler-Bernoullijeva jednadžba uzimajući u obzir Kelvin-Voigtovo prigušenje, elektromehaničko spreznje, inercijsku masu na slobodnom kraju konzole (ili vršnu masu) i relativno gibanje konzole u odnosu na uklještenje [Erturk i Inman, 2009.]. Model pokazuje stvarni modalni dinamični pomak, za razliku od statičkog koji je rezultat ranije korištenog modela s jednim stupnjem slobode gibanja. Također je pokazana velika relativna greška statičkog pomaka u odnosu na dinamički, poglavito u području uklještenja konzole. Utjecaj elektromehaničkog spreznja je uključen u jednadžbu gibanja pa je moguće predvidjeti promjene vlastite frekvencije zbog promjene otpora.

Za uređaje za prikupljanje niskorazinske vibracijske energije značajna je minijaturizacija samoga uređaja. Marzincki, Ammar et al. razvili su bežični senzorski čvor s asinkronom

arhitekturom pogonjen mikropiezoelektričnim vibracijskim generatorom. Generator je proizveden MEMS proizvodnom tehnologijom DRIE (engl. *Deep Reactive Ion Etching*) na silicijskom supstratu. Sastoji se od mase u vidu silicijske kocke spojene konzolom za supstrat. Sloj aluminijevog nitrida smješten je iznad konzole i stvara električne naboje prilikom savijanja konzole. Dimenzije mase su $800 \times 800 \mu\text{m}$ dok je konzola duga $400 \mu\text{m}$ i široka $800 \mu\text{m}$. Maksimalna snaga na razini $1 \mu\text{W}$ je dobivena pri frekvenciji od $1577,5 \text{ Hz}$ za visoke i $1581,5$ za niske vrijednosti otpora radnog trošila [Marzencki et al., 2007.].

Brusa i suradnici [Brusa et al., 2009] su optimizirali geometriju piezoelektričnih vibracijskih uređaja za prikupljanje niskorazinske kinematičke energije iz okoliša s ciljem povećanja snage po jedinici volumena. Uređaji su analitički modelirani, verificirani korištenjem analize s MKE i eksperimentalno ispitani.

2.7.2 Numeričko modeliranje piezoelektričnih konzola

U dostupnim bibliografskim bazama moguće je pronaći neveliki broj znanstvenih članaka čija je tema simuliranje ponašanja konzolnih piezoelektričnih pretvarača vibracijske energije u električnu, korištenjem metode konačnih elemenata (MKE) s komercijalno dostupnim programima za provedbu MKE, kao što su ANSYS i COMSOL. Rijetki radovi iznose detaljne usporedbe simulacija s eksperimentima i dostupnim matematičkim modelima te je stoga teško zaključiti koja je metoda/program najbolji za predmetni slučaj. U nastavku se iznosi pregled najzanimljivijih radova i izvedenih zaključaka.

Staworko i Uhl 2008. godine u preglednom članku uspoređuju različite analitičke i numeričke metode simuliranja piezoelektričnih komponenata [Staworko i Uhl, 2008.]. Nakon kratke usporedbe metoda analitičkog simuliranja putem elektromehaničke analogije 'ekvivalentnog' električnog kruga korištenjem programskih paketa MATLAB/SIMULINK i SPICE, iznose usporedbu dostupnih komercijalnih programa za simuliranje pomoću metode konačnih elemenata, a da pri tome imaju ugrađenu tzv. *multi-physics* mogućnost simuliranja piezoelektričnih materijala, od kojih navode ANSYS, ABAQUS i MSC NASTRAN. Od spomenutih MKE programskih paketa samo ANSYS ima mogućnost simuliranja sprege kompletne elektromehaničke domene, a zbog mogućnosti definiranja komponenata električnog kruga i elektroda. Isto tako, pomoću ANSYS-a je jedino moguće promatrati i prisutne nelinearnosti. U zaključku članka iznose usporedbe rezultata između navedenih metoda i programskih paketa, te je očigledno da rezultati međusobno znatno odstupaju.

N. Elvin i A. Elvin, po prvi put, 2009. godine predstavljaju egzaktnu metodu numeričke simulacije piezoelektričnih pretvarača energije vibracija u električnu energiju. Ističu da su korišteni alati u ANSYS-u i ABAQUS-u primjereni za simulacije piezoelektričnih komponenata u pokretačkom načinu rada, pri indirektnom piezoelektričnom efektu ili pak, u slučaju ANSYS-a, za približnu procjenu rada pretvarača korištenjem jednostavnih elektroničkih komponenata. Predlažu kombinaciju MKE paketa ANSYS za mehaničku domenu, bilo koji SPICE paket za električnu domenu, te MATLAB kao sučelje koje povezuje ANSYS i SPICE. Ističu da je postupak dugotrajan i kompliciran zbog interakcije triju različitih programskih paketa u svakoj pojedinoj iteraciji, ali pomoću njega točno potvrđuju Erturkov analitički model, predviđajući tzv. '*backward coupling*' efekt, tj. utjecaj električnog potencijala na mehaničku domenu odnosno na vibracije simulirane strukture [Elvin i Elvin, 2009.].

Y. Yang i L. Tang osvrću se na navedeni članak Elvina i Elvina, te pronalaze brže i jednostavnije rješenje eliminirajući MATLAB računanje pri svakoj iteraciji. Korištenjem samo ANSYS-a i SPICE-a postižu rezultate kao i Elvin i Elvin, pritom koristeći ANSYS za dobivanje svih potrebnih podataka za SPICE simulaciju. Navode kako je jednostavna analiza u ANSYS-u dovoljna za točno predviđanje maksimalne snage koja se može dobiti iz piezoelektričnog pretvarača. Posebno naglašavaju odvojeno definiranje svih elektroda radi postizanja ujednačenijeg potencijala, za razliku od zajednički definiranih elektroda kao što je praksa opisana u ostalim člancima [Yang i Tang, 2009.].

M. Zhu et al. razvili su spregnuti numerički model piezoelektričnog pretvarača u ANSYS-u korištenjem konačnih elemenata SOLID5 i konačnog elementa CIRC94 koji predstavlja jednostavni otpornik (sa zajedničkom spregom elektroda). Pri tom su iznijeli rezultate simulacija [Zhu, M., et al., 2009.] na temelju kojih postavljaju dotad neiznesene teze: a) maksimalna izlazna snaga nije prisutna pri maksimalnim amplitudama vibriranja, b) maksimalna izlazna snaga nije prisutna pri optimalnoj vrijednosti otpornika, te c) koeficijent sprege piezoelektričnog materijala nije jednak koeficijentu sprege ukupnog sustava (dva sloja piezoelektrika + centralni potporni sloj). Simulacije nisu usporedili s analitičkim modelom niti s eksperimentom tako da se ne može izvesti zaključak o valjanosti samog modela konačnih elemenata ili iznesenih teza.

D. Zhu et al. napravili su eksperimentalnu i numeričku analizu višeslojnih piezoelektričnih bimorfni generatora (jednoslojnog, dvoslojnog i troslojnog). U zaključku iznose kako se rezultati eksperimenata i simulacija vrlo dobro poklapaju i to potkrjepljuju dijagramima, te

dokazuju kako dvoslojni bimorf sa stajališta najveće izlazne snage pokazuje bolje rezultate u odnosu na jednoslojne i troslojne bimorfe [Zhu et al., 2010.].

Simulacijom koju su izveli 2010. godine, Benasciutti et al., koristeći ANSYS metodu istovjetnu onoj predstavljenoj od strane M. Zhu et al., uspjeli su dobiti vrlo blisku podudarnost eksperimentalnih i simuliranih rezultata [Benasciutti et al. 2010.].

Long Zhang u svojoj doktorskoj disertaciji iznosi sličnu metodu koja se koristi u prethodnim trima opisanim člancima. U zaključku poglavlja posvećenom MKE analizi piezoelektričnih generatora, Zhang dobiva izrazito dobru podudarnost s malim odstupanjima, između eksperimentalnih i simuliranih rezultata za piezoelektrični uređaj za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša [Zhang, 2010.].

U ovom je poglavlju iznesena motivacija za istraživanje uređaja za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša te su opisane i moguće primjene navedenih tehnologija. Predstavljene su glavni izvori energije i koncepti koji se koriste za pretvaranje istih u električnu energiju kao i već gotova rješenja prisutna na tržištu. Posebna pažnja posvećena je uređajima za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju s naglaskom na piezoelektrični koncept koji je u literaturi opisan kao tehnologija koja može proizvesti visoku gustoću pretvorene energije po jedinici volumena uređaja za pretvorbu. Ovaj koncept je atraktivan i zbog brojnih tehnoloških pogodnosti navedenih u cjelini 2.6.3.3 od kojih se izdvajaju spomenuta gustoća proizvedene energije, sveprisutnost vibracija kao izvora energije i mogućnost integracije s MEMS tehnologijama i proizvodnim procesima. Na kraju poglavlja dan je pregled radova iz područja piezoelektrične žetve energije iz kojeg je razvidno da je potrebno detaljnije istražiti metode analitičkog i numeričkog modeliranja piezoelektričnih pretvarača, ali i eksperimentalno ispitati komercijalno dostupne uređaje za koje su često nedostupni svi podaci potrebni za uspješnu implementaciju (a i rijetko se spominju u literaturi). U sljedećim je poglavljima predstavljen analitički model konzolnog piezoelektričnog pretvarača temeljen na metodi distribuiranih parametara i Euler-Bernoullijevoj jednačini, kao i numerički model piezoelektričnog pretvarača razvijen metodom konačnih elemenata. Konačno, rezultati modela uspoređeni su s rezultatima dinamičkih eksperimenata kako bi se utvrdile karakteristike uređaja dostupnih na tržištu, a predstavljeno je i eksperimentalno potvrđeno originalno rješenje autonomnog bežičnog mjerača tlaka u automobilskim gumama.

3. Modeliranje konzolnih piezoelektričnih uređaja za žetvu energije

Vibracijski uređaji za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju osobito su dobro obrađeni u literaturi, što je vidljivo iz pregleda radova u potpoglavlju 2.7.1, ali i iz karakteristika predloženih izvedbi sustava u potpoglavlju 2.6.3.3. Ovakvi sustavi su privlačni zbog velike gustoće energije (Tablica 4), konstrukcijske jednostavnosti sustava temeljenih na konzolnim izvedbama, ali i zbog velikog potencijala minijaturizacije na mikro i nano razinama. U literaturi je predloženo više različitih metoda za analitičko predviđanje ponašanja ovih ponašanjem kompleksnih sustava, a kronološki su razvijani ovim redoslijedom: 1. metoda s koncentriranim parametrima i jednim stupnjem slobode gibanja (engl. *lumped parameter model*), 2. Rayleigh-Ritz metoda s diskretno distribuiranim parametrima temeljena na Hamiltonovom pristupu, 3. Euler-Bernoullijeva metoda modeliranja konzole uparena s temeljnim jednadžbama piezoelektričnosti, i 4. metoda sustava s potpuno distribuiranim parametrima temeljena na Euler-Bernoullijevoj jednadžbi gibanja konzole (engl. *distributed parameter model*). U nastavku je ukratko objašnjena svaka od četiri navedene metode.

Metoda s koncentriranim parametrima²¹ je prva metoda koja je upotrijebljena za predviđanje ponašanja sustava za piezoelektričnu pretvorbu kinetičke energije vibracija te je ujedno i najlakša za implementaciju i početno razumijevanje sustava [Williams i Yates, 1996.; Roundy, 2003.; duToit et al., 2005.]. Ova metoda se temelji na razmatranju jednostavnog seizmički pobuđenog sustava s jednim stupnjem slobode gibanja, a preuzeta je iz istraživanja koje su sprovedli Williams i Yates na elektromagnetskim pretvaračima. Opis ovakvog jednostavnog sustava može se pronaći u svakom udžbeniku koji se bavi teorijom oscilacija. Kako je vidljivo na Slici 15, sastoji se od, okvira (uklještenja) pobuđenog vanjskim izvorom vibracija i koncentriranih parametara: opruge (konzole), uzbudne mase (utega) i prigušivača koji su smješteni unutar referentnog okvira. Ovakav pristup je pogodan jer je električna domena sustava već sastavljena od koncentriranih parametara: unutarnjeg kapaciteta piezoelektrične konzole²² i otpornog elementa radnog trošila. Mehanička i električna domena povezuju se putem temeljnih jednadžbi piezoelektričnosti opisanih u potpoglavlju 2.6.3.2, a piezoelektrična

²¹ Misli se na parametre koji nisu ni prostorno ni vremenski distribuirani.

²² Sloj piezoelektričnog materijala između dvije elektrode se može promatrati kao kondenzator s točno određenim kapacitetom koji se može izmjeriti pri uzbudi sloja.

sprega je jednostavno prikazana prigušnim elementom sustava. Zbog jednostavnosti modela, moguće je lako i brzo dobiti procjenu rada sustava. Međutim, ova metoda uključuje znatna pojednostavljenja koja uvelike povećavaju grešku i odstupanja u usporedbi s realnim sustavima. Najvažniji nedostaci su zanemareni utjecaj mase konzole čija inercija ima značajan utjecaj na nastajanje pobude, zanemareno prigušenje (unutarnje trenje) materijala, zanemareni viši vibracijski oblici (engl. *vibration modes*) i fenomen rezonancije, netočno predstavljane fizike piezoelektrične pretvorbe jednostavnim viskoznom prigušivačem²³, kao i netočna raspodjela naprezanja po duljini konzole zbog pretpostavljene koncentrirane sile. Zbog navedenih pojednostavljenja u modelu, elektromehanički odziv konzole je netočan i ovaj model se smije koristiti samo za modeliranje jednostavnih elektromagnetskih generatora prikazanih u točki 2.6.2.

Druga navedena metoda bazira se na diskretiziranom Rayleigh-Ritz energetsom pristupu²⁴ modeliranja s prostorno distribuiranim parametrima koji se često koristi za pronalaženje vlastitih vrijednosti mehaničkih sustava. Ovu je metodu upotrijebilo više istraživača pri modeliranju sustava za piezoelektričnu pretvorbu kinetičke energije vibracija. Pri tome parametri sustava nisu potpuno prostorno distribuirani već je beskonačni broj sloboda gibanja distribuiranog sustava diskretiziran na točno određeni broj [Sodano et al., 2004.; duToit et al., 2005.]. Ova je metoda približna, a za razliku od analitičkog rješenja, zahtijeva značajno računalno vrijeme da bi se dobilo rješenje. [Erturk i Inman, 2011.]

Treća metoda temelji se na pronalaženju vlastitih oblika konzole rješavanjem Euler-Bernoullijeve jednadžbe grede nakon čega se isti povezuju s temeljnim jednadžbama piezoelektričnosti kako bi pomak električnog polja, odnosno gustoća naboja, bili u skladu s elastičnim deformacijama konzole. [Ajitsaria et al., 2007; Erturk i Inman, 2011.]

Osnovni nedostaci navedenih modela ogledaju se u nerazmatranju fenomena rezonancije, neuključivanju viših vibracijskih oblika u model, krivoj interpretaciji prisile koja nastaje zbog međudjelovanja seizmičke uzbude i inercije konzole, pojednostavljenom predstavljanju elektromehaničke sprege kao viskoznog prigušivača te korištenju statičkih izraza za predstavljanje dinamičkog problema. [Erturk i Inman, 2011.]

²³ Za razliku od fizike elektromagnetske pretvorbe, nastajanje naboja zbog piezoelektričnog efekta nije nužno ovisno samo o brzini gibanja i ne može se prikazati samo jednostavnim viskoznom prigušivačem.

²⁴ Hamiltonov energetska pristup opisivanja sustava za razliku od Newtonovog pristupa.

Četvrta od nabrojanih metoda ističe se najboljim rezultatima predviđanja elektromehaničkog odziva piezoelektričnih pretvarača konzolne izvedbe, a temelji se na principu potpuno distribuiranih parametara i rješavanju proširene Euler-Bernoullijeve jednadžbe savijanja konzole s utegom na slobodnom kraju. Ona, za razliku od klasične Euler-Bernoullijeve jednadžbe, uključuje i izraze za viskozno trenje materijala i fluida unutar kojeg se sustav nalazi, utjecaj utega na slobodnom kraju konzole te povratnu spregu između mehaničke i električne domene sustava. Ovom metodom je riješena većina nedostataka prethodnih modela dok je u literaturi model eksperimentalno potvrđen više puta. Osnovni nedostatak ove metode je što su funkcije modalnih oblika elektromehaničkog sustava aproksimirane s funkcijama modalnih oblika pri isključivo mehaničkoj uzbuđi uz zanemarivanje električnih efekata [Erturk i Inman, 2008., 2009., 2011.].

Prije potpune razrade četvrte metode, potrebno je predstaviti temeljne Euler-Bernoullijeve jednadžbe savijanja konzole s masom na slobodnom kraju i razraditi problem analize vlastitih vrijednosti konzolnog sustava za piezoelektričnu pretvorbu kinetičke energije vibracija. Nakon razrade problema vlastitih vrijednosti, objasniti će se Erturkov analitički model piezoelektričnog pretvarača s distribuiranim parametrima. Ovaj model će se implementirati i analizirati u MATLAB programskom paketu.

3.1 Savojne vibracije konzole

Bitna činjenica pri projektiranju konzolnih uređaja za prikupljanje vibracijske energije spomenuta je u točki 2.6.3.3, a odnosi se na vlastite frekvencije sustava. Konzolni uređaj, s masom na slobodnom kraju, unutar prethodno zadanih dimenzija sustava (npr. maksimalna dimenzija čvora bežične mreže) rezultira najnižim iznosom prve vlastite savojne frekvencije sustava. Ovo svojstvo je izrazito bitno kada se uzimaju u obzir inercijalni generatori jer se najveća pretvorba energije odvija upravo u uskom rasponu rezonantnog područja pri kojem se prva²⁵ vlastita savojna frekvencija sustava izjednačava s uzbudnom frekvencijom okoline. Time se omogućuje da piezoelektrični pretvarač dođe u rezonanciju i da pri tome konzola postigne najveću savojnu amplitudu. Temeljem linearne elektromehaničke veze tada se ostvaruje i najveći električni napone. Primjerice, ako se želi postići maksimalna pretvorba kinetičke

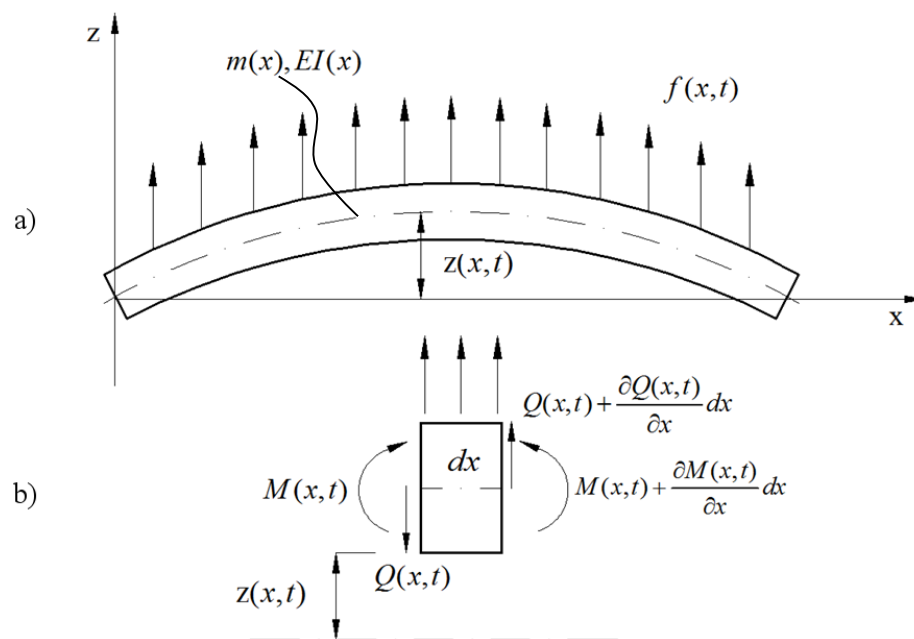
²⁵ Svaki sustav ima više vlastitih frekvencija, a najniži iznos je ujedno i prvi za zadani raspon frekvencija. Ovu frekvenciju je najlakše iskoristiti jer većina mehaničkih vibracija u ljudskom okruženju ne prelazi 200 Hz (Tablica 3).

energije vibracija za kontinuirano motrenje rada troosnog CNC obradnog centra pomoću koncepta piezoelektrične pretvorbe, potrebno je ugoditi konzolni sustav u pretvaraču na točno određenu frekvenciju koja se iznosom poklapa s uzbudnom frekvencijom vibracija koje proizvodi CNC obradni centar (Tablica 3). Da bi se to postiglo, potrebno je točno izmjeriti frekvencijski raspon okolišnih vibracija i nakon toga izvršiti analizu vlastitih frekvencija sustava za prikupljanje energije. Pri projektiranju uređaja naglasak je stavljen na prvi i po iznosu vlastitih frekvencija najniži oblik vibriranja.

U ovom potpoglavlju je objašnjen i izveden postupak analize vlastitih vrijednosti Euler-Bernoullijeve grede prema Genti [Genta, 1998.] i razvijanje modalnog modela s uključenim граниčnim uvjetima uklještenog kraja i mase na slobodnom kraju konzole prema Meirovitchu [Meirovitch, 2001.]. U literaturi se često zanemaruje ovaj dio izvoda, iako je ključan za razumijevanje Erturkovog analitičkog modela. Isto tako poslužit će kao prikladan alat za procjenu mehaničkog odziva konzole u uvjetima dinamičke uzbude.

3.1.1 Euler-Bernoullijeva jednadžba savijanja konzole

Prvi korak ka rješavanju problema određivanja vlastitih vrijednosti sustava konzole i mase je definiranje slobodne vibrirajuće grede u koordinatnom sustavu te postavljanje odgovarajuće ravnoteže momenata i sila [Meirovitch, 2001.].



Slika 26. a) Greda pri vibracijskom savijanju i b) izdvojeni infinetesimalni segment grede diskretne širine dx s momentima i poprečnim silama [Meirovitch, 2001.]

Slika 26 a) prikazuje vibracijski pobuđenu slobodnu gredu u koordinatnom sustavu s izdvojenim segmentom napregnute grede diskretne širine dx pri čemu je $z(x, t)$ poprečni pomak, $f(x, t)$ poprečna sila, $m(x)$ duljinska masa, a $EI(x)$ savojna krutost. Pritom je E Youngov modul elastičnosti dok je $I(x)$ moment tromosti poprečnog presjeka za os z . Na izdvojenom segmentu savijene grede (Slika 26. b), $M(x, t)$ predstavlja moment savijanja, a $Q(x, t)$ smičnu silu. U osnovnoj Euler-Bernoulli teoriji zanemaruje se rotacija promatranog diskretnog elementa (koja je vrlo mala u odnosu na translacijski pomak), te se isto tako zanemaruju i učinci smicanja odnosno kutne deformacije izazvane smikom (pokazalo se da je taj učinak vrlo malen u odnosu na deformaciju elementa) [Meirovitch, 2001.].

Ravnoteža sila na rasponu $0 < x < L$ (gdje je L ukupna duljina konzole) uz zanemarenu rotaciju i smicanje (ova teorija vrijedi za uske grede s omjerom dužina/širina > 10) može se prikazati kao [Meirovitch, 2001.]:

$$\left[Q(x, t) + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} dx \right] - Q(x, t) + f(x, t) dx = m(x) dx \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} dx + f(x, t) dx = m(x) dx \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2}$$

Dijeljenjem s dx dobiva se sljedeći oblik jednadžbe ravnoteže sila:

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + f(x, t) = m(x) \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

Pod pretpostavkom da je umnožak momenta tromosti i kutnog ubrzanja zanemarivo malen, jednadžba ravnoteže momenata oko osi z glasi [Meirovitch, 2001.]:

$$\left[M(x, t) + \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} dx \right] - M(x, t) + \left[Q(x, t) + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} dx \right] \frac{dx}{2} + Q(x, t) \frac{dx}{2} + \int_{x+\frac{dx}{2}}^{x+dx} xf(x, t) dx - \int_x^{x+\frac{dx}{2}} xf(x, t) dx = 0 \quad (3.3)$$

Nakon poništavanja istovjetnih dijelova iz izraza (3.3) i zanemarivanja dx izraza drugog reda,²⁶ dobiva se reducirana jednadžba ravnoteže momenata [Meirovitch, 2001.]:

²⁶ Iznos $(dx/2)^2$ je diskretni kvadrirani krak momenta poprečne sile i kao takav malo utječe na dinamiku sustava (npr. $(dx/2)^2 = (0.000001)^2 = 0.000000000001$)

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial x} + Q(x, t) = 0 \quad (3.4)$$

Uvrštavanjem (3.4) u (3.2) dobiva se jednačba koja povezuje moment savijanja $M(x, t)$ sa silom $f(x, t)$ i deformacijom $z(x, t)$:

$$-\frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + f(x, t) = m(x) \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.5)$$

Kako bi se izraz (3.5) prikazao u ovisnosti o pomaku $z(x, t)$ i uzbudnoj sili $f(x, t)$, upotrijebit će se izraz iz klasične teorije čvrstoće materijala koji povezuje moment i pomak:

$$M(x, t) = EI(x) \frac{d^2 z(x, t)}{dx^2} \quad (3.6)$$

Ovisnost posmične sile o deformaciji može se dobiti uvrštavanjem jednačbe (3.6) u (3.4) na temelju čega se dobiva sljedeći izraz:

$$Q(x, t) = -\frac{\partial}{\partial x} \left[EI(x) \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} \right] \quad (3.7)$$

Euler-Bernoullijeva jednačba savijanja četvrtog reda konačno se dobiva uvrštavanjem izraza (3.6) u (3.5) [Meirovitch, 2001]:

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} \right] + f(x, t) = m(x) \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

3.1.2 Problem vlastitih vrijednosti sustava pri slobodnim vibracijama: separacija domene vremena i domene prostora

Kako bi se riješio diferencijalni problem vlastitih vrijednosti slobodne grede pod uzbuđom, potrebno je pretpostaviti da se greda giba sinkrono. To znači da svaka točka slobodne grede izvodi točno jednako gibanje u vremenu prolazeći kroz vlastiti maksimum ili minimum istovremeno s drugim točkama sustava i ulazeći u ravnotežu u istom trenutku. Na temelju te pretpostavke svakom sustavu u sinkronom gibanju je predodređen jedinstveni vlastiti oblik odnosno nekakav opći profil koji se ne mijenja s vremenom. Suprotno tome amplitude tog vlastitog oblika mijenjaju se u vremenu. Tada se, ovisno o pretpostavljenim graničnim

uvjetima²⁷, te uz primjenu metode separacije varijabli, rješenje $z(x,t)$ može rastaviti na prostornu varijablu x i vremensku varijablu t . Vlastita funkcija sustava (engl. *eigenfunction*) tada glasi [Meirovitch, 2001.]:

$$z(x,t) = Z(x) \cdot F(t) \quad , \quad (3.9)$$

gdje je $Z(x)$ vlastiti profil, oblik ili konfiguracija u ovisnosti o prostornoj varijabli x , dok $F(t)$ pokazuje kako se amplituda profila mijenja ovisno o vremenu t . Pri slobodnim vibracijama pretpostavlja se da je $f(x, t) = 0$, a funkcija ovisnosti amplitude o vremenu $F(t)$ za slučaj harmonijskog gibanja pretpostavlja se u sljedećem obliku [Meirovitch, 2001.]:

$$F(t) = C \cos(\omega t - \phi) \quad (3.10)$$

gdje je C amplituda, ϕ fazni kut, a ω frekvencija osciliranja. Prva i druga derivacija jednadžbe (3.10) glase:

$$F'(t) = -C\omega \sin(\omega t - \phi) \quad (3.11)$$

$$F''(t) = -C\omega^2 \cos(\omega t - \phi) = -\omega^2 F(t)$$

Amplituda vlastitog oblika određuje se pomoću funkcije profila $Z(x)$, te se samim time izraz $F(t)$ koji se pojavljuje u drugoj derivaciji jednadžbe (3.11) može zanemariti tj. normalizirati izjednačavanjem s 1. Deriviranjem jednadžbe (3.9) te uvrštavanjem jednadžbe (3.10) i pripadajućih joj derivacija u (3.8) dobiva se sljedeći oblik diferencijalne jednadžbe vlastitih vrijednosti:

$$\frac{d}{dx^2} \left[EI(x) \frac{d^2 Z(x)}{dx^2} \right] = \omega^2 m(x) Z(x) \quad (3.12)$$

²⁷ Granični uvjeti za ukliješteni kraj su npr. pomak i nagib jednaki 0: pomak ukliještenog kraja jednak $z(0,t) = 0$, nagib grede u ukliještenju također $\frac{dz(0,t)}{dx} = 0$.

3.1.3 Rješenje problema vlastitih vrijednosti konzole s graničnim uvjetima koji uključuju koncentriranu masu

Određivanje konstante ω^2 , tj. vlastite vrijednosti sustava iz izraza (3.12) naziva se diferencijalnim problemom vlastitih vrijednosti (engl. *differential eigenvalue problem*), a u ovom potpoglavlju biti će izvedeno rješenje tog problema. Pretpostavljajući da su krutost $EI(x) = \text{konst.}$ i distribuirana masa grede $m(x) = \text{konst.}$, diferencijalna jednadžba savojnih vibracija slobodne grede (3.12) može se napisati kao [Meirovitch, 2001.]:

$$EI \frac{d^4 Z(x)}{dx^4} = \omega^2 m Z(x) \quad (3.13)$$

odnosno,

$$\frac{d^4 Z(x)}{dx^4} - \beta^4 Z(x) = 0 \quad (3.14)$$

gdje je pomoćna veličina $\beta^4 = \omega^2 m / EI$.

Potrebno je definirati i granične uvjete na rubovima konzole: u uklještenju i na slobodnom kraju opterećenom utegom mase M_t . Pri $x = 0$, odnosno u samom uklještenju pomak i nagib konzole jednaki su:

$$Z(0) = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{dZ(0)}{dx} = 0$$

Dok je pri $x = L$, odnosno na slobodnom kraju konzole moment jednak nuli (prema (3.6)), a sila, tj. derivacija momenta po x -u jednaka umnošku mase M_t i ubrzanja $z''(x, t) = -\omega^2 m Z(x)$ (prema (3.12)). Slijedi tako da je [Meirovitch, 2001.]

$$EI \frac{d^2 Z(L)}{dx^2} = 0 \quad (3.16)$$

$$EI \frac{d^3 Z(L)}{dx^3} + \omega^2 M_t Z(L) = 0 \Rightarrow \frac{d^3 Z(L)}{dx^3} + \frac{M_t}{m} \beta^4 Z(L) = 0 \quad (3.17)$$

Prema literaturi pretpostavljeno standardno rješenje jednačbe (3.13) odnosno (3.14) glasi [Meirovitch, 2001.]:

$$Z(x) = A \sin \beta x + B \cos \beta x + C \sinh \beta x + D \cosh \beta x \quad (3.18)$$

Derivacije pretpostavljenog rješenja iznose:

$$Z'(x) = \beta(A \cos \beta x + B \sin \beta x + C \cosh \beta x + D \sinh \beta x), \quad (3.19)$$

$$Z''(x) = \beta^2(-A \sin \beta x - B \cos \beta x + C \sinh \beta x + D \cosh \beta x), \quad (3.20)$$

$$Z'''(x) = \beta^3(-A \cos \beta x + B \sin \beta x + C \cosh \beta x + D \sinh \beta x), \quad (3.21)$$

$$Z^{IV}(x) = \beta^4(A \sin \beta x + B \cos \beta x + C \sinh \beta x + D \cosh \beta x). \quad (3.22)$$

Iz prvog graničnog uvjeta (3.15) proizlazi:

$$Z(0) = \beta(B + D)$$

$$D = -B. \quad (3.23)$$

Iz drugog graničnog uvjeta jednačbe (3.15) proizlazi:

$$\frac{dZ(x)}{dx} = \beta(A \cos \beta x - B \sin \beta x + D \sinh \beta x)$$

$$\left. \frac{dZ(x)}{dx} \right|_{x=0} = \beta(A + C) = 0$$

$$C = -A. \quad (3.24)$$

Uvrsti li se (3.23) i (3.24) u (3.18), dobije se sljedeći izraz:

$$Z(x) = A(\sin \beta x - \sinh \beta x) + B(\cos \beta x - \cosh \beta x) \quad (3.25)$$

Učini li se to isto s jednačbama (3.20) i (3.21) u odnosu na rubne uvjete (3.16) i (3.17), dobije se:

$$\frac{d^2Z(x)}{dx^2} = -\beta^2 [A(\sin \beta x + \sinh \beta x) + B(\cos \beta x + \cosh \beta x)] \quad (3.26)$$

$$\frac{d^3 Z(x)}{dx^3} = -\beta^3 [A(\cos \beta x + \cosh \beta x) - B(\sin \beta x - \sinh \beta x)] \quad (3.27)$$

Pri izjednačavanju jednadžbe (3.26) i (3.16) za $x=L$ i eliminacijom izraza $EI\beta^2$ koji se izjednačava s nulom, dolazi se do sljedećeg izraza:

$$EI \frac{d^2 Z(L)}{dx^2} = 0$$

$$-EI \cdot \beta^2 [A(\sin \beta x + \sinh \beta x) + B(\cos \beta x + \cosh \beta x)] = 0$$

$$B = -A \frac{\sin \beta L + \sinh \beta L}{\cos \beta L + \cosh \beta L} \quad (3.28)$$

Uvrsti li se jednadžba (3.28) u jednadžbu (3.25), dobiva se sljedeći izraz:

$$Z(x) = A \left[\sin \beta x - \sinh \beta x - \frac{\sin \beta L + \sinh \beta L}{\cos \beta L + \cosh \beta L} (\cos \beta x - \cosh \beta x) \right] \quad (3.29)$$

Na isti način uvrštavanjem (3.28) u (3.27) dobiva se:

$$Z'''(x) = -\beta^3 A \left[\cos \beta x + \cosh \beta x + \frac{\sin \beta L + \sinh \beta L}{\cos \beta L + \cosh \beta L} (\sin \beta x - \sinh \beta x) \right] \quad (3.30)$$

Sljedeći korak je uvrštavanje (3.29) i (3.30) u (3.17) za $x=L$, pa tako slijedi:

$$\beta^3 A \left[\cos \beta L + \cosh \beta L + \frac{\sin \beta L + \sinh \beta L}{\cos \beta L + \cosh \beta L} (\sin \beta L - \sinh \beta L) \right] =$$

$$= \frac{M}{m} \beta^4 \frac{L}{L} A \left[\sin \beta L - \sinh \beta L - \frac{\sin \beta L + \sinh \beta L}{\cos \beta L + \cosh \beta L} (\cos \beta L - \cosh \beta L) \right] = 0 \quad (3.31)$$

Sređivanjem izraza (3.31) dobiva se konačna transcendentna jednadžba koju je potrebno numerički riješiti²⁸ za izraz βL , koji predstavlja upravo vlastite vrijednosti opisanog sustava:

$$1 = -\cos \beta L \cosh \beta L + \frac{M}{mL} \beta L [\sin \beta L \cosh \beta L - \cos \beta L \sinh \beta L] \quad (3.32)$$

²⁸ Točnije, za ovdje dani izvod, a kako će biti pokazano u poglavlju 3.3, izrađen je algoritam u programskom paketu MATLAB te potvrđen preliminarno 2D MKE modelom (kasnije i 3D) isprogramiranim u softwareu ANSYS, te naknadno potvrđen i eksperimentalno (vidjeti potpoglavlje 5.3.3).

3.2 Spregnuti modalni model s distribuiranim parametrima

Kao osnova za predviđanje ponašanja bimorfnih²⁹ piezoelektričnih konzola (Slika 27) koriste se različiti matematički modeli koje su znanstvenici razvili tijekom proteklih godina. U literaturi je do sada predloženo više modela piezoelektričnih bimorfni pretvarača od kojih se ističu Roundijev [Roundy, 2003.], [duToit et al., 2005.] i posljednji Erturk-Inmanov [Erturk i Inman, 2009.]. Posljednje navedeni je i eksperimentalno potvrđen u velikom broju slučajeva [Erturk & Inman 2009.; Benasciutti et al. 2010.; Yang & Tang 2009.] i najbolje objašnjava kompleksan mehanizam povratne sprege piezoelektrika s mehaničkom domenom, te će upravo taj model biti i osnova za uspoređivanje s rezultatima dobivenim metodom konačnih elemenata (MKE) u ovome radu. U narednim cjelinama ovog rada sve teorijske pretpostavke i razvoj modela preuzeti su i naknadno prilagođeni prema modelu iz doktorske disertacije prof. dr. sc. Alpera Erturka naslovljene *Electromechanical modeling of piezoelectric energy harvesters* iz 2009. [Erturk, 2009.].

3.2.1 Pretpostavke modela i konfiguracija bimorfa

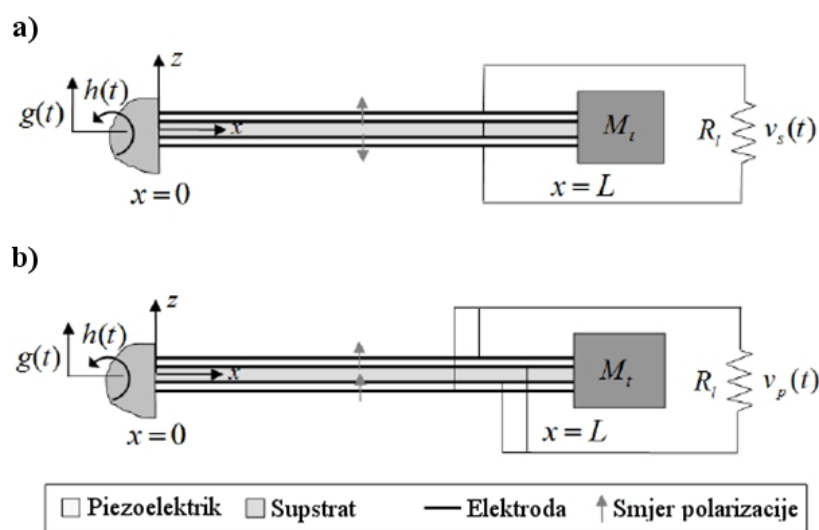
U svojoj doktorskoj disertaciji [Erturk, 2009] prof. dr. sc. Erturk pretpostavlja (vođen dotadašnjim istraživanjima drugih istraživača, ali i razvojem komercijalnih uređaja navedenih u 2.6.3.3) da su piezoelektrični bimorfi vrlo tanke uniformne kompozitne grede prema klasičnoj Euler-Bernoullijevoj teoriji (zanemaruje se smicanje i moguća neparalelnost poprečnih presjeka) objašnjenoj u poglavlju 3.1. Osnovna pretpostavka pri izradi modela je linearno-elastično ponašanje materijala, kako supstrata, tako i slojeva piezoelektrične keramike. U tom slučaju opravdano je pretpostaviti da će deformacije biti male (čak i u području rezonancije). Erturk također pretpostavlja i mehaničke gubitke (što nije uvršteno u druge modele) u obliku unutarnjeg Kelvin-Voigt³⁰ prigušenja ovisnog o iznosu naprezanja (engl. *strain rate damping*) te vanjskog prigušenja zrakom, odnosno medijem unutar kojeg se piezoelektrični konzolni pretvarač nalazi. Kelvin-Voigt prigušenje koristi se za opisivanje disipacije energije gibanja unutar materijala, odnosno unutarnjeg trenja materijala i to za tzv. Voigtove viskoelastične materijale kojima je svojstvena ograničena viskoznost i elastičnost. Kelvin-Voigtov model unutarnjeg trenja može se jednostavno prikazati kao paralelni spoj viskoznog prigušivača i

²⁹ Piezoelektrični bimorf je višeslojna konstrukcija sastavljena od dva aktivna sloja piezoelektričnog materijala i središnjeg (najčešće metalnog) sloja supstrata.

³⁰ Nazvano prema britanskom fizičaru i inženjeru Williamu Thomsonu (barunu Kelvinu) i prema njemačkom fizičaru Woldemaru Voigtu

elastične opruge, pri čemu je iznos trenja ovisan izravno o brzini deformacije. Utjecaj vrlo tankih elektroda koje prekrivaju nasuprotne stranice piezoelektričnog sloja zanemaruje se, te se pretpostavlja da su u bimorfu prisutni samo slojevi supstrata i piezoelektrika koji međusobno savršeno prijanjaju (zanemareni su i mogući slojevi epoksidnog ljepila između supstrata i piezoelektrika ili u elektronici i komercijalnim proizvodima često korišteni zaštitni Kapton slojevi na vanjskim stranicama).

Za elektrode se pretpostavlja da su savršeni vodiči (bez gubitaka otpora), te se i električno polje, inducirano u piezoelektričnom sloju, zbog te pretpostavke smatra uniformno raspoređenim po duljini konzole.



Slika 27. Piezoelektrična bimorfna konzola: a) serijski spoj, b) paralelni spoj [Erturk, 2009.]

Također je bitno naglasiti da, ovisno o konkretnoj primjeni, tj. prema zahtjevima za određenom razinom napona ili jačinom struje, piezoelektrični slojevi mogu biti spojeni paralelno ili serijski. Naprezanje izazvano savijanjem konzole obrnutih je predznaka u gornjem odnosno donjem sloju piezoelektrika (vlak/tlak), a serijski odnosno paralelni spoj ostvaruje se spajanjem elektroda u smjeru z , odnosno u smjeru debljine konzole (Slika 27). Serijski spoj se ostvaruje spajanjem na dvije vanjske elektrode bez spoja s unutarnjim elektrodama (smještenim uz supstrat), dok se paralelni ostvaruje spojem vanjskih elektroda piezoelektričnih slojeva s unutarnjim elektrodama nasuprotnog piezoelektričnog sloja, zbog čega je kompliciraniji za izvedbu. Prema tehničkoj dokumentaciji proizvođača piezoelektričnih bimorfa MIDE [Midé Technology Corporation², 2009.] serijska je konfiguracija općenito pogodnija za niske i srednje razine amplituda vibracija (< 3 G), dok se paralelna preporučuje za više razine amplituda. Serijskim spojem će se udvostručiti napon otvorenog kruga (bez spoja otpora) u usporedbi sa

samo jednim slojem piezoelektrika, a kapacitet kruga će opasti na $\frac{1}{2}$ vrijednosti kapaciteta jednog piezoelektričnog sloja. Paralelnim spojem se udvostručuje iznos jakosti struje u krugu u usporedbi sa strujom jednog piezoelektričnog sloja, a kapacitet će se udvostručiti u odnosu na kapacitet jednog piezoelektričnog sloja. Bez obzira na odabir tipa spoja piezoelektričnih slojeva, ostvarena snaga bit će jednaka zbog linearnih veza komponenata električnoga kruga. Općenito se paralelni spoj preporučuje u većini slučajeva zbog većeg kapaciteta, što rezultira manjom izlaznom impedancijom električnog signala. U ovoj disertaciji pretpostavljene su niže razine amplituda vibracija (Tablica 3) te će se koristiti i preporučena izvedba sa serijskim spojem.³¹

3.2.2 Spregnuti elektromehanički model i analiza vlastitih vrijednosti bimorfni konzola

Pri razmatranju dviju konfiguracija bimorfni konzola, serijske i paralelne, moguće je zaključiti da su one identične isključivo u mehaničkoj domeni. Međutim, kada se razmatra učinak povratnog sprežanja kojeg je Erturk uključio u svoj model, dolazi do razlika u temeljnim jednadžbama piezoelektričnosti te se stoga moraju razviti dva modela, jedan za paralelni električni spoj, a drugi za serijski spoj piezoelektričnih slojeva. Učinak povratnog sprežanja (engl. *backward coupling effect*) elektromehanička je pojava koja se u strukturi konzole javlja zbog indirektnog piezoelektričnog efekta (utjecaja električne domene na mehaničku zbog stvaranja električnog potencijala na elektrodama). Učinak direktnog sprežanja pojava je koja nastaje pod utjecajem direktnog piezoelektričnog efekta (odnosno utjecaja mehaničke domene na električnu). Oba efekta opisuju se temeljnim elektromehaničkim jednadžbama piezoelektričnosti u poglavlju 2.6.3.2.

Pomaci baze odnosno uklještenja definirani su translacijom $g(t)$ (istovjetno oznaci z u predstavljenoj analizi vlastitih vrijednosti sustava) u smjeru poprečnom na presjek konzole, te dodatnom malom rotacijom oko baze $h(t)$. Stoga se iznos ukupnog pomaka baze u poprečnom smjeru može zapisati kao [Erturk, 2009.]:

$$w_b(x, t) = g(t) + xh(t) \quad (3.33)$$

³¹Jedan od razloga odabira serijskog spoja je što su izmjereni podaci za kapacitet piezoelektričnih slojeva konzola korišteni u eksperimentima mjereni pri serijskom spoju elektroda [Mide Technology Corporation, 2013.].

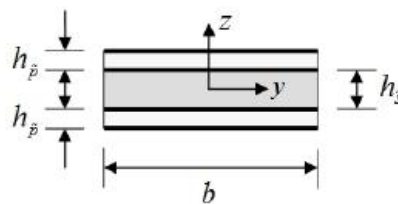
Parcijalna diferencijalna jednačba koja opisuje prisilne vibracije uniformne³² bimorfne konzole, s masom na slobodnom kraju, pod utjecajem seizmičke uzbuđe glasi:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + c_s I_z \frac{\partial^5 w_{rel}(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial t^2} = \\ = -[m + M_t \delta(x-L)] \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Ova jednačba može se povezati s jednačbom (3.5) odnosno vezom momenta, uzbuđe i pomaka u koju je Erturk uključio dodatne izraze za prigušenje i vršnu masu (uteg na slobodnom kraju konzole), pri čemu je $w_{rel}(x,t)$ relativni pomak konzole u odnosu na uklješćenje, c_a koeficijent viskoznog prigušenja zrakom, c_s je unutarnje prigušenje strukture ovisno o naprežanju, m je duljinska masa konzole, M_t je masa na slobodnom kraju, $\delta(x)$ je Diracova delta funkcija³³ dok je $M(x,t)$ moment savijanja, tj. moment koji proizlazi iz aksijalne deformacije poprečnog presjeka:

$$M(x,t) = b \left(\int_{-h_p-h_s/2}^{-h_s/2} T_1^{\tilde{p}} z dz + \int_{-h_s/2}^{h_s/2} T_1^{\tilde{s}} z dz + \int_{h_s/2}^{h_p+h_s/2} T_1^{\tilde{p}} z dz \right) \quad (3.35)$$

U jednačbi (3.35), b je širina konzole, h_p debljina piezoelektričnog sloja, h_s debljina supstrata (oznake \tilde{p} i \tilde{s} odnose se na piezoelektrik, odnosno supstrat (Slika 28)), dok su $T_1^{\tilde{p}}$ i $T_1^{\tilde{s}}$ aksijalne komponente naprežanja u piezokeramici odnosno supstratu ('1' je oznaka smjera naprežanja, u ovom slučaju smjer po duljini konzole, odnosno osi x , kao što je prethodno objašnjeno u poglavlju 2.6.3.2, Slika 21).



Slika 28. Poprečni presjek uniformnog bimorfa [Erturk, 2009]

³² Pod uniformnim bimorfom pretpostavljaju se slojevi piezoelektrika napravljeni od istog materijala jednakih dimenzija

³³ U matematici pod Diracovom delta funkcijom ili δ funkcijom podrazumijeva se distribucija čiji je iznos 0 svuda osim u ishodištu, dok integral iznosi 1 za cijeli raspon funkcije.

Komponente naprezanja mogu se prikazati sljedećim jednadžbama:

$$T_1^{\bar{s}} = E_{\bar{s}} S_1^{\bar{s}}, \quad (3.36)$$

$$T_1^{\bar{p}} = \bar{c}_{11}^E S_1^{\bar{p}} - \bar{e}_{31} \mathcal{E}_3.$$

U navedenim jednadžbama $E_{\bar{s}}$ predstavlja modul elastičnosti supstrata, \bar{c}_{11}^E modul elastičnosti piezokeramičkog sloja napregnutog i polariziranog u smjeru '1' pri konstantnom električnom polju što je označeno s E , zatim \bar{e}_{31} konstantu piezoelektričnog naprezanja dok je \mathcal{E}_3 komponenta električnog polja u smjeru '3' (z smjer ili smjer polarizacije). Pretpostavi li se poprečna izotropnost piezoelektričnog materijala (po z smjeru), modul elastičnosti piezokeramike može se izraziti i kao $\bar{c}_{11}^E = 1 / s_{11}^E$, gdje je s_{11}^E podatljivost piezoelektričnog sloja napregnutog i polariziranog u smjeru '1' pri konstantnom električnom polju, dok se \bar{e}_{31} može izraziti pomoću češće korištene konstante piezoelektričnog naboja d_{31} , i to kao $\bar{e}_{31} = d_{31} / s_{11}^E$. Aksijalno naprezanje na z osi proporcionalno je zakrivljenosti konzole u koordinati x:

$$S_1(x, z, t) = -z \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2}. \quad (3.37)$$

Komponentu električnog polja \mathcal{E}_3 potrebno je izraziti pomoću napona i to za svaku pojedinu konfiguraciju bimorfa (Slika 27, a i b, serijski i paralelni spoj). Prema pretpostavci da su piezoelektrični slojevi identični, napon na elektrodama svakog pojedinog sloja u serijskom spoju jednak je $v_s(t) / 2$, dok je u paralelnom spoju jednak $v_p(t)$. Pri serijskom spoju koeficijent piezoelektričnog naprezanja \bar{e}_{31} , na gornjem i donjem piezoelektričnom sloju, suprotnih je predznaka (i to zbog suprotne polarizacije piezoelektrika). Pri tome je jedan sloj napregnut na vlak, a drugi na tlak tako da je električno polje jednako usmjereno u oba sloja. To znači da je gornji sloj piezoelektrika polariziran u pozitivnom smjeru osi z, dok je donji sloj polariziran u negativnom smjeru osi z. Savijanjem dolazi do jednake usmjerenosti električnog polja jer je jedan sloj opterećen na vlak, a drugi na tlak pa je orijentacija smjera polja jednaka (npr. $\mathcal{E}_3(t) = -v_s(t) / 2h_p$ vrijedi za oba sloja piezoelektrika, tj. ukupni napon se dijeli na oba sloja piezoelektrika). Kod paralelnog spoja \bar{e}_{31} ima jednak predznak za gornji i donji piezoelektrični sloj pa je tako i električno polje usmjereno suprotno. Erturk naglašava kako je koeficijent

piezoelektričnog sprezanja koji proizlazi iz jednadžbe (3.35) isključivo funkcija vremena te je stoga prije uvrštavanja jednadžbe (3.35) u (3.34) potrebno upotrijebiti matematički trik i električne termine pomnožiti s $[H(x) - H(x-L)]$, gdje je $H(x)$ Heavisideova koračna funkcija.³⁴ Kako su izlazni naponi različiti za serijske i paralelne spojeve, tako će i koeficijent piezoelektričnog sprezanja koji će se koristiti u jednadžbi (3.34) također biti različit za ova dva slučaja. Stoga, slijedeći Erturkovu disertaciju, u sljedećim poglavljima ovog rada izrazi za mehanički odziv kod serijskog i paralelnog spoja bit će označeni kao $w_{rel}^s(x,t)$ i $w_{rel}^p(x,t)$, pri čemu se s i p odnose na serijske i paralelne spojeve piezoelektričnih slojeva. Momenti savijanja u supstratu i piezoelektričnom sloju mogu se tada dobiti iz jednadžbe (3.35) [Erturk, 2009.]:

$$M^s(x,t) = EI_z \frac{\partial^2 w_{rel}^s(x,t)}{\partial x^2} + \mathcal{G}_s v_s(t) [H(x) - H(x-L)] \quad (3.38)$$

$$M^p(x,t) = EI_z \frac{\partial^2 w_{rel}^p(x,t)}{\partial x^2} + \mathcal{G}_p v_p(t) [H(x) - H(x-L)].$$

Koeficijenti povratne sprege \mathcal{G}_s i \mathcal{G}_p mogu se izraziti kao:

$$\mathcal{G}_s = \frac{\bar{e}_{31} b}{2h_p} \left[\frac{h_s^2}{4} - \left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

$$\mathcal{G}_p = 2\mathcal{G}_s = \frac{\bar{e}_{31} b}{h_p} \left[\frac{h_s^2}{4} - \left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^2 \right].$$

Izraz EI , odnosno savojna krutost kompozitne konzole pri uvjetima konstantnog električnog polja izražena je kao [Erturk, 2009.]:

$$EI_z = \frac{2b}{3} \left[E_s \frac{h_s^3}{8} + \bar{c}_{11}^E \left(\left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^3 - \frac{h_s^3}{8} \right) \right] \quad (3.40)$$

³⁴ Heavisideova koračna funkcija (eng. *Heaviside step function*) je nekontinuirana funkcija čiji je iznos 0 za negativne argumente funkcije i 1 za pozitivne argumente funkcije. Vrijednosti ulaznih podataka često su nebitne jer se ova funkcija najčešće koristi kao tip distribucije u mehaničkim problemima za definiranje određenih strukturnih opterećenja (slično i kao prije navedena Diracova delta funkcija koja je u biti prva derivacija Heavisideove funkcije). Ovdje se funkcija koristi za dodavanje prostorne domene izrazu za napon $v_s(t)$ kako bi isti mogao biti korišten u jednadžbama (3.38).

Iz jednadžbe (3.34) dobije se spregnuta jednadžba konzole za serijski spoj piezoelektričnih slojeva:

$$EI_z \frac{\partial^4 w_{rel}^s(x,t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}^s(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}^s(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}^s(x,t)}{\partial t^2} + \mathcal{G}_s v_s(t) \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx} \right] = - \left[m + M_t \delta(x-L) \right] \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} \quad (3.41)$$

Na istovjetan način dolazi se i do jednadžbe konzole za paralelni spoj piezokeramičkih slojeva:

$$EI_z \frac{\partial^4 w_{rel}^p(x,t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}^p(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}^p(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}^p(x,t)}{\partial t^2} + \mathcal{G}_p v_p(t) \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx} \right] = - \left[m + M_t \delta(x-L) \right] \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} \quad (3.42)$$

Ako se s ρ_s i ρ_p označe gustoće supstrata i piezokeramike, tada se duljinska masa konzole može jednostavno izraziti kao:

$$m = b(\rho_s h_s + 2\rho_p h_p) \quad (3.43)$$

Vibracijski odziv konzole u odnosu na uklještenje konzole može se, tehnikom separacije domena vremena i prostora, izraziti kao uniformna i konvergentna serija vlastitih funkcija (engl. *eigenfunctions*) kao što je to opisano izrazom (3.9) i izvedeno u poglavlju 3.1.2:

$$w_{rel}^s(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r^s(t), \quad w_{rel}^p(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r^p(t) \quad (3.44)$$

gdje je $\phi_r(x)$ vlastita funkcija r -tog oblika svojnih vibracija normalizirana po masi, dok su $\eta_r^s(t)$ i $\eta_r^p(t)$ izrazi dinamičkog mehaničkog odziva za serijski i paralelni spoj. Vlastite funkcije $\phi_r(x)$ masom su normalizirane vlastite funkcije neprigušenih slobodnih vibracija (ekvivalentno izrazu $Z(x)$ u poglavlju 3.1.2):

$$\phi_r(x) = C_r \left[\cos \frac{\lambda_r}{L} x - \cosh \frac{\lambda_r}{L} x + \zeta_r \left(\sin \frac{\lambda_r}{L} x - \sinh \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] \quad (3.45)$$

Faktor λ_r predstavlja vlastite vrijednosti sustava dok se faktor ζ_r dobiva pomoću izraza:

$$\zeta_r = \frac{\sin \lambda_r - \sinh \lambda_r + \lambda_r \frac{M_t}{mL} (\cos \lambda_r - \cosh \lambda_r)}{\cos \lambda_r - \cosh \lambda_r - \lambda_r \frac{M_t}{mL} (\sin \lambda_r - \sinh \lambda_r)}, \quad (3.46)$$

dok je C_r konstanta modalne amplitude koja se dobiva normalizacijom vlastitih funkcija prema sljedećim uvjetima ortogonalnosti vlastitih funkcija:

$$\int_0^L \phi_s(x) m \phi_r(x) dx + \phi_s(L) M_t \phi_r(L) + \left[\frac{d\phi_s(x)}{dx} I_t \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right]_{x=L} = \delta_{rs} \quad (3.47)$$

$$\int_0^L \phi_s(x) EI_z \frac{d^4 \phi_r(x)}{dx^4} dx - \left[\phi_s(x) EI_z \frac{d^3 \phi_r(x)}{dx^3} \right]_{x=L} + \left[\frac{d\phi_s(x)}{dx} EI_z \frac{d^2 \phi_r(x)}{dx^2} \right]_{x=L} = \omega_r^2 \delta_{rs},$$

gdje je I_t moment tromosti mase M_t na slobodnom kraju konzole, dok je δ_{rs} Kronecker delta funkcija³⁵, a ω_r neprigušena vlastita frekvencija r-tog oblika vibriranja u uvjetima kratkog spoja, dana sljedećim izrazom:

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}. \quad (3.48)$$

Vlastite vrijednosti (engl. *eigenvalues*) sustava λ_r (za mod r) dobivaju se iz:³⁶

$$1 + \cos \lambda \cosh \lambda + \lambda \frac{M_t}{mL} (\cos \lambda \sinh \lambda - \sin \lambda \cosh \lambda) - \frac{\lambda^3 I_t}{mL^3} (\cosh \lambda \sin \lambda + \sinh \lambda \cos \lambda) + \frac{\lambda^4 M_t I_t}{m^2 L^4} (1 - \cos \lambda \cosh \lambda) = 0 \quad (3.49)$$

Oblici vlastitih funkcija $\phi_r(x)$ i normalizacijski uvjeti za zadani bimorf u serijskom ili paralelnom spoju piezokeramičkih slojeva jednaki su neovisno o tome da li su piezokeramički slojevi povezani serijski ili paralelno. Kada iznos napona $v_s(t)$ poprimi vrijednosti > 0 , pojavit će se i elektromehanički moment na krajnjim granicama piezokeramičkih slojeva prema jednadžbama (3.41) i (3.42) (dijelovi pomnoženi s Diracovom delta funkcijom). To rezultira s

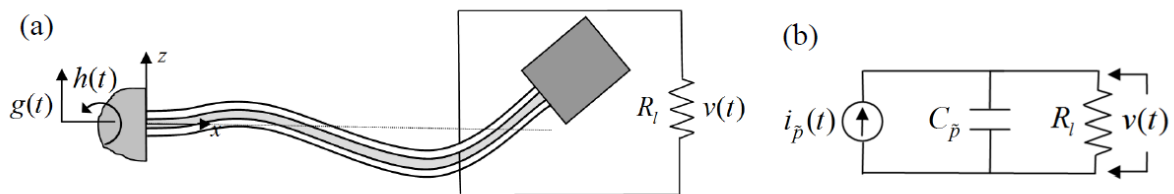
³⁵ U matematici, pod Kronecker delta funkcijom ili δ_{rs} podrazumijevamo funkciju ili točnije distribuciju čiji je iznos 1 ako je $r = s$, odnosno 0 ako $r \neq s$.

³⁶ Ekvivalentno (3.32) uz dodanu rotacijsku tromost vršne mase I_t .

dvama različitim dinamičkim modalnim mehaničkim odzivima $\eta_r^s(t)$ i $\eta_r^p(t)$. Za zadanu vrijednost otpora radnog trošila koji ovdje još nije uveden, povratna veza izazvana naponskim odzivom mijenjat će mehanički odziv kao i vlastitu frekvenciju piezoelektričnog bimorfa. Pad napona na radnom trošilu direktno će utjecati na izraze (3.41) i (3.42).

3.2.3 Spregnuta jednadžba električnog kruga za tanki piezoelektrični sloj u uvjetima dinamičkog savijanja

Kako bi izveo jednadžbe električnog kruga za bimorfnu konfiguraciju, Erturk je prvo razmotrio što se događa s električnom dinamikom jednog piezoelektričkog sloja u uvjetima dinamičkog savijanja (Slika 29). Prikazana je savijena piezoelektrična bimorfna konzola čiji je gornji sloj piezoelektrika spojen u strujni krug s otpornim elementom R_l čime se simulira jednostavno trošilo (Slika 29, a). Progibi konzole su karikirano naglašeni kako bi se dočarala vremensko-prostorna ovisnost polumjera zakrivljenosti pri proizvoljnoj koordinati x neutralne osi u trenutku t . Slika 29, b) prikazuje ekvivalentni električni krug kojim je opisan piezoelektrični sloj, sastavljen od: izvora struje $i_p(t)$ i kapaciteta piezoelektričnog sloja C_p spojenog paralelno s otpornim elementom R_l na kojem se mjeri napon $v(t)$.



□ Piezokeramika ■ Supstrat — Elektrode

Slika 29. a) Savijena bimorfna konzola i b) ekvivalentni električni krug [Erturk, 2009.]

Konstitutivna piezoelektrična jednadžba kojom se opisuje vektor električnog pomaka (gustoće naboja) D_3 može se reducirati na sljedeću jednadžbu, pod pretpostavkom da je jedini izvor mehaničke deformacije normalno naprezanje izazvano savijanjem (istovjetno izrazu (2.2)):

$$D_3 = \bar{e}_{31} S_1^p + \bar{\epsilon}_{33}^S \mathcal{E}_3 \quad (3.50)$$

Tu je D_3 komponenta električnog pomaka, a $\bar{\varepsilon}_{33}^S$ komponenta permitivnosti pri konstantnoj deformaciji s pretpostavkom ravninskog naprežanja konzole ($\bar{\varepsilon}_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - d_{31}^2 / s_{11}^E$ gdje je $\bar{\varepsilon}_{33}^T$ komponenta permitivnosti pri konstantnom naprežanju) [Erturk, 2009.].

Ako se vodljivost elektroda može predstaviti izrazom $1/R_l$, tada se i izraz za električnu struju može dobiti putem Gaussovog zakona³⁷ kao:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA \right) = \frac{v(t)}{R_l}, \quad (3.51)$$

gdje je \mathbf{D} vektor električnog pomaka (gustoće naboja), \mathbf{n} jedinična normala usmjerena prema van, a integracija se provodi po površini elektrode A . Kao što se može pretpostaviti, jedini doprinos unutarnjem produktu integranda u jednadžbi (3.51) dolazi iz D_3 , budući da su elektrode okomite na smjer '3' tj. orjentirane su u smjeru osi z . Ako se prosječna savojna deformacija u piezoelektričnom sloju izrazi pomoću zakrivljenosti konzole (3.37), a uniformno električno polje pomoću razlike električnog potencijala ($\mathcal{E}_3(t) = -v(t)/h_p$), uvrštavanjem jednadžbe (3.50) u jednadžbu (3.51) dobija se izraz

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{33}^S b L}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = -\bar{e}_{31} h_{pc} b \int_0^L \frac{\partial^3 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2 \partial t} dx, \quad (3.52)$$

gdje su b , h_p i L , širina, debljina i duljina piezoelektričnog sloja, dok je h_{pc} udaljenost između neutralne osi i središta piezoelektričnog sloja ($h_{pc} = (h_p - h_s)/2$).

Jednadžba modalne ekspanzije (3.44), za serijski spoj piezoelektrika, tj. umnožak funkcija vlastitih oblika i modalnog mehaničkog odziva poprečnih vibracija (relativnih naspram oslonca) se tada može uvrstiti u jednadžbu (3.52) [Erturk, 2009.]:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{33}^S b L}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = \sum_{r=1}^{\infty} \kappa_r \frac{d\eta_r(t)}{dt}, \quad (3.53)$$

u kojoj simbol κ_r predstavlja modalno sprežanje iz jednadžbe električnog kruga:

³⁷ Gaussovom zakonom povezan je tok električnog polja s nabojem polja.

$$\kappa_r = -\bar{e}_{31} h_{pc} b \int_0^L \frac{d^2 \phi_r(x)}{dx^2} dx = -\bar{e}_{31} h_{pc} b \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad (3.54)$$

Iz literature je otprije poznato [Roundy², 2003.] kako se piezoelektrični element može prikazati kao izvor struje paralelno spojen s vlastitim unutarnjim kapacitetom (Slika 29 b). Stoga je jednostavni električni krug (Slika 29 b) prikaz kompletnog kruga električne domene u slučaju jednog radnog otpora. Ovime je uzeta u obzir samo električna domena, dok je stvarni prikaz sustava zapravo transformator i to zbog povratne veze, tj. utjecaja napona na mehaničku domenu uzrokovanog piezoelektričnim sprežanjem (što će biti uvršteno i u matematičku formulaciju). Osnovne komponente električnog kruga su: unutarnji kapacitet piezoelektričnog sloja $C_{\bar{p}}$, radni otpor R_l i izvor struje $i_{\bar{p}}(t)$. Ako se napon na radnom trošilu (Slika 29 a), označi s $v(t)$, na opisani električni krug može se primijeniti Kirchoffov zakon:³⁸

$$C_{\bar{p}} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = i_{\bar{p}}(t) \quad (3.55)$$

pri čemu je izraze za unutarnji kapacitet i strujni izvor moguće izlučiti izjednačavanjem jednadžbi (3.53) i (3.55):

$$C_{\bar{p}} = \frac{\bar{\epsilon}_{33}^s b L}{h_{\bar{p}}} \quad (3.56)$$

$$i_{\bar{p}}(t) = \sum_{r=1}^{\infty} \kappa_r \frac{d\eta_r(t)}{dt}$$

Na prikazani način moguće je modelirati i multimorfne strukture tj. strukture s više od dva sloja piezoelektrika. Pritom svaki piezoelektrični sloj ima sličan kapacitet i izraz za izvor struje pa se slojevi mogu kombinirati s radnim otporima po želji [Erturk, 2009.].

3.2.4 Serijski spoj piezoelektričnih slojeva

Za izvođenje analitičkih izraza za odziv napona $v_s(t)$ i vibracijski odziv $w_{rel}(x,t)$ bimorfa (Slika 29, a), potrebno je najprije izvesti spregnutu jednadžbu mehanike bimorfa u modalnim

³⁸ Kirchoffov zakon glasi: u svakom električnom krugu zbroj električnih struja koje ulaze u krug jednak je zbroju struja koje izlaze iz kruga, dok je zbroj svih napona u strujnom krugu jednak nuli.

koordinatama te potom izvesti spregnutu jednadžbu električnog kruga, pri čemu se pod spregnutom jednadžbom misli na jednadžbe koje uključuju elektromehaničku spregu tj. međuočujecaj električne domene na mehaničku. Rezultirajuće elektromehaničke jednadžbe se zatim rješavaju za stacionarno stanje naponskog odziva i vibracijski odziv pri harmonijskoj uzbuđi baze (ukliještenja). Nakon uvrštavanja prve jednadžbe iz (3.44) u jednadžbu (3.41), i primjene uvjeta ortogonalnosti vlastitih funkcija, koji su nužni radi pronalaženja konstante modalne amplitude C_r , spregnuta jednadžba gibanja konzole u modalnim koordinatama³⁹ glasi [Erturk, 2009.]:

$$\frac{d^2\eta_r^s(t)}{dt^2} + 2\zeta_r\omega_r \frac{d\eta_r^s(t)}{dt} + \omega_r^2\eta_r^s(t) + \chi_r^s v_s(t) = f_r(t) \quad (3.57)$$

pri čemu je izraz za elektromehaničko sprezanje:

$$\chi_r^s = \mathcal{G}_s \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad (3.58)$$

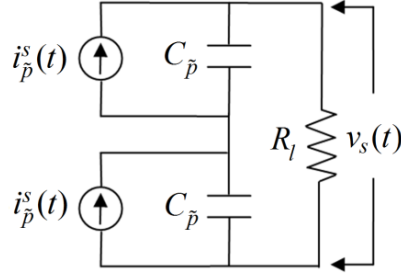
a funkciju modalne mehaničke prisile Erturk izražava kao:

$$f_r(t) = -m \left(\frac{d^2 g(t)}{dt^2} \int_0^L \phi_r(x) dx + \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \int_0^L x \phi_r(x) dx \right) - M_t \phi_r(L) \left(\frac{d^2 g(t)}{dt^2} + L \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \right) \quad (3.59)$$

U jednadžbi (3.57), ζ_r predstavlja modalni mehanički koeficijent prigušenja koji uključuje kombinirane učinke Kelvin-Voigtovog prigušenja u materijalu i prigušenja zrakom. Taj se koeficijent može odrediti matematički, a uobičajeni pristup za njegovo određivanje je eksperimentom, izravno iz frekvencijskog odziva pobuđene strukture.

Kao što je navedeno, svaki piezoelektrični sloj može se prikazati kao izvor struje spojen paralelno sa svojim unutarnjim kapacitetom kao što je već prethodno prikazano (Slika 29, a i b). Na idućoj slici prikazan je serijski spoj dvaju identičnih piezokeramičkih slojeva pri bimorfnoj konfiguraciji uređaja (Slika 30).

³⁹ Modalne koordinate su u ovom slučaju transformirane koordinate osi z , koje su u modalnoj analizi najčešće normalizirane i nalaze se u rasponu od -1 do 1.



Slika 30. Električni krug koji predstavlja serijski spoj dvaju piezokeramičkih slojeva [Erturk, 2009.]

Primjenom Kirchoffovih zakona na prikazani krug (Slika 30) dobije se sljedeća jednačba:

$$\frac{C_{\bar{p}}}{2} \frac{dv_s(t)}{dt} + \frac{v_s(t)}{R_l} = i_p^s(t) \quad (3.60)$$

Unutarnji kapacitet i jakost struje u bimorfu (za svaki pojedini sloj) dani su sljedećim izrazima:

$$C_{\bar{p}} = \frac{\bar{\epsilon}_{33}^s b L}{h_{\bar{p}}}, \quad i_p^s(t) = \sum_{r=1}^{\infty} \kappa_r \frac{d\eta_r^s(t)}{dt} \quad (3.61)$$

Izraz za modalno elektromehaničko sprezanje tada poprima sljedeći oblik:

$$\kappa_r = -\bar{e}_{31} h_{\bar{p}c} b \int_0^L \frac{d^2 \phi_r(x)}{dx^2} dx = -\frac{\bar{e}_{31} (h_{\bar{p}} + h_s) b}{2} \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad (3.62)$$

Jednačba (3.61) je jednačba električnog kruga serijski spojenog piezoelektričnog bimorfa. Jednačbe (3.58) i (3.60) spregnute su jednačbe modalnog mehaničkog odziva $\eta_r^s(t)$ i naponskog odziva $v_s(t)$ na radnom trošilu.

U ovom je dijelu disertacije izvedeno Erturkovo stacionarno rješenje naponskog i vibracijskog odziva (engl. *steady state response*) i to za harmonijsku uzbuđu sustava. Ako su translatorne i rotacijske komponente pomaka uklještenja dane jednačbom (3.33) harmonijskog oblika tj., $g(t) = W_0 e^{j\omega t}$ i $h(t) = \theta_0 e^{j\omega t}$, i ako su W_0 i θ_0 translacijski i mali rotacijski pomaci baze, dok je ω uzbudna frekvencija, a j imaginarna jedinica, tada se modalna funkcija uzbuđe dana jednačbom (3.59) može izraziti kao $f_r(t) = F_r e^{j\omega t}$ gdje je amplituda F_r jednaka:

$$F_r = \omega^2 \left[m \left(W_0 \int_0^L \phi_r(x) dx + \theta_0 \int_0^L x \phi_r(x) dx \right) + M_t \phi_r(L) (W_0 + L\theta_0) \right] \quad (3.63)$$

Kod harmonijske uzbude uklještenja pri frekvenciji ω , pretpostavlja se da će stacionarni modalni mehanički odziv $\eta_r^s(t) = H_r^s e^{j\omega t}$, kao i stacionarni naponski odziv na radnom trošilu $v_s(t) = V_s e^{j\omega t}$, biti harmonijski i to pri istoj frekvenciji, dok su amplitude H_r^s i V_s kompleksne vrijednosti. Iz jednažbi (3.60) i (3.57) mogu se izvesti dvije jednažbe za amplitude mehaničkog i naponskog odziva H_r^s i V_s [Erturk, 2009.]:

$$(\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega) H_r^s + \chi_r^s V_s = F_r \quad (3.64)$$

$$\left(\frac{1}{R_l} + j\omega \frac{C_{\tilde{p}}}{2} \right) V_s - j\omega \sum_{r=1}^{\infty} \kappa_r H_r^s = 0 \quad (3.65)$$

Iz jednažbe (3.65) moguće je izvesti izraz za amplitudu kompleksnog modalnog mehaničkog odziva H_r^s te ga zatim uvrstiti u jednažbu (3.64), kako bi se moglo eksplicitno izraziti amplitudu kompleksnog napona V_s . Dobivenu amplitudu V_s uvrsti se u izraz naponskog odziva i dobije se izraz za stacionarni naponski odziv [Erturk, 2009.]:

$$v_s(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r F_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega \frac{C_{\tilde{p}}}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r \chi_r^s}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} e^{j\omega t} \quad (3.66)$$

Amplitudu kompleksnog napona V_s uvrsti se u jednažbu (3.65) i pa je modalni mehanički odziv stacionarnog stanja bimorfa tada [Erturk, 2009.]:

$$\eta_r^s(t) = \left(F_r - \chi_r^s \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r F_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega \frac{C_{\tilde{p}}}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r \chi_r^s}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} \right) \frac{e^{j\omega t}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} \quad (3.67)$$

Odziv poprečnog pomaka (relativnog u odnosu na oslonac, tj. uklještenje) u točki x bimorfa može se izvesti uvrštavajući jednažbu (3.67) u (3.44) [Erturk, 2009.]:

$$w_{rel}^s(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \left[\left(F_r - \chi_r^s \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r F_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega \frac{C_{\bar{p}}}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r \chi_r^s}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} \right) \frac{\phi_r(x) e^{j\omega t}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} \right] \quad (3.68)$$

Vibracijski odziv dan jednadžbom (3.68) zapravo je odziv pomaka konzole relativno na njen pomični oslonac tj. uklještenje.

Za dobivanje apsolutnih koordinata (relativnih u odnosu na nepomični okvir), potrebno je superponirati pomake uklještenja i vibracijske pomake relativne u odnosu na uklještenje:

$$w^s(x, t) = w_b(x, t) + w_{rel}^s(x, t) \quad (3.69)$$

gdje je $w_b(x, t)$ efektivni pomak uklještenja dan jednadžbom (3.33).

Analogno učinjenom, moguće je provesti i proceduru za dobivanje izraza za paralelni spoj piezokeramičkih slojeva. Međutim, u ovoj disertaciji naglasak je na serijskom spoju slojeva piezokeramike, kao što je opisano na početku ovog poglavlja u točki 3.2.1.

3.2.5 Elektromehaničke funkcije frekvencijskog odziva pri jednoj ili više frekvencija

Kod ovdje iznesenog Erturkovog elektromehaničkog modela [Erturk, 2009], dvije glavne uzbude sustava su translacija oslonca u poprečnom smjeru i mala rotacija oslonca (Slika 27). Te dvije uzbude u sustavu rezultiraju s dvama elektromehaničkim izlazima, tj. s naponskim i vibracijskim odzivom. Stoga je za ulaznu harmonijsku uzbudu moguće definirati četiri elektromehaničke funkcije frekvencijskog odziva (engl. *FRF – frequency response function*) u odnosu na dva ulaza i izlaza: napon u odnosu na translacijsko ubrzanje oslonca, napon u odnosu na rotacijsko ubrzanje oslonca, vibracijski odziv u odnosu na translacijsko ubrzanje oslonca te vibracijski odziv u odnosu na rotacijsko ubrzanje oslonca. U ovom dijelu disertacije će se razmatrati FRF-ovi izvesti iz izraza za multifrekvencijsku uzbudu te uzbudu pri jednoj (stacionarnoj) frekvenciji.

Temeljem definiranih translacijskih pomaka i rotacije oslonca (u poglavlju 3.2.4) te funkcije modalne prisile $f_r(t)$ i njene amplitude F_r dane jednadžbom (3.63), a prije izvođenja izraza za

FRF-ove, Erturk je izrazio amplitudu kompleksne modalne prisile na sljedeći način [Erturk, 2009.]:

$$F_r = -\sigma_r \omega^2 W_0 - \tau_r \omega^2 \theta_0, \quad (3.70)$$

gdje su:

$$\sigma_r = -m \int_0^L \phi_r(x) dx - M_t \phi_r(L) \quad (3.71)$$

$$\tau_r = -m \int_0^L x \phi_r(x) dx - M_t L \phi_r(L) \quad (3.72)$$

Stacionarni naponski odziv dan jednadžbom (3.66) moguće je napisati i koristeći izraze za translacijsko i rotacijsko ubrzanje uklještenja:

$$v_s(t) = \alpha_s(\omega)(-\omega^2 W_0 e^{j\omega t}) + \mu_s(\omega)(-\omega^2 \theta_0 e^{j\omega t}) \quad (3.73)$$

Funkcija frekvencijskog odziva koja povezuje izlazni napon s translacijskim ubrzanjem uklještenja tj. parcijalno rješenje jednadžbe (3.73) za njezin prvi član prema Erturku tada glasi:

$$\alpha_s(\omega) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r \sigma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_t} + j\omega \frac{C_{\dot{p}}}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \kappa_r \chi_r^s}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} e^{j\omega t} \quad (3.74)$$

Izraz (3.74) posebno je zanimljiv za procjenu učinka piezoelektričnog pretvarača vibracijske energije i to zbog mogućnosti provjere naponskog odziva pri različitim frekvencijama. Taj izraz će, stoga, kasnije u radu biti korišten za usporedbu analize metodom konačnih elemenata i s eksperimentalnim rezultatima. Na istovjetan način moguće je dobiti i vezu izlaznog napona s rotacijskim članom $\mu_s(\omega)$ jednadžbe (3.73).

U sljedećem dijelu poglavlja izraz (3.74) bit će korišten kao baza za implementaciju predstavljenog analitičkog modela u MATLAB-u te će na temelju istog biti simuliran naponski odziv piezoelektrične konzole s utegom i bez utega.

3.3 Implementacija modela u MATLAB programskom paketu

U prvome dijelu ovoga poglavlja (točka 3.1) predstavljene su teorijske postavke i postupak analize vlastitih vrijednosti s naglaskom na vibracijski odziv uklještene konzole s vršnom masom [Meirovitch, 2001.]. Ova analiza je poslužila kao osnova za izlaganje Erturkovog analitičkog modela elektromehaničkog odziva piezoelektričnih bimorfni konzola (točka 3.2) koji je rezultirao izrazom (3.74) odnosno iznosom napona u odnosu na translacijsko ubrzanje oslonca (iznosi napona su pritom normalizirani ubrzanjem oslonca) [Erturk, 2009.]. Pomoću izraza (3.74) moguće je izračunati na koji način uzbudna frekvencija, otpor radnog trošila, dimenzije konzole i karakteristike materijala utječu na elektromehanički odziv piezoelektričnih pretvarača kinetičke energije vibracija u električnu energiju.

U nastavku je objašnjen način uporabe predstavljenog analitičkog modela u MATLAB programskom paketu. MATLAB je matrični⁴⁰ kalkulator naširoko korišten u inženjerskim proračunima jer omogućuje laku obradu i diskretizaciju matematičkih izraza. U svojoj osnovi ima ugrađen veliki broj numeričkih metoda koje olakšavaju korištenje samog paketa i prevođenje matematičkih izraza u matričnu formu. Postupak se provodi na dvije razine: prvo je implementirana metoda analize vlastitih vrijednosti opisana u 3.1, nakon čega i Erturkov spregnuti modalni model predstavljen u točki 3.2. Ove programske rutine kasnije će biti korištene za usporedbu s analizom modela metodom konačnih elemenata i eksperimentalnim rezultatima, ali i za parametarsku analizu utjecaja različitih varijabli modela na odziv piezoelektrične konzole. Programski kod nalazi se u prilogu, a sama metoda opisana je u nastavku.

3.3.1 Postupak modeliranja

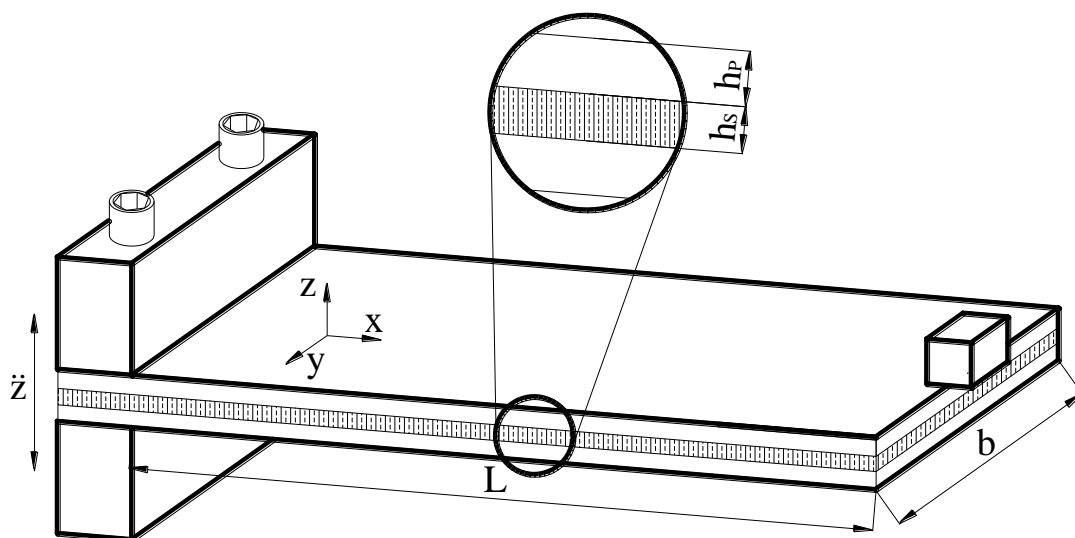
Radi provođenja simulacija, koristi se model opisan izrazom funkcije frekvencijskog odziva (3.74) kojim se dovodi u vezu dinamika uzbude uklještenja, primijenjeno radno trošilo i piezoelektrični elementi. Spomenuti izraz potrebno je prevesti u MATLAB kod. Funkcija u sebi sadrži više izraza koje je potrebno zasebno obraditi te zatim vratiti u jednadžbu. Postupak modeliranja započinje analizom vlastitih vrijednosti iz poglavlja 3.1 radi pronalaženja vrijednosti ω_r , odnosno vlastitih frekvencija modeliranog sustava. Kako bi to bilo moguće,

⁴⁰ Ulazni i izlazni podaci unutar MATLAB softvera su najčešće zapisani u matričnom ili vektorskom obliku čime su omogućene jednostavne matematičke manipulacije podacima i grafički prikazi rezultata.

potrebno je jednadžbu (3.49) riješiti numeričkim rješavačem koji omogućuje pronalaženje nultočaka u zadanom rasponu. U MATLAB-u se za takve slučajeve koristi funkcija $fzero$, a iz izraza (3.49) potrebno je izračunati vrijednosti nultočaka varijable λ . S dobivenim vrijednostima moguće je, koristeći izraz (3.48), izračunati vlastite frekvencije sustava. Nakon toga rješavaju se uvjeti ortogonalnosti zadani izrazom (3.47) za konstante C_{r1} i C_{r2} te ih se pohranjuje za daljnju uporabu.

Nakon pronađenih vlastitih vrijednosti i frekvencija sustava te riješenih uvjeta ortogonalnosti, prilazi se rješavanju glavnog izraza. U tu svrhu najprije je potrebno izračunati izraz modalnog elektromehaničkog spreznja (3.62) i to uvrštavanjem prve derivacije izraza (3.45) za $x = L$. Slijedi izračun parametra amplitude kompleksne modalne prisile (3.71) (koji proizlazi iz (3.63)) i to korištenjem trapeznog pravila za numeričko integriranje izraza (3.45) upotrebom MATLAB funkcije $trapz$. Nakon toga slijedi određivanje parametra σ_r , a ista metoda se primjenjuje i na računanje drugog parametra amplitude kompleksne modalne prisile τ_r (razlika je u integrandu).

Uz spomenutu složenu proceduru, potrebno je riješiti jednadžbe (3.39), tj. izračunati koeficijent povratne piezoelektrične sprege za slučaj serijskog spoja aktivnih slojeva te izraz (3.58) odnosno modalno elektromehaničko spreznje. Konačno se zasebno rješavaju sume u brojniku i nazivniku izraza (3.74) koje rezultiraju iznosom $\alpha_s(\omega)$ tj. iznosom izlaznog napona normaliziranog amplitudom uzbudnih vibracija pri frekvenciji ω . Pri iterativnoj promjeni iznosa uzbudne frekvencije na taj je način moguće promatrati promjenu oblika naponskog odziva simuliranog sustava pri različitim uvjetima uzbude.



Slika 31. Piezoelektrični bimorf korišten u Matlab simulacijama

3.3.2 Postavke modela, geometrija konzole i svojstva materijala

Za simulaciju modela (Slika 31) korištena je piezoelektrična bimorfna konzola geometrijskih karakteristika navedenih u tablici 6.

Tablica 6. Dimenzije piezoelektričnog bimorfa

| Veličina | Simbol | Iznos, m |
|-----------------------|--------|----------|
| Duljina | L | 0,1 |
| Širina | b | 0,02 |
| Visina supstrata | h_s | 0,0005 |
| Visina piezoelektrika | h_p | 0,0004 |

U prvim simulacijama koristi se konzola bez utega na slobodnom kraju, a zatim i konzola s volframovim utegom mase $M_t = 1$ g. Materijal supstrata je opći konstrukcijski čelik, dok je za piezoelektrični sloj upotrijebljena keramika, općenitog trgovačkog naziva PZT-5A [CTS Electronic Components, Inc.]. Koeficijent mehaničkog prigušenja materijala konzole za potrebe teorijske simulacije, a na temelju prethodnih eksperimentalnih rezultata i podataka iz literature, procjenjuje se na vrijednost od $\zeta = 0,008$. Za potrebe testiranja stvarne konzole, za razliku od one upotrijebljene u čisto teorijskoj razradi, potrebno je svakako izračunati prigušenje preko logaritamskog dekrementa naponskog odziva konzole pri udarnom testiranju (vidjeti poglavlje 5.2.2). Za potrebe evaluacije elektromehaničkih izraza korišteno je radno trošilo otpora $R_1 = 100$ k Ω . Mehanička i piezoelektrična svojstva prikazana su u sljedećoj tablici:

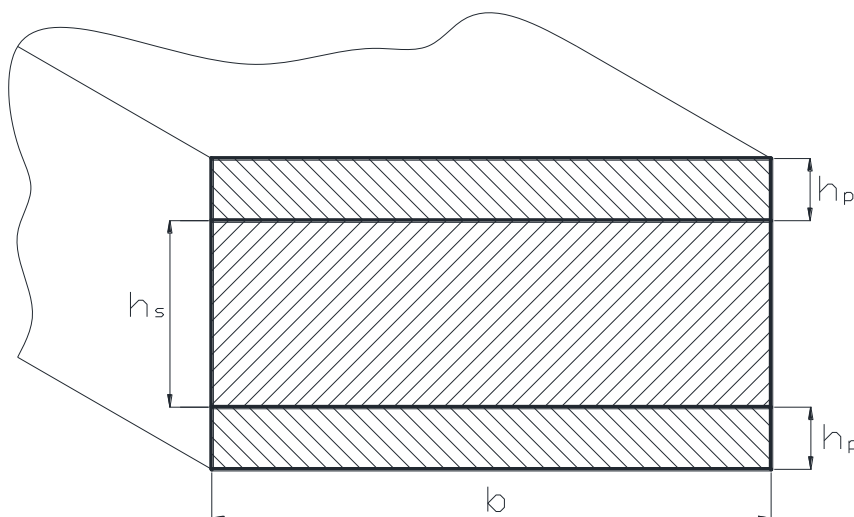
Tablica 7. Svojstva materijala

| Veličina | Simbol | Iznos |
|---|-------------------------|----------------------|
| Modul elastičnosti supstrata, N/m ² | E_s | $20,6 \cdot 10^{10}$ |
| Modul elastičnosti piezoelektrika, N/m ² | \bar{c}_{11}^E | $61 \cdot 10^9$ |
| Gustoća supstrata, kg/m ³ | ρ_s | 7850 |
| Gustoća piezoelektrika, kg/m ³ | ρ_p | 7800 |
| Gustoća utega, kg/m ³ | ρ_{M_t} | 19250 |
| Masa utega, g | M_t | 1 |
| Piezoelektrična konstanta, C/m ² | \bar{e}_{31} | -10,4 |
| Konstanta permitivnosti, nF/m | $\bar{\epsilon}_{33}^S$ | 13,3 |
| Mehaničko prigušenje konzole | ζ | 0,008 |
| Kapacitet konzole, nF | C_p | 76,6 |

3.3.3 Proračun izraza ekvivalentne savojne krutosti

U literaturi je dostupno više izraza koji se koriste za ekvivalentnu savojnu krutost EI [Roundy 2003., Erturk, 2009.]. U ovdje razvijenom modelu njena se vrijednost izračunava pomoću izraza (3.40), a za potrebe verificiranja eksperimenata u ovoj disertaciji bilo je nužno definirati i savojnu krutost za konzolu koja odstupa od klasične bimorfne konfiguracije. Metodologija proračuna ekvivalentne savojne krutosti temeljena je na teoremu paralelnih osi za moment tromosti presjeka odnosno na Huygens-Steinerovom pravilu [Ražnjević, 1997] i to za klasični bimorf pretpostavljen u ovom poglavlju. Ista je metodologija korištena kasnije za proračun savojne krutosti konzola s više različitih slojeva.

Slika 32 prikazuje poprečni presjek bimorfne konzole širine b sa sljedećim slojevima: sloj supstrata debljine h_s s Youngovim modulom elastičnosti E_s i dva sloja piezoelektrika debljina h_p s modulom elastičnosti \bar{c}_{11}^E :



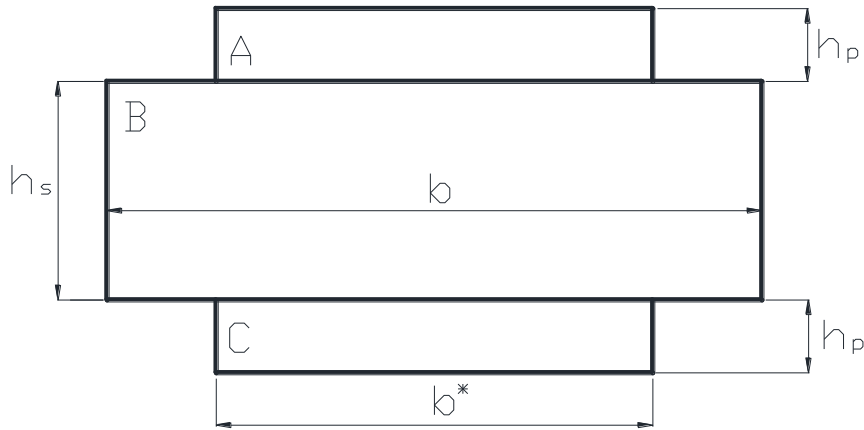
Slika 32. Bimorf sastavljen od dvaju različitih materijala

Uz pretpostavku linearno-elastičnih materijala, konzolu sastavljenu od dva materijala s različitim modulima elastičnosti moguće je svesti na homogenu konzolu od jednog materijala. U tu svrhu potrebno je uvesti faktor transformacije materijala η koji je jednak omjeru modula elastičnosti (E_p se u slučaju piezoelektričnih materijala označava kao \bar{c}_{11}^E):

$$\eta = \frac{E_p}{E_s}. \quad (3.75)$$

Pomoću faktora η modificira se utjecaj širine pojedinog sloja⁴¹. U ovom slučaju odlučeno je da će se presjek svesti na ekvivalentni homogeni presjek od supstrata s modulom elastičnosti E_s i širinom sloja b , a utjecaj piezoelektričnog sloja će se modificirati na način da on poprimi novu širinu označenu s b^* s modulom elastičnosti jednakim onome supstrata:

$$b^* = \eta \cdot b \quad (3.76)$$



Slika 33. Bimorf sastavljen od jednog materijala s modificiranim širinama slojeva A i C

Uzimajući u obzir nove širine slojeva A i C (Slika 33), i Huygens-Steinerov teorem, nova se ekvivalentna savojna krutost EI izračunava kao umnožak momenta tromosti poprečnog presjeka I_x (sastavljenog od slojeva A, B i C - Slika 33) s modulom elastičnosti supstrata E_s :

$$I_x = I_A + I_B + I_C$$

$$I_A = I_C = \frac{b_* h_p^3}{12} + b_* h_p \left(\frac{h_s}{2} + \frac{h_p}{2} \right)^2$$

(3.77)

$$I_B = \frac{b h_s^3}{12}$$

$$I_x = \frac{b h_s^3}{12} + 2 \left[\frac{b_* h_p^3}{12} + b_* h_p \left(\frac{h_s}{2} + \frac{h_p}{2} \right)^2 \right]$$

⁴¹ Ne modificira se debljina sloja, jer se želi zadržati jednaka udaljenost slojeva od neutralne osi presjeka. Naravno, važno je i što širina sloja ulazi u izračun momenta tromosti linearno, a debljina s kubom

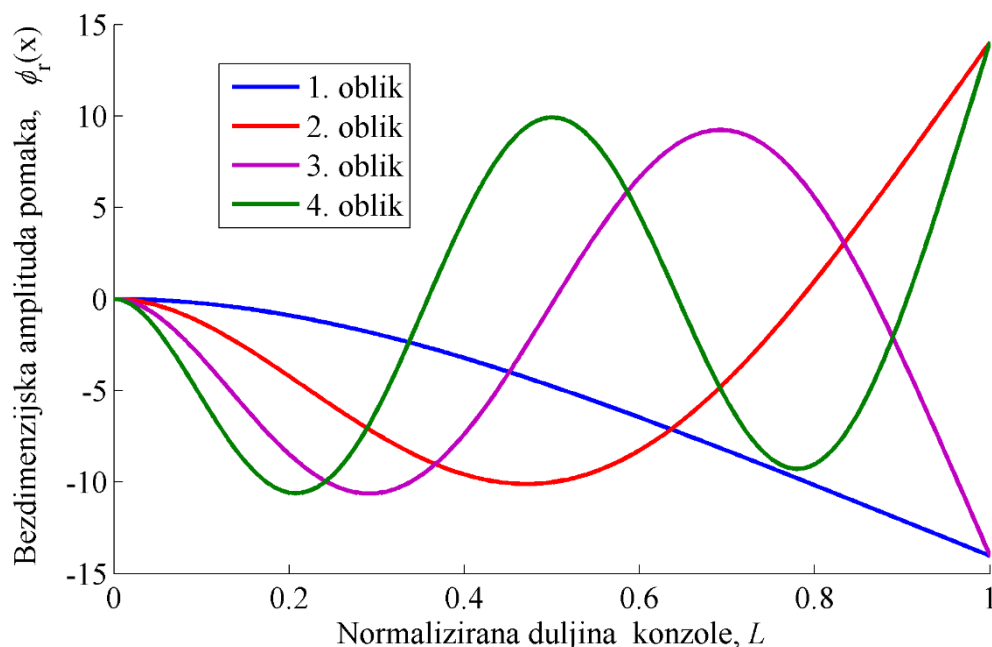
Ovako definiran izraz za ekvivalentni moment tromosti poprečnog presjeka jednak je onom kojega je pretpostavio Erturk [Erturk, 2009.], dok blago odstupa od izraza predstavljenih u ostaloj literaturi (do 2%) [Roundy², 2003.].

3.3.4 Analiza vlastitih vrijednosti konzole

Kao što je opisano u poglavlju 3.3.1, iz razvijenog modela najprije se dobiju rješenja vlastitih vrijednosti konzole pri savijanju. Pomoću istih se zatim dobiju oblici savijanja i pripadajuće frekvencije kako za prvi temeljni oblik vibriranja tako i za različite oblike savijanja konzole pri višim frekvencijama. Analiza je izvršena za prve četiri vlastite frekvencije ω_r čiji rezultati slijedi:

Konzola bez utega:

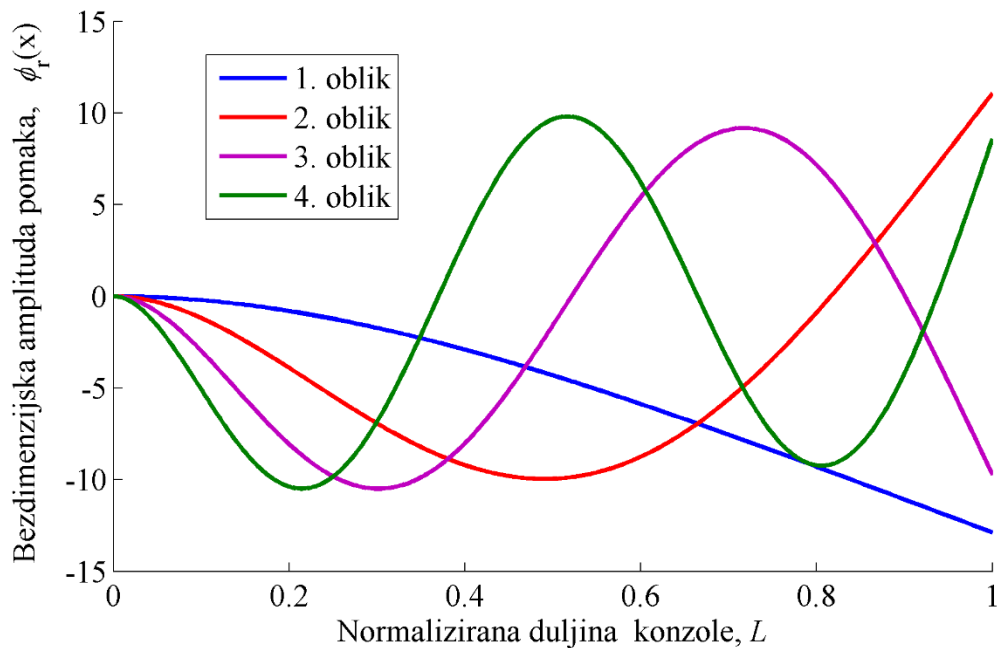
1. $\omega_1 = 62,5$ Hz
2. $\omega_2 = 391,65$ Hz
3. $\omega_3 = 1096,6$ Hz
4. $\omega_4 = 2149,0$ Hz



Slika 34. Prva četiri oblika savijanja piezoelektrične bimorfne konzole bez utega

Konzola s utegom $M_t = 1\text{ g}$:

1. $\omega_1 = 57,1\text{ Hz}$
2. $\omega_2 = 362,17\text{ Hz}$
3. $\omega_3 = 1022,5\text{ Hz}$
4. $\omega_4 = 2016,8\text{ Hz}$



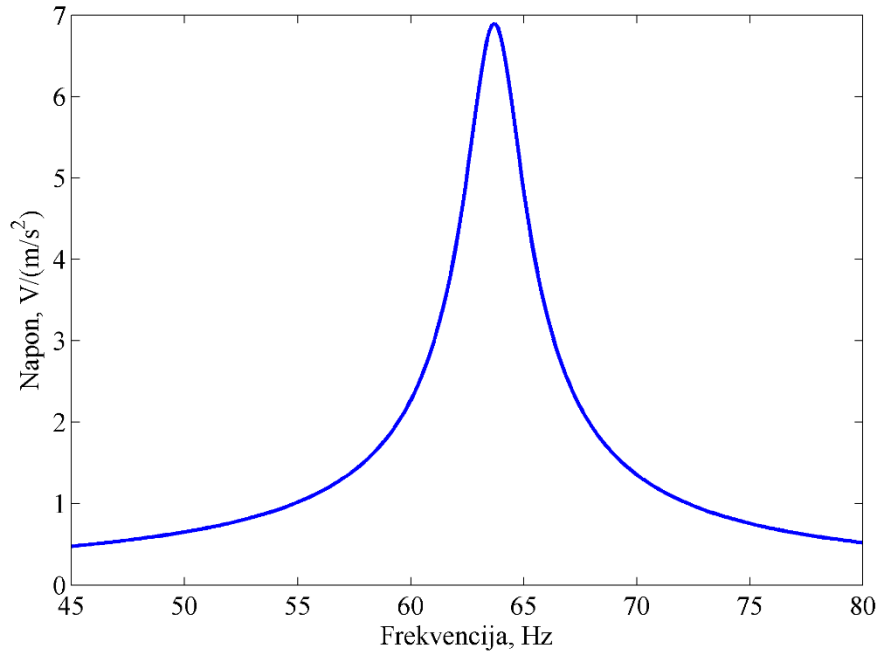
Slika 35. Prva četiri oblika savijanja piezoelektrične bimorfne konzole s utegom

Iz gore prikazanih dijagrama (Slika 34 i Slika 35) uočljiv je prvi (osnovni) oblik savijanja pri prvoj vlastitoj frekvenciji od 62,5 Hz za konzolu bez utega odnosno 57,1 Hz za konzolu s utegom, dok su ostali oblici savijanja teško ostvarivi i pojavljuju se tek pri značajno višim vlastitim frekvencijama. Potrebno je naglasiti kako u ovoj fazi implementacije proračuna još nisu uključeni elementi elektromehaničke sprege (radno trošilo, faktor piezoelektrične sprege i povratne piezoelektrične sprege) te gore prikazane vrijednosti proizlaze samo iz mehaničke domene. Ipak, ovom preliminarnom analizom utvrđene su granice ciljane frekvencijske uzbude za simulirani piezoelektrični bimorf te je ustanovljeno da model uzima u obzir utjecaj dodanog utega, a što se uočava smanjivanjem vrijednosti vlastitih frekvencija.

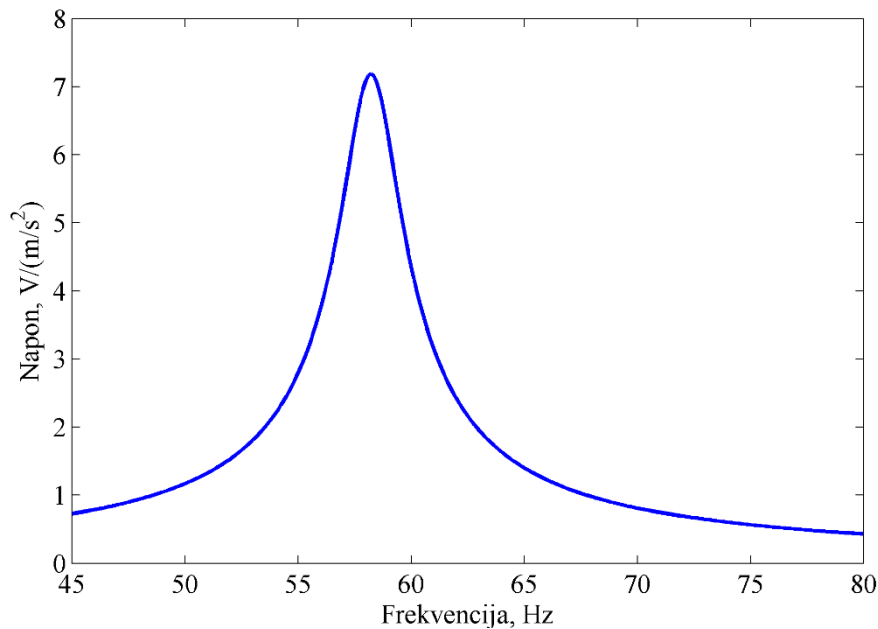
3.3.5 Simuliranje naponskog odziva piezoelektričnog bimorfa

Nakon utvrđivanja rezonantnog područja za prvi oblik vibriranja, odnosno dobivanja vrijednosti frekvencije ω_1 , pomoću izraza (3.74) simulira se naponski odziv za određeni

frekvencijski raspon. U tu svrhu koristi se radno trošilo s otporom $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ i frekvencijski raspon od 45-80 Hz i to za konzolu bez utega i onu s utegom. Ovako dobiven naponski odziv normaliziran je amplitudom translacijskog ubrzanja oslonca tj. uklještenja.

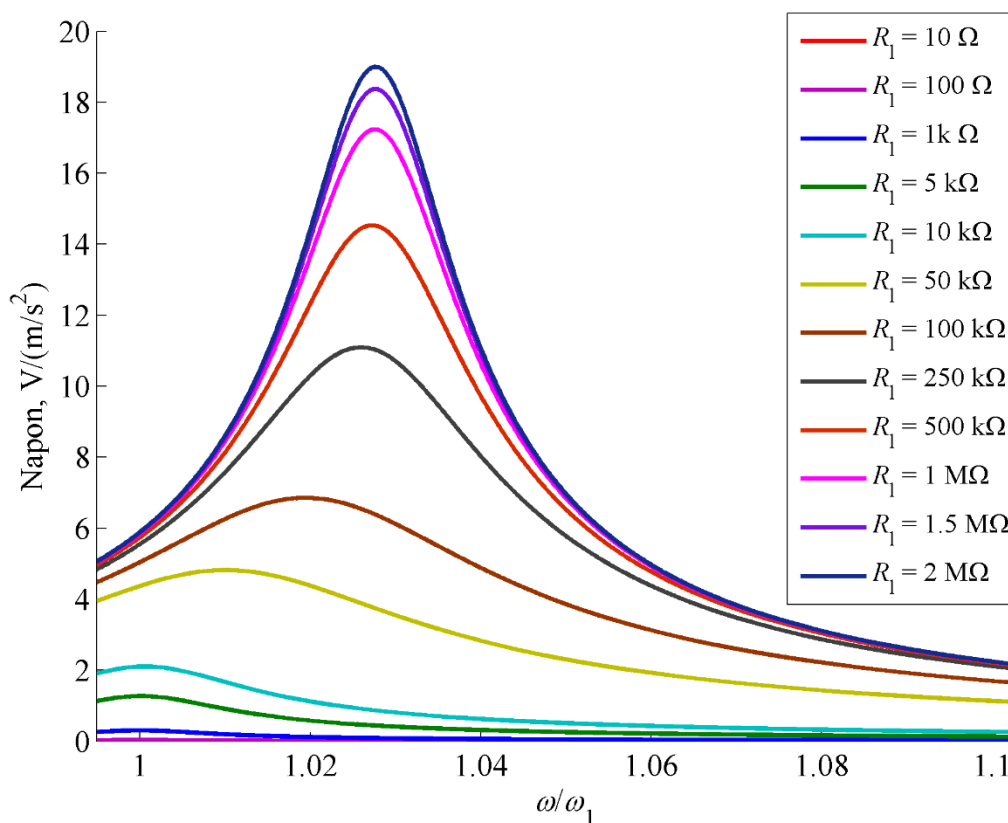


Slika 36. Naponski odziv bimorfne piezoelektrične konzole bez utega za frekvencijski raspon od 45-80 Hz i radno trošilo otpora $100 \text{ k}\Omega$

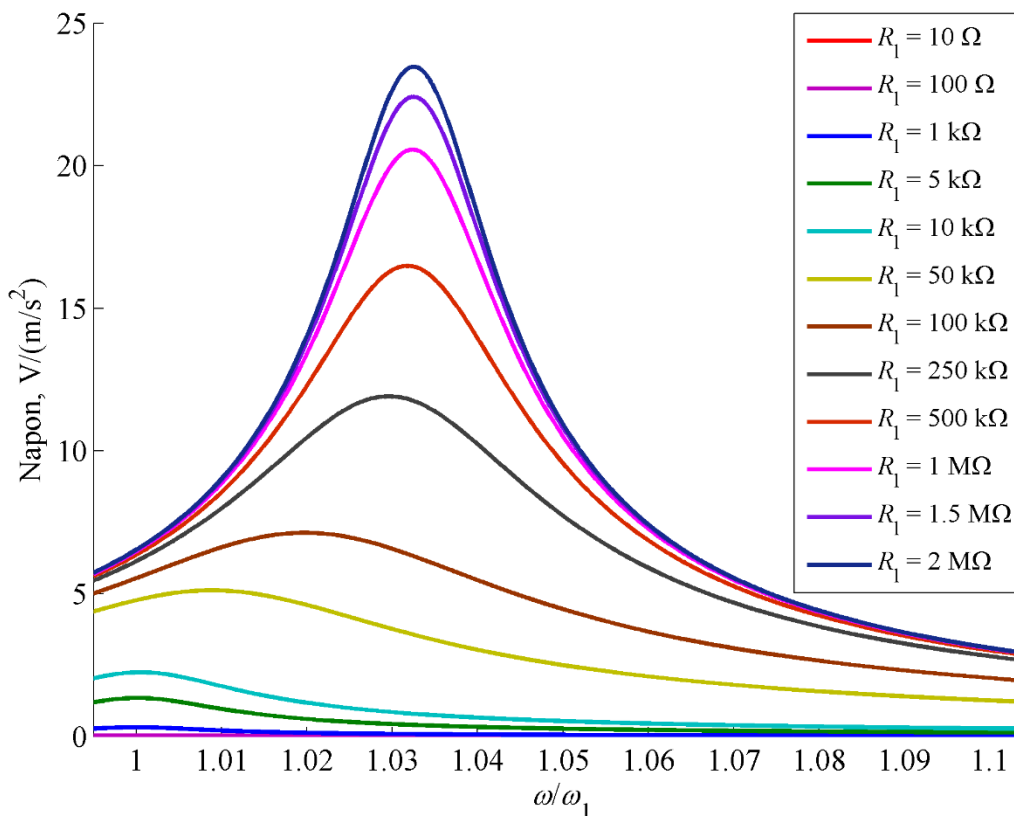


Slika 37. Naponski odziv bimorfne piezoelektrične konzole s utegom za frekvencijski raspon od 45-80 Hz i radno trošilo otpora $100 \text{ k}\Omega$

Iz prethodnih dijagrama (Slika 36 i Slika 37) uočava se povećanje vlastite frekvencije u odnosu na slučaj čistog mehaničkog odziva. Za piezoelektrični bimorfni pretvarač bez utega s prethodno proračunatih $\omega_1 = 62,5$ Hz na 63,71 Hz, i s $\omega_1 = 57,1$ Hz na 58,19 Hz za piezoelektrični bimorfni pretvarač s utegom. Na radnom trošilu napon je u rezonanciji dosegao vrijednost od 6,9 V za konzolu bez utega i 7,36 V za konzolu s utegom. U drugom slučaju je povećanje iznosa vrijednosti napona očekivano zbog većeg momenta savijanja koje izaziva uteg postavljen na kraju konzole. Erturkov empirijski potvrđeni model [Erturk i Inman 2009., Benasciutti et al., 2010] uzima u obzir povratni utjecaj elektromehaničke sprege na mehaničku domenu, a na temelju prikazanih dijagrama to je lako i uočiti. Međutim, da bi se lakše uočio utjecaj povratne sprege, potrebno je izvesti i simulaciju u kojoj će jedna od varijabli biti i otpor radnog trošila i to u rasponu od uvjeta kratkog spoja odnosno vrlo malih otpora (npr. 10Ω), do uvjeta vrlo velikog električnog otpora (reda veličine $M\Omega$ – pri uvjetu otvorenog kruga).



Slika 38. Funkcije frekvencijskog odziva napona pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10Ω do $2 M\Omega$ za konzolu bez utega



Slika 39 Funkcije frekvencijskog odziva napona pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ za konzolu s utegom

Slika 38 i Slika 39 prikazuju naponski odziv pri promjeni uzbudne frekvencije od podrezonantne do nadrezonantne kao i promjenu vlastite frekvencije pri promjeni otpora radnog trošila R_1 i to zbog ranije spomenutih elektromehaničkih efekata. Korištene vrijednosti otpora R_1 su 10Ω , 100Ω , $1 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$, $50 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ k}\Omega$, $250 \text{ k}\Omega$, $500 \text{ k}\Omega$, $1 \text{ M}\Omega$, $1,5 \text{ M}\Omega$ i $2 \text{ M}\Omega$. Na slikama je uočljiv rast vrijednosti napona s rastom vrijednosti otpora i to od nulte vrijednosti za otpor $R_1 = 10 \Omega$ do 20 V pri vrijednosti otpora $R_1 = 2 \text{ M}\Omega$ za konzolu bez utega, odnosno do 23 V za konzolu s postavljenim utegom. Uočen je rast iznosa vlastite frekvencije s porastom otpora i to do maksimalno 3% u oba promatrana slučaja (uzbudna frekvencija ω normalizirana je u ovom prikazu u odnosu na vrijednosti prve vlastite frekvencije sustava ω_1).

Daleko korisniji podatak za procjenu učinkovitosti sustava je iznos prosječne električne snage (engl. *RMS root mean square*). Prosječna električna snaga proizlazi iz općeg izraza za električnu snagu istosmjerne struje⁴² i Ohmovog zakona:

⁴²Ovaj izraz se može koristiti i za izmjeničnu struju kao što je ovdje slučaj, ako se koriste prosječni odnosno RMS iznosi izmjeničnog napona.

$$i = \frac{|\alpha_s|}{R_l}$$

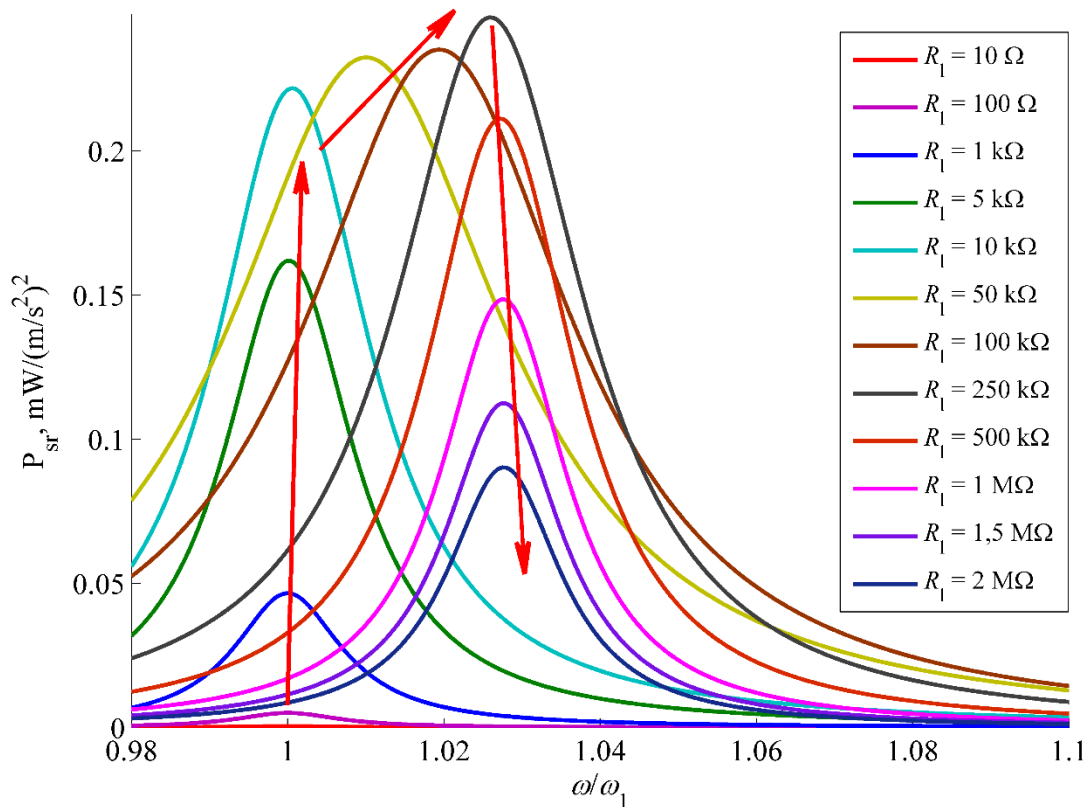
$$P_{\max} = |\alpha_s| \cdot i$$

$$P_{\max} = \frac{|\alpha_s|^2}{R_l}$$

(3.78)

$$|\alpha_s|_{RMS} = \frac{|\alpha_s|}{\sqrt{2}}$$

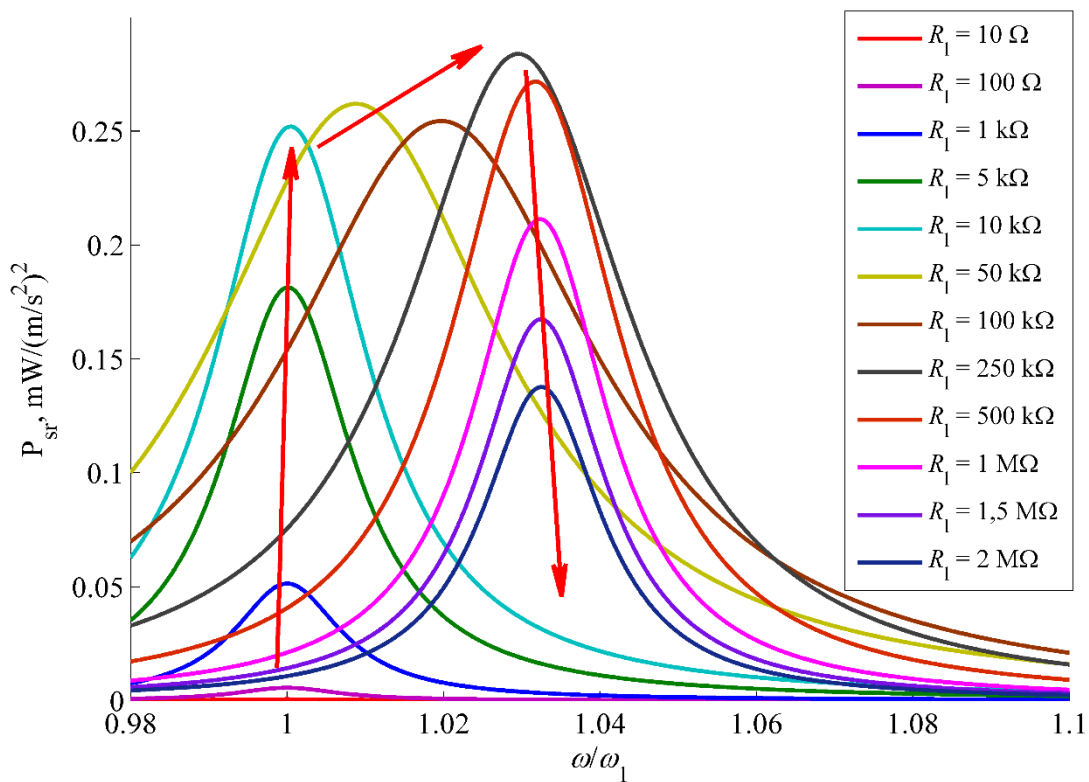
$$P_{sr} = \frac{|\alpha_s|_{\max}^2}{2R_l}$$



Slika 40. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ za konzolu bez utega

U jednadžbama izraza (3.78), P_{\max} predstavlja maksimalni iznos snage za jakost struje i , i maksimalnu amplitudu napona α_s . Prosječna snaga P_{sr} na otporu R_l dobiva se uvrštavanjem RMS iznosa napona $|\alpha_s|_{RMS}$ u izraz za P_{\max} . Korištenjem izraza (3.78) i prije dobivenih

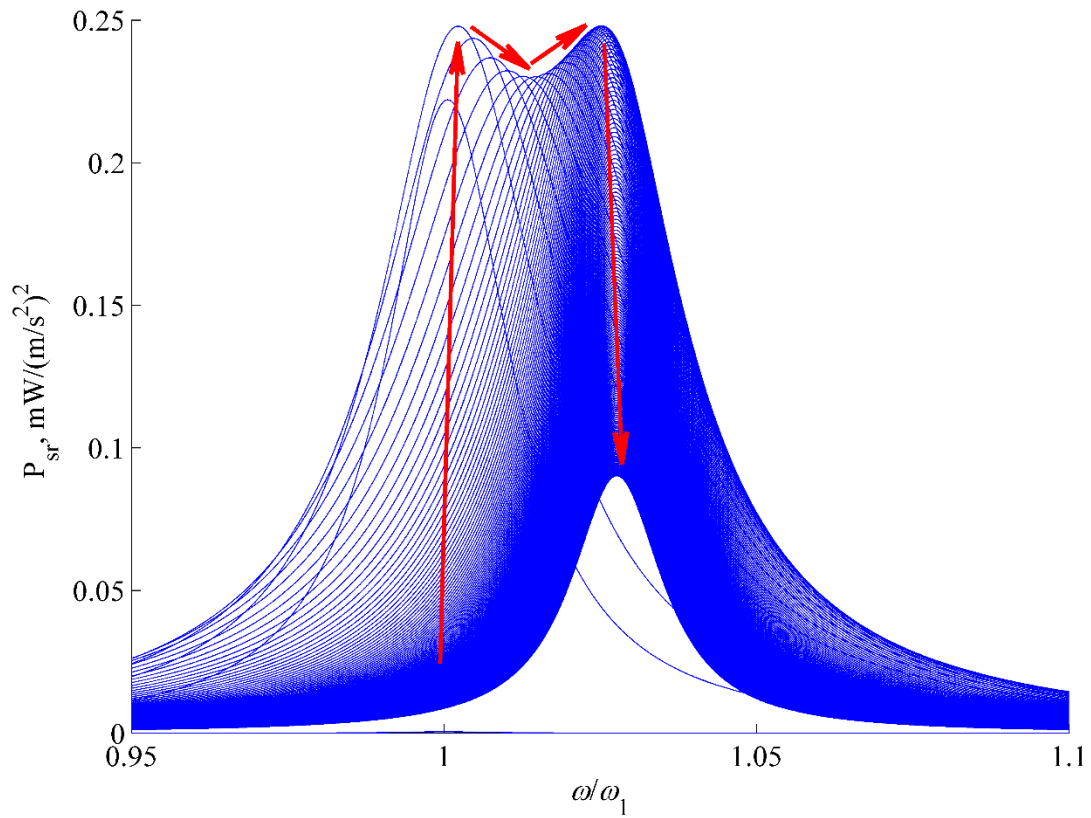
vrijednosti napona pri različitim uvjetima uzbude i električnog otpora (Slika 38 i Slika 39) izračunavaju se i funkcije frekvencijskog odziva za električnu snagu.



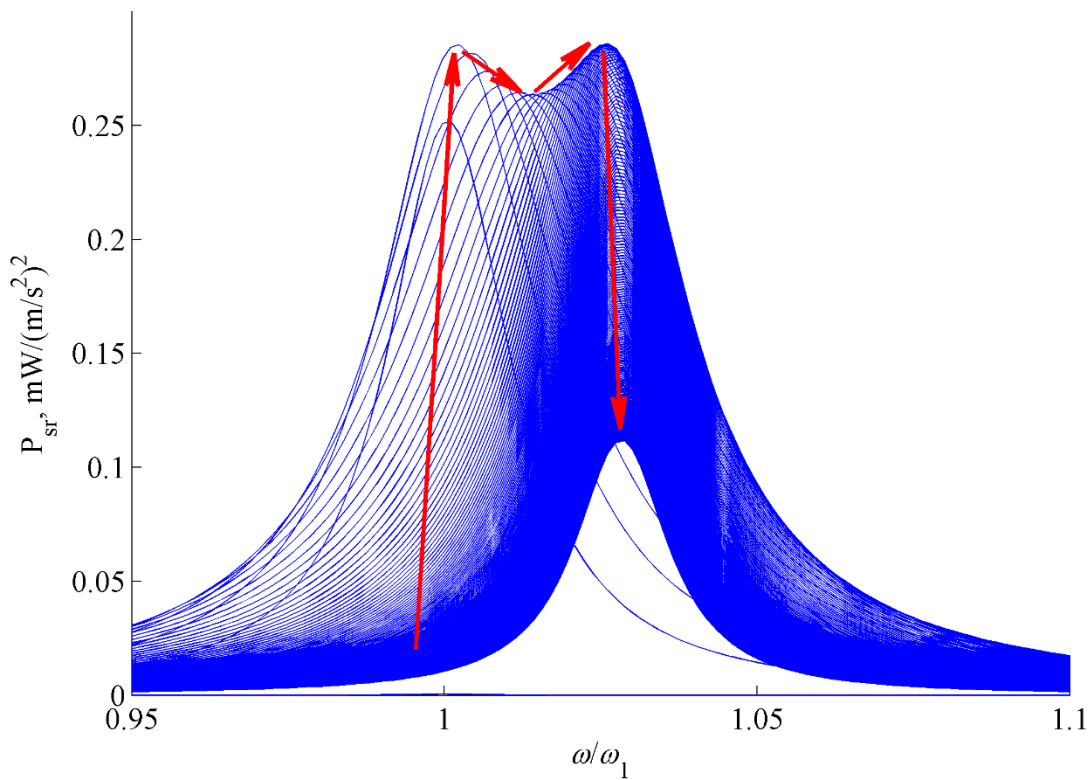
Slika 41. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ za konzolu s utegom

Slika 40. i Slika 41. prikazuju funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage u mW normalizirane s kvadratom amplitude translacijskog ubrzanja uklještenja⁴³ u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji normaliziranoj s prvom vlastitom frekvencijom. S uzlaznim strelicama prikazan je rast vrijednosti prosječne snage (do otpora $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$ za konzolu bez utega i $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ za konzolu s utegom), dok je silaznom strelicom prikazan pad snage i to pri konstantnom rastu iznosa otpora. Kako se na ovoj slici teško može uočiti karakteristični sedlasti oblik krivulja frekvencijskog odziva rasta i pada snage u ovisnosti o zadanom električnom otporu, potrebno je dodati više od dvanaest vrijednosti otpora korištenih u prethodnim dvijema simulacijama. Za potrebe prikaza na sljedeće dvije slike (Slika 42 i Slika 43) korišteno je stoga 200 različitih vrijednosti otpora u prethodno definiranom rasponu od 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$.

⁴³ Kako se u proračunu snage izraz za napon, normaliziran s ubrzanjem uklještenja, kvadrira tako je posljedično iznos snage normaliziran s kvadratom translacijskog ubrzanja.

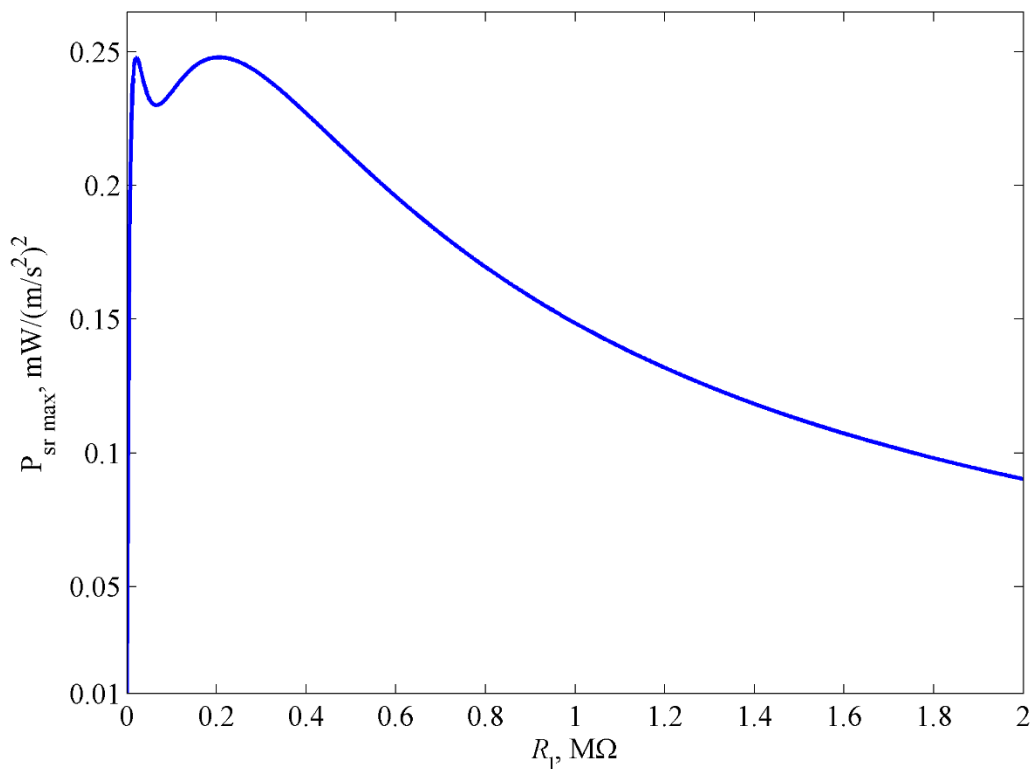


Slika 42. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 200 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ za konzolu bez utega



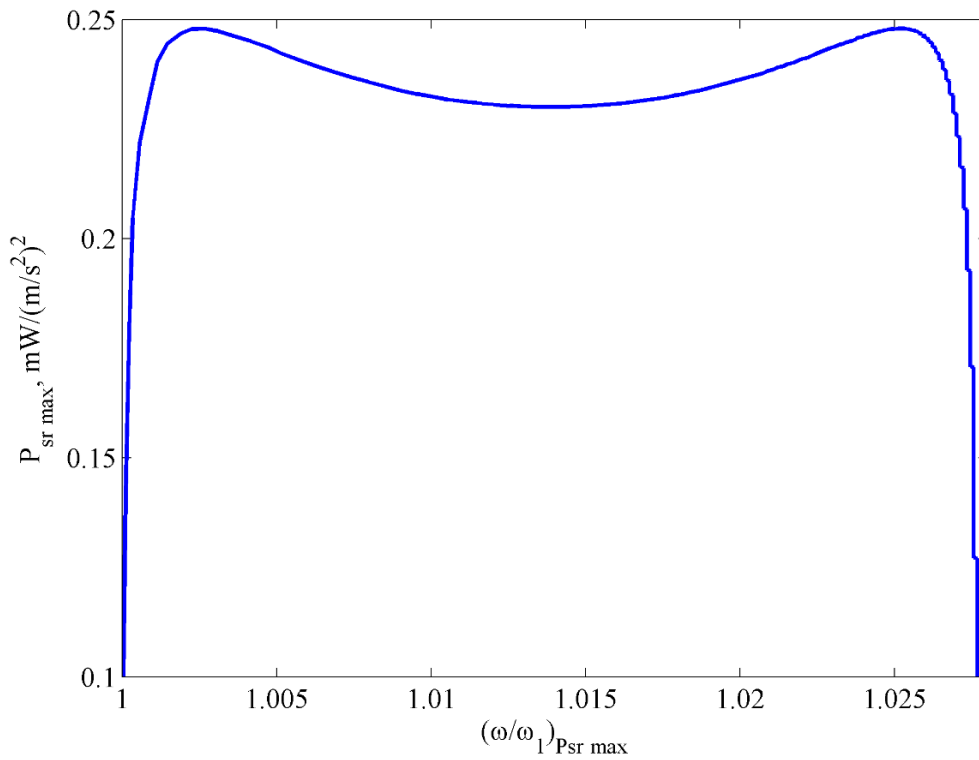
Slika 43. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 200 vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ za konzolu s utegom

Pri malim vrijednostima otpora vidljiv je nagli porast električne snage do vrijednosti otpora od $22\text{ k}\Omega$ za konzolu bez utega odnosno $28\text{ k}\Omega$ za konzolu s utegom te zatim kratki period opadanja do vrijednosti otpora od $66\text{ k}\Omega$ kod konzole bez utega odnosno $82\text{ k}\Omega$ kod konzole s utegom. Nakon toga slijedi kraći trend rasta snage do vrijednosti otpora od $206\text{ k}\Omega$ odnosno $306\text{ k}\Omega$ te daljnje smanjivanje prosječne snage do $2\text{ M}\Omega$. Kako bi ovaj trend bio još uočljiviji, potrebno je prikazati maksimalne iznose prosječne snage u rezonanciji i to u odnosu na otpor pri kojem je postignuta, ili u odnosu na rezonantnu frekvenciju pri kojoj je snaga postignuta.

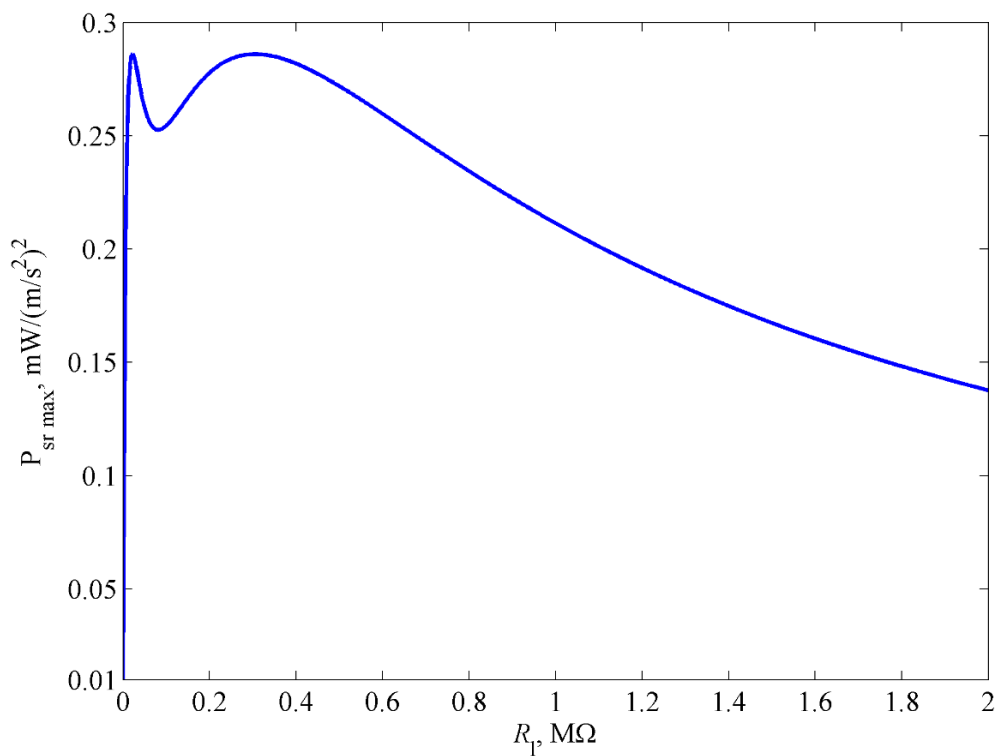


Slika 44. Vrijednosti maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 od $10\ \Omega$ do $2\text{ M}\Omega$ za konzolu bez utega

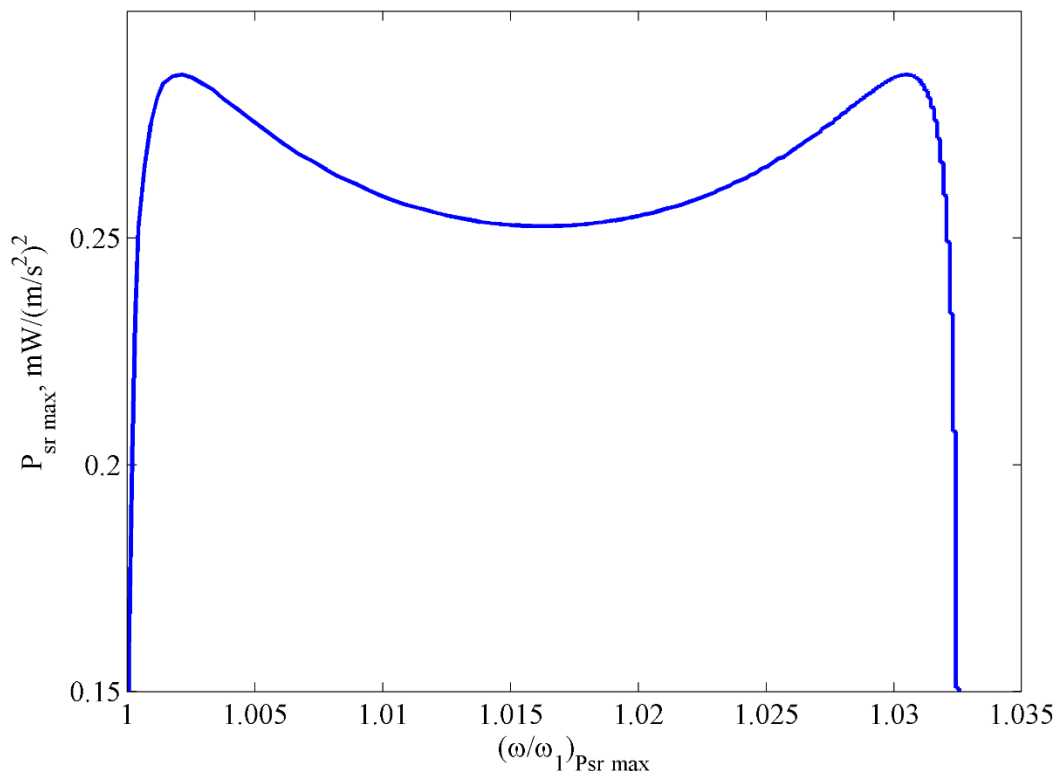
Iz predstavljenih slika (Slika 42, Slika 43, Slika 44 i Slika 46) vidljivo je da je odnos promjene snage u ovisnosti o vrijednostima otpora radnog trošila vrlo složen i nije monoton. Ovakav je prikaz koristan za određivanje vrijednosti optimalnog otpora, odnosno otpora pri kojem je moguće dobiti najveći iznos električne snage. Korisno je primijetiti kako može postojati više različitih vrijednosti otpora koji pri točno određenoj uzbudnoj frekvenciji rezultiraju jednakim iznosima maksimalne prosječne snage što prikazuju Slika 44 i Slika 45 za konzolu bez utega te Slika 46 i Slika 47 za konzolu s utegom.



Slika 45. Vrijednosti maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 od 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ u odnosu na vlastitu frekvenciju konzole bez utega



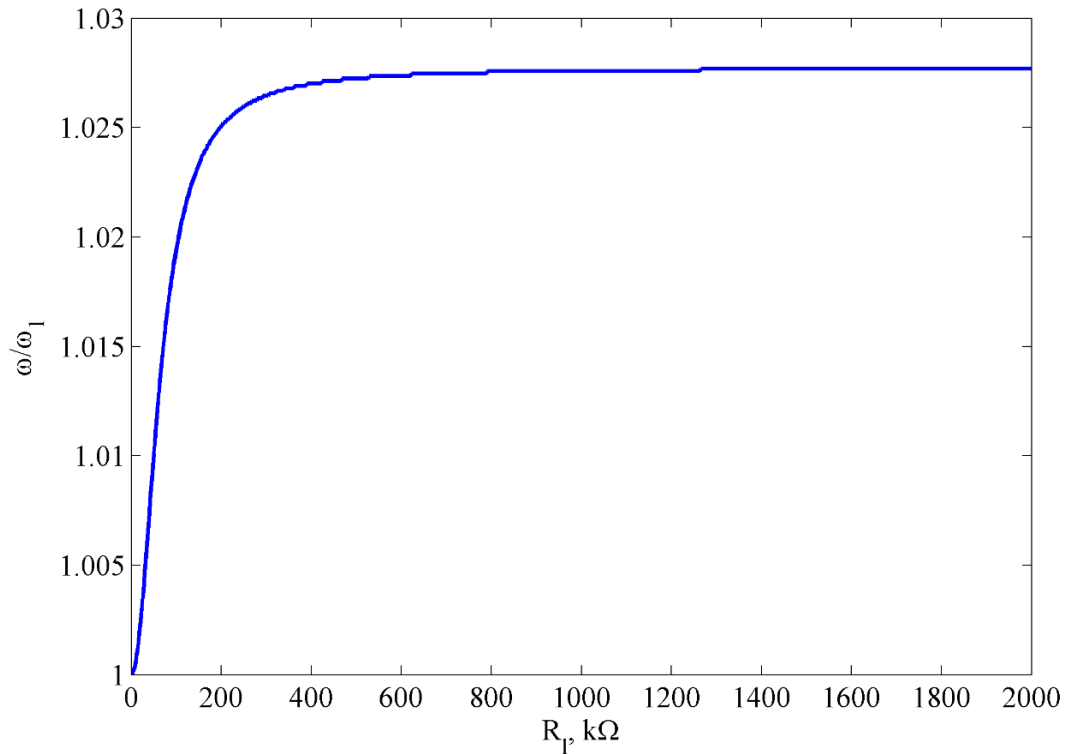
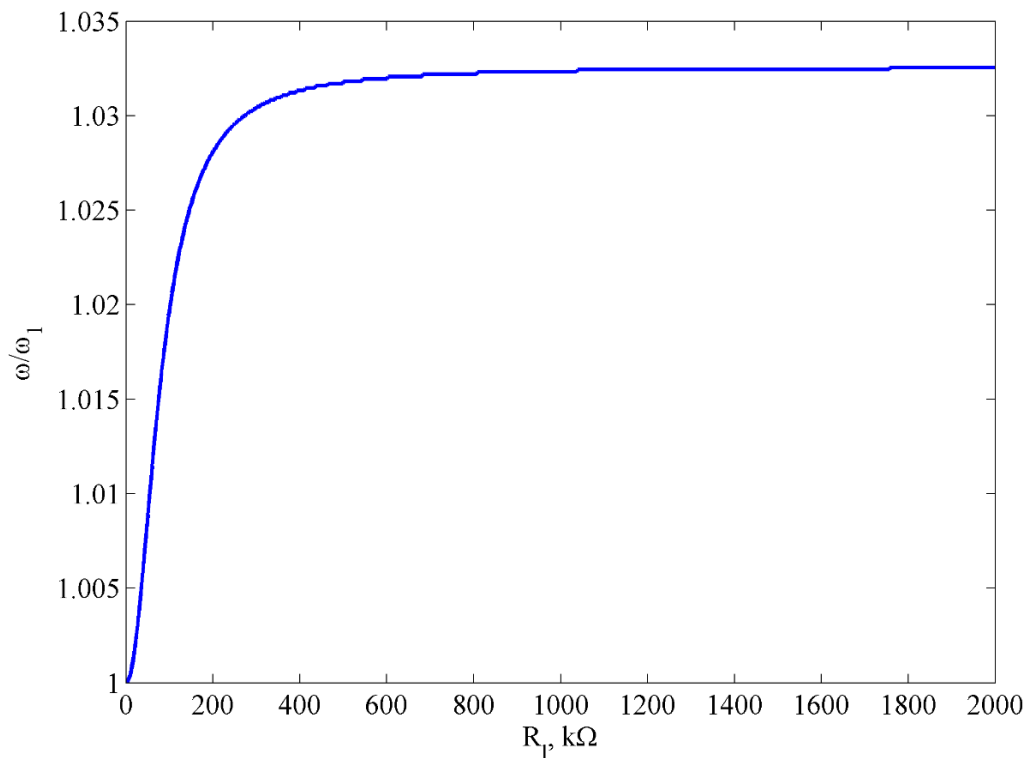
Slika 46. Trend maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ za konzolu s utegom



Slika 47. Trend maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 10Ω do $2 \text{ M}\Omega$ u odnosu na rezonantnu frekvenciju konzole s utegom

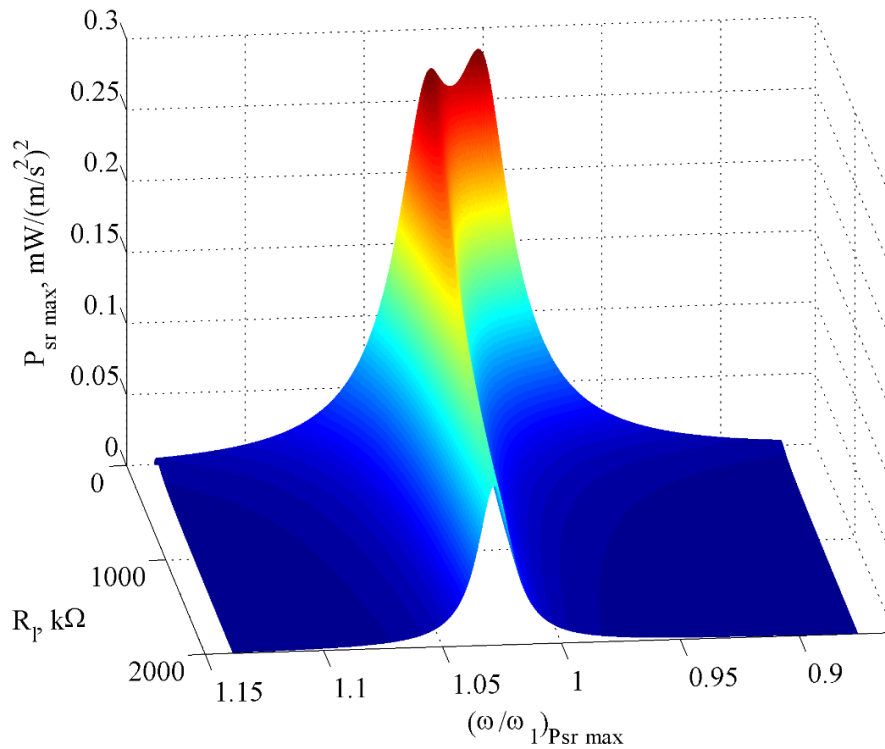
Svakako jedan od najzanimljivijih učinaka promatran s mehaničkog aspekta, a koji se jednostavno može simulirati usvojenim modelom, je ukrućenje konzole s porastom električnog otpora (engl. *hardening behaviour*). Tako, Slika 48 prikazuje vidljivo povećanje vlastite frekvencije s porastom vrijednosti otpora radnog trošila (što odgovara povećanju krutosti konzole izazvanom upravo povratnom elektromehaničkom spregom). Isto je, naravno, vidljivo i za konzolu s utegom (Slika 49). Promjena frekvencije je, pritom, značajnija do vrijednosti otpora od otprilike $250 \text{ k}\Omega$ ($320 \text{ k}\Omega$), nakon čega se promjena usporava i asimptotski približava frekvenciji $2,8\%$ ($3,3\%$) većoj od iznosa ω_1 (vlastita frekvencija mehaničkog odziva) pri vrijednosti otpora od $2 \text{ M}\Omega$.

Iz dosad prikazanih rezultata simulacije ponašanja piezoelektričnog konzolnog uređaja za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša u programskom paketu MATLAB, moguće je zaključiti da su bimorfni piezoelektrični pretvarači energije vibracija kompleksni elektromehanički sustavi čiji odziv uključuje kompleksne pojave kao što je povratno elektromehaničko sprezanje koje značajno utječe na dinamiku konzole, ali i ukrućenje konstrukcije pri povećanju iznosa električnog otpora R_1 .

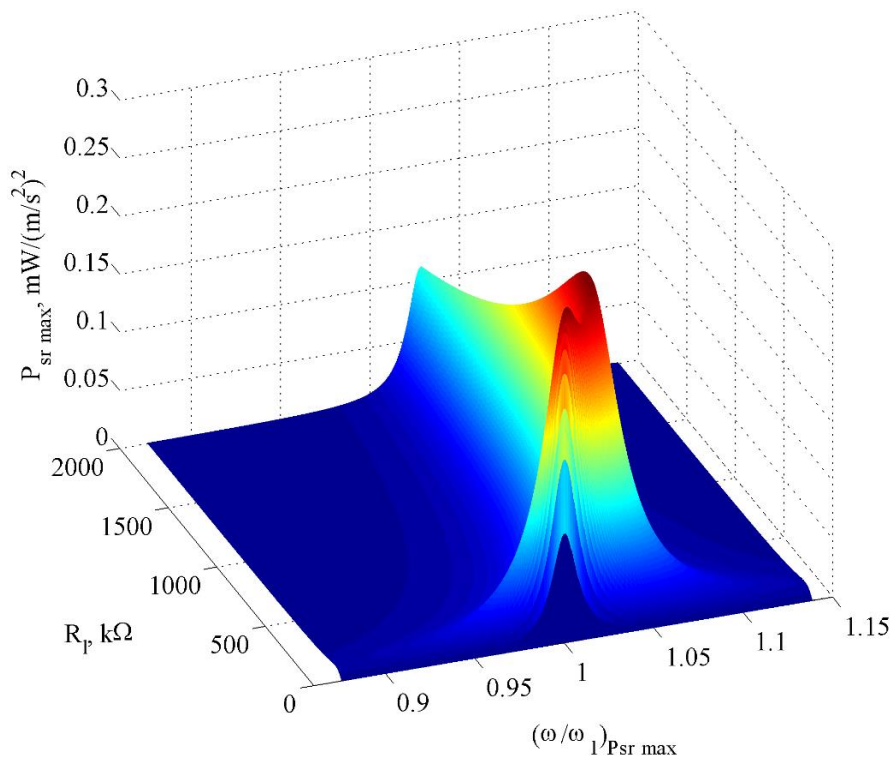
Slika 48. Porast krutosti konzole bez utega pri porastu električnog otpora R_1 Slika 49 Porast krutosti konzole s utegom pri porastu električnog otpora R_1

Radi bolje predodžbe međuovisnosti iznosa otpora radnog trošila, uzbudne frekvencije i rezultirajućeg iznosa snage, moguće se poslužiti 3D prikazom ovih veličina. Na sljedećim slikama, koje predstavljaju plohu temeljenu na rezultatima prethodnih grafikona (Slika 42 i

Slika 43), može se lako uočiti kako se rezonantna frekvencija mijenja s povećanjem otpora (praćenjem hrpta plohe, odnosno točaka s najvećim iznosima snage). Upravo su najviše točke na 3D dijagramima predstavljene kao projekcija odnosa maksimalne prosječne snage i otpora radnog trošila sa Slike 46.



Slika 50. 3D prikaz međuovisnosti otpora, uzbudne frekvencije i snage



Slika 51. 3D prikaz međuovisnosti otpora, uzbudne frekvencije i snage, drugi kut gledanja

U ovom su poglavlju, dakle, opisani analitički postupci potrebni za opisivanje ponašanja piezoelektričnih bimorfni konzola čija je namjena pretvaranje kinetičke energije vibracija iz okoline u električnu energiju. U prvom dijelu poglavlja izložen je postupak analize vlastitih vrijednosti sustava uklještene grede s utegom na slobodnom kraju, dok je u drugom dijelu predstavljen spregnuti modalni model piezoelektričnog bimorfa s distribuiranim parametrima kojim je opisana elektromehanička sprega tj. međuovisnost električne domene s mehaničkom domenom. Konačno, ovaj model je i implementiran u programskom paketu MATLAB, te su izvršene simulacije s teorijskom konzolom i to s utegom, ali i bez utega.

Razvijeni model potvrdilo je empirijski više autora [Erturk i Inman 2009., Benasciutti et al., 2010]. Njegovu pouzdanost u nastavku će se utvrditi metodom konačnih elemenata (MKE), te eksperimentalno ispitanim ponašanjem piezoelektričnih bimorfa različitih dimenzija i iznosa utega na slobodnom kraju.

4. Modeliranje piezoelektrične bimorfne konzole metodom konačnih elemenata

Jedan je od mogućih načina simuliranja naponskog odziva različitih oblika bimorfni piezoelektričnih konzola za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša, te proučavanja raspodjele naprezanja i naboja na površini piezoelektrika, uporaba je metode konačnih elemenata (MKE). Dosad je dokazano kako je neke od korisnih oblika konzola, npr. trapez, nemoguće matematički riješiti u obliku gotovog analitičkog rješenja [Zhou i Cheung, 2000.] pa se kao jedina mogućnost nameću numeričke metode kao što je MKE. Na temelju pregleda radova iznesenog u poglavlju 2.7.2 a posebice zaključaka izvedenih u [Yang i Tang, 2009.] u vezi modeliranja piezoelektričnog unimorfa⁴⁴, ovdje se predlaže korištenje programskog paketa ANSYS kao dokazano pouzdanog rješavača piezoelektričnih problema, ali u domeni indirektnog piezoelektričnog efekta.

Metoda konačnih elemenata nezaobilazna je u inženjerskim proračunima i danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na toj metodi. Klasične metode rješavanja problema kontinuiranih sustava temelje se na rješavanju diferencijalnih jednadžbi čije je točno analitičko rješenje moguće dobiti samo za jednostavnije modele. U općem slučaju vrlo je teško dobiti rješenje koje zadovoljava diferencijalnu jednadžbu u cijelom području razmatranog modela. Stoga se rabe približne numeričke metode koje se temelje na diskretizaciji kontinuiranog sustava gdje se diferencijalne jednadžbe zamjenjuju sustavom algebarskih jednadžbi.

Prof. dr. sc. Sorić u svom udžbeniku 'Metoda konačnih elemenata' navodi sljedeće [Sorić, 2004.]: „MKE je numerička metoda koja se temelji na fizikalnoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što su primjerice polje pomaka, deformacija, naprezanja, temperatura te ostale

⁴⁴Unimorf je struktura sastavljena od jednog piezoelektričnog sloja i supstrata, za razliku od ovdje razmatranog bimorfa.

veliĉine u problemu polja, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konaĉnih elemenata, približavanje toĉnome rješenju raste s povećavanjem broja elemenata. Prilikom izvođenja algebarskih jednadžbi, polazi se od diferencijalnih jednadžbi koje opisuju stanje u elementu ili se rabi varijacijska formulacija.⁴⁵ Nakon izvođenja jednadžbi za konaĉni element gdje su nepoznanice neovisne varijable u ĉvorovima, odgovarajućim postupcima izvode se globalne jednadžbe za diskretizirani model. Pomoću izraĉunatih ĉvornih veliĉina moguće je, primjenom poznatih teorijskih relacija, odrediti sve veliĉine potrebne za analizu opisanoga kontinuiranog sustava. Složene konstrukcije zahtijevaju diskretizaciju s velikim brojem elemenata te valja riješiti sustav algebarskih jednadžbi s velikim brojem nepoznanica, što je bez korištenja računala vrlo teško postići. Na taj naĉin, za rješavanje problema primjenom MKE nužna je primjena računala, a to zahtijeva izradu odgovarajućih računalnih programa. Metoda konaĉnih elemenata primjenjuje se u mehanici deformabilnih tijela za rješavanje statičkih i dinamiĉkih problema, ali jednako tako i za rješavanje općih problema polja kao što su proraĉuni temperaturnih polja, proraĉuni strujanja te analiza elektromagnetskih polja. Izvođenje sustava algebarskih jednadžbi analogno je za sva spomenuta područja“.

ANSYS je komercijalni MKE simulacijski paket koji se koristi od 70-ih godina prošlog stoljeća te je, uz brojne nadgradnje, danas uz COMSOL i NASTRAN jedan od najjaĉih alata za numeričke simulacije fizikalnih pojava. Treba imati na umu da su rješenja dobivena MKE približna, a realnim vrijednostima mogu se znatnije približiti samo uz pravilan izbor proraĉunskog modela i uz pravilno odabrane konaĉne elemente koji mogu opisati stvarni fizikalni proces. Da bi to bilo moguće, potrebno je razumjeti fizikalno ponašanje analizirane konstrukcije te poznavati teorijske osnove MKE, a na taj naĉin i ograniĉenja njihove primjene. Osim toga, potrebno je i kritiĉki analizirati dobivene rezultate.

U ovom su poglavlju predstavljene osnove modeliranja piezoelektriĉne bimorfne konzole za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša korištenjem MKE. Na samom početku poglavlja opisani su dostupni konaĉni elementi s mogućnošću simuliranja piezoelektriĉnog efekta unutar ANSYS paketa za simuliranje, kao i odabir konaĉnih elemenata za sloj supstrata i otpora radnog trošila. Konstrukcija piezoelektriĉne konzole odgovara konzoli predstavljenoj

⁴⁵Varijacijska formulacija se koristi kada nisu poznate diferencijalne jednadžbe kojima su povezani konaĉni elementi. Podrazumijeva pronalaženje nepoznate jednadžbe na temelju graniĉnih uvjeta i opterećenja nametnutog sustavu.

u potpoglavlju 3.3.1, te je opisana i metodologija definiranja geometrije konzole kao i definiranja električnih spojeva unutar ANSYS-a. Na kraju poglavlja objašnjeni su postupci analize vlastitih vrijednosti, harmonijske analize kao i nelinearne tranzijentne analize na razvijenom modelu s pridruženim radnim trošilom u obliku jednostavnog otpornog elementa. Dobiveni rezultati simulacija, uspoređeni s rezultatima iz gore opisanoga spregnutoga elektromehaničkog modela, uzimaju u obzir osjetljivost gustoće mreže i tip elemenata na iznose dobivenih vrijednosti.

4.1 Analiza i odabir tipa konačnih elemenata

Prije modeliranja konzole za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša korištenjem piezoelektričnog učinka, potrebno je izvršiti analizu dostupnih konačnih elemenata za modeliranje piezoelektričnih slojeva, slojeva supstrata, utega i elementa električnog otpora. U ANSYS bazi podataka postoji preko 200 različitih tipova konačnih elemenata čija su obilježja: broj čvorova, stupnjevi slobode gibanja, realne konstantama i svojstva materijala.

Čvorovi elemenata označavaju se slovima I, J, K itd., a povezani su u element redom i orijentacijom koja je prikazana za svaki pojedini element u ANSYS dokumentaciji (primjeri: Slika 52 i Slika 53; čvor I je općenito prvi čvor za svaki element). Veze čvorova mogu biti definirane automatski ili ih korisnik može sam definirati. Redoslijed čvorova za neke elemente definira i orijentaciju elementa u koordinatnom sustavu. Svaki element posjeduje određeni skup stupnjeva slobode koji ujedno znači i koliko će nepoznanica biti definirano analizom. U tom skupu mogu biti uključeni pomaci, rotacije, temperature, tlakovi, napon itd. Dobiveni rezultati su veličine naprezanja, protok topline, pomaci itd. Korisnik ne definira stupnjeve slobode samostalno, već su oni vezani uz određeni tip elementa. Samim time odabir elementa je vrlo bitna početna točka pri korištenju metode konačnih elemenata. [Ansys Inc.¹, 2010.]

Za svaki pojedini element potrebno je unijeti podatke o svojstvima pripadajućeg materijala. Tipični ulazni podaci za ovaj skup podataka su Youngov modul elastičnosti, gustoća, koeficijent temperaturnog širenja, provodljivost itd. Svako od ovih svojstava definirano je varijablama unutar ANSYS-a pa tako, primjerice, EX, EY i EZ predstavljaju komponente Youngovog modula elastičnosti dok varijabla DENS predstavlja gustoću materijala. Svi ovi podaci mogu se unositi i u ovisnosti o temperaturi. Podaci koji su potrebni za izračune, a ne mogu se utvrditi iz čvorova ili svojstava materijala, unose se kao konstante i služe za definiranje veličina kao što su duljine, promjeri, debljine itd. [Ansys Inc.¹, 2010.]

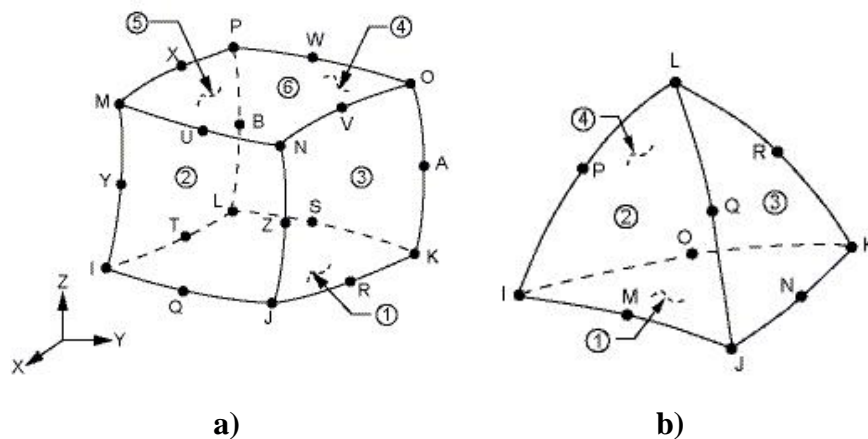
Pri odabiru elemenata, u konkretnom slučaju, piezoelektrične konzole, naglasak je na elementima s piezoelektričnim mogućnostima, dok će elementi supstrata biti prilagođeni odabranom tipu piezoelektričnog elementa (oblik elementa, broj čvorova...).

4.1.1 Strukturni konačni elementi s piezoelektričnim mogućnostima

Nakon analize ANSYS dokumentacije o mogućnostima spregnute elektromehaničke analize s piezoelektričnim elementima, može se zaključiti kako postoji šest tipova konačnih elemenata koji imaju mogućnost piezoelektričnog spreznjanja, a to su redom:

- **PLANE223:** 2D element s 8 čvorova i 4 stupnja slobode po čvoru,
- **SOLID226:** prizmatični 3D element s 20 čvorova i 5 stupnjeva slobode po čvoru (Slika 52, a),
- **SOLID227:** tetraedarski 3D element s 10 čvorova i 5 stupnjeva slobode po čvoru, preporučljiv za nepravilne mreže (Slika 52, b).

Osim ovih elemenata postoje i tri zastarjela tipa elementa (engl. *legacy element*) koji čine osnovicu navedenih elemenata, a čije se korištenje u ANSYS-u više ne preporučuje (elementi PLANE13, SOLID5 i SOLID98).



Slika 52. a) Prizmatični SOLID226 i b) tetraedarski SOLID227 3D konačni elementi [Ansys Inc.², 1994.]

Kako jedino 3D elementi omogućuju definiranje bimorfne strukture i simuliranje svih traženih efekata piezoelektričnih slojeva bimorfne konzole za pretvorbzu kinetičke energije vibracija, odabrani su elementi SOLID226 i SOLID227 (Slika 52) u koje su ugrađene sljedeće mogućnosti definiranja svojstava materijala:

- strukturne-toplinske,
- piezootporne,
- elektroelastične,
- piezoelektrične,
- termoelektrične,
- strukturno-termoelektrične, te
- toplinsko-piezoelektrične.

Prizmatični element SOLID226 ima dvadeset čvorova s do pet stupnjeva slobode gibanja po čvoru. U strukturne mogućnosti uključena je elastičnost, plastičnost, viskoelastičnost, viskoplastičnost, puzanje, velika naprezanja, velike deformacije,⁴⁶ učinci strukturnog ukrućivanja te mogućnosti prednaprezanja. Tetraedarski element SOLID227 ima deset čvorova s do pet stupnjeva slobode gibanja po čvoru te iste strukturne i termoelektrične mogućnosti kao i prizmatični element SOLID226 [Ansys Inc.¹, 2010.].

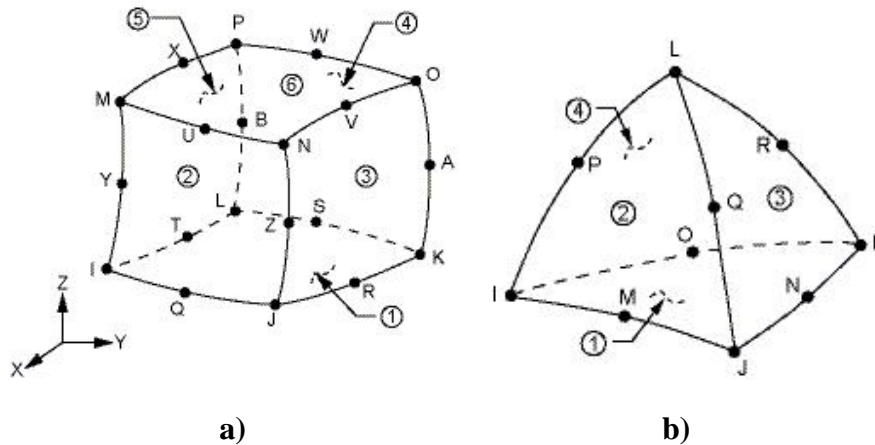
4.1.2 Strukturni konačni elementi za modeliranje supstrata i utega

Nakon odabranog tipa elementa za piezoelektrične slojeve, potrebno je odabrati i jednostavniji tip strukturnog elementa koji će se koristiti za sloj supstrata i uteg, a da ujedno bude sličan/kompatibilan elementu SOLID226 u slučaju prizmatične mreže, ali i elementu SOLID227 u slučaju tetraedarske mreže. Moguće je koristiti 'jednostavnije' elemente jer nisu potrebni dodatni stupnjevi slobode gibanja kao što je to slučaj kod piezoelektričnih materijala. Osnovni kriterij odabira elementa je jednak broj čvorova kao i za prije odabrani element, dakle dvadeset čvorova u slučaju prizmatičnog elementa odnosno deset čvorova u slučaju tetraedarskog elementa. Prema ANSYS dokumentaciji postoje dva kompatibilna tipa elementa:

- **SOLID186**: prizmatični 3D element s 20 čvorova i 3 stupnja slobode po čvoru (Slika 53, a)
- **SOLID187**: tetraedarski 3D element s 10 čvorova i 3 stupnja slobode po čvoru (Slika 53, b).

⁴⁶ Ovo svojstvo odabranih elemenata biti će objašnjeno i korišteno u potpoglavlju 4.5.

Osim ovih elemenata postoji dodatni zastarjeli tip elementa (engl. *legacy element*) koji čini osnovicu gorenavedenog elementa SOLID186, a čije se korištenje u ANSYS-u više ne preporučuje (element SOLID95).

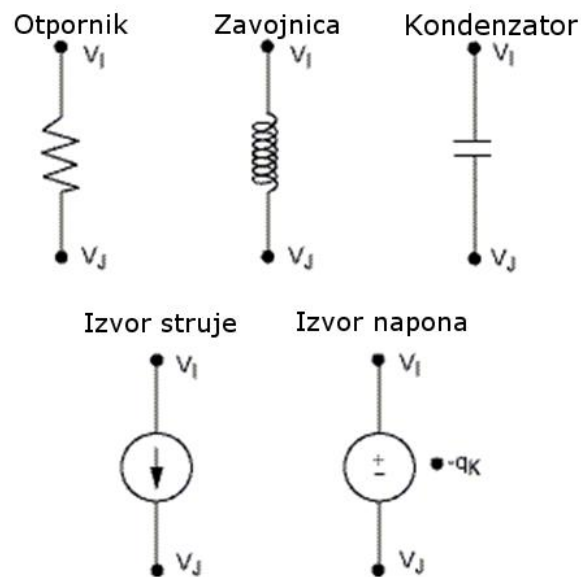


Slika 53. a) Prizmatični SOLID186 i b) tetraedarski SOLID187 3D konačni elementi [Ansys Inc.², 1994.]

U prethodnom poglavlju odabrani su 3D elementi, pa se tako i za sloj supstrata i utega odabiru 3D elementi SOLID186 i SOLID 187. SOLID186 je čvrsti strukturni prizmatični 3D element višeg reda koji će se koristiti u kombinaciji sa SOLID226 3D elementom korištenim za piezoelektrične slojeve. Element je definiran pomoću dvadeset čvorova od kojih svaki ima po tri stupnja slobode gibanja: translaciju u x , y i z smjeru. Element podržava plastičnost, hiperelastičnost, puzanje, ukrućivanje te velike deformacije. Dostupna su dva oblika: kao homogeni i kao slojeviti strukturni element. U predmetnom slučaju koristi se homogena verzija. SOLID187 ima deset čvorova s do tri stupnja slobode gibanja po čvoru te iste strukturne i termoelektrične mogućnosti kao i SOLID186 element, a bit će korišten u kombinaciji sa SOLID227 elementima u slučaju nepravilne tetraedarske mreže. [Ansys Inc.¹, 2010.]

4.1.3 Konačni elementi za modeliranje električnog otpora

Za električni otpor postoji samo jedna mogućnost odabira elementa i to je konačni element električnog kruga CIRCU94 poglavito korišten u spregnutoj elektromehaničkoj analizi (Slika 54). Ovisno o odabranoj opciji koristi se kao: otpornik, zavojnica, kondenzator, izvor napona ili izvor električne struje. Ovaj element ima dva ili tri čvora kojima se definira komponenta električnog kruga te jedan ili dva stupnja slobode za modeliranje odziva kruga. Pogodan je za harmonijske i tranzijentne analize [Ansys Inc.¹, 2010.].

Slika 54. CIRC94 Konačni element [Ansys Inc.², 1994.]

Na taj su način definirani svi konačni elementi sustava potrebni za MKE analizu pretvorbe kinetičke energije vibracija u električnu energiju.

4.2 Modeliranje bimorfne piezoelektrične konzole

Modeliranje konstrukcija u ANSYS programskom okruženju moguće je izvesti na više načina: korištenjem ANSYS Workbench modula za 3D modeliranje, direktnim kodiranjem jednostavnijih konstrukcija putem parametarskog sučelja za skriptiranje (pisanje algoritama) tzv. APDL (engl. *Ansys parametric design language*) ili unosom gotovih 3D modela iz drugih alata za modeliranje, kao što su CATIA, CREO itd. Kako su konzolni uređaji za pretvorbu energije vibracija u električnu energiju relativno jednostavne konstrukcije koje su načelno sastavljene od uklještenja, bimorfne konzole i utega, moguće ih je izvesti direktnim kodiranjem putem APDL-a te je taj pristup usvojen i u ovom radu, a korištene skripte su u cijelosti dokumentirane u Prilogu.

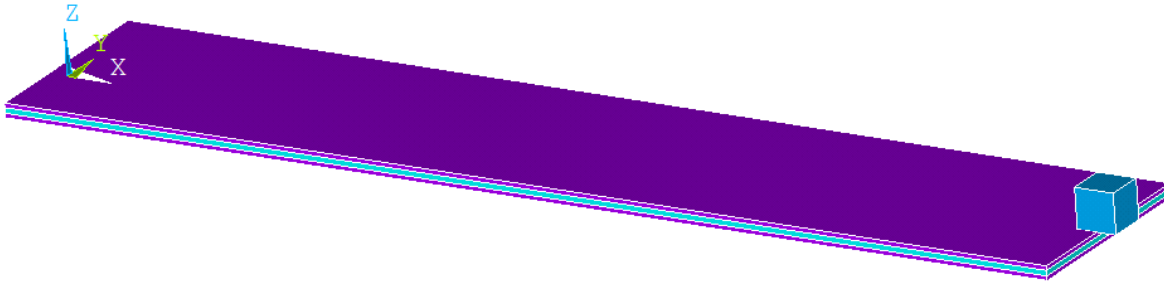
U ovom dijelu rada posebice je opisano definiranje početnih postavki sustava, modeliranje bimorfni piezoelektričnih konzola pomoću APDL programskog jezika, uspostavljanje elektromehaničke sprege povezivanjem elektroda i otpornika te umrežavanje konačnih elemenata u prizmatičnu i nepravilnu tetraedarsku mrežu s posebnim osvrtom na različite gustoće mreže.

4.2.1 Početne postavke sustava

Na samom početku modeliranja promatranog sustava za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoline, u ANSYS-u je potrebno definirati geometrijske konstante sustava kao što su duljina, širina i visina konzole i utega (Slika 31). Ove su veličine preuzete iz poglavlja 3.2.1 (Tablica 6), a stranica a utega u obliku kocke proračunata je iz odnosa gustoće materijala utega ρ_{M_t} i mase utega M_t . Nakon definiranja geometrijskih konstanti potrebno je definirati i tipove elemenata (prizmatični ili tetraedarski te element električnog otpora) i dodijeliti im svojstva materijala koja su također preuzeta iz poglavlja 3.2.1 i prikazana u Tablici 7. Jedini podatak kojeg je potrebno tablično unijeti u ANSYS je piezoelektrična konstanta \bar{e}_{31} . Kako su obje simulirane konzole jednakih dimenzija i razlikuju se samo u iznosima mase vršnog utega, tj. jedna konzola je bez utega dok je na drugu postavljen uteg mase 1g, na slikama će biti prikazana samo konzola s utegom, dok će u tablicama s rezultatima biti navedene obje.

4.2.2 Modeliranje konzole

Prije modeliranja strukture konzole potrebno je definirati dva čvora koji će se nalaziti izvan dosega konzole, a koji služe za povezivanje elementa električnog otpora CIRC94 pomoću naredbe N. Zatim slijedi modeliranje piezoelektričnih i supstratnih slojeva konzole te, u slučaju konzole s utegom, i vršne mase korištenjem BLOCK naredbe za definiranje jednostavnih prizmatičnih tijela. Kao ulaz naredbi BLOCK potrebno je unijeti koordinate tijela u smjeru osi X (os duljine konzole), Y (os širine konzole) i Z (os debljine konzole), a rezultat će biti tri ili četiri još uvijek odvojena volumena (dva sloja piezoelektrika, jedan sloj supstrata te uteg) definirana s osam točaka, dvanaest linija i šest površina (Slika 55). Nakon definiranja volumena, potrebno im je dodijeliti otprije poznata svojstva materijala korištenjem naredbe VATT (engl. *volume attribute*). Treba naglasiti da uteg postavljen na kraju konzole nije oslonjen cijelom donjom plohom na konzolu već je oslonjen samo polovicom donjeg brida. Takav pristup je potreban kako bi težište utega bilo na samom rubu konzole kako je to i u matematičkom modelu.



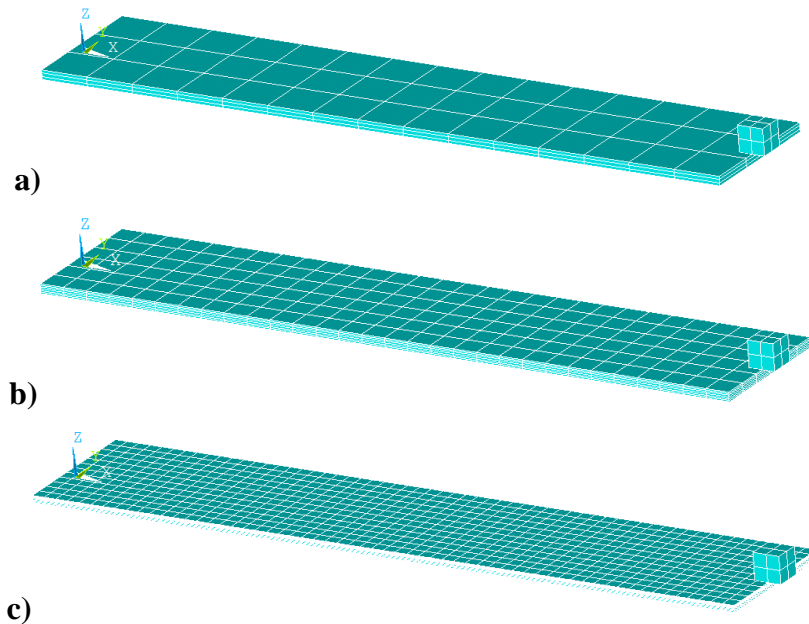
Slika 55. Definirani i međusobno još uvijek odvojeni volumeni budućeg čvrstog tijela. Prikazan je model piezoelektrične konzole s utegom od volframa mase 1g i koordinatne osi: X – uzdužni smjer konzole, Y – poprečni smjer i Z – smjer po debljini konzole

4.2.3 Umrežavanje elemenata

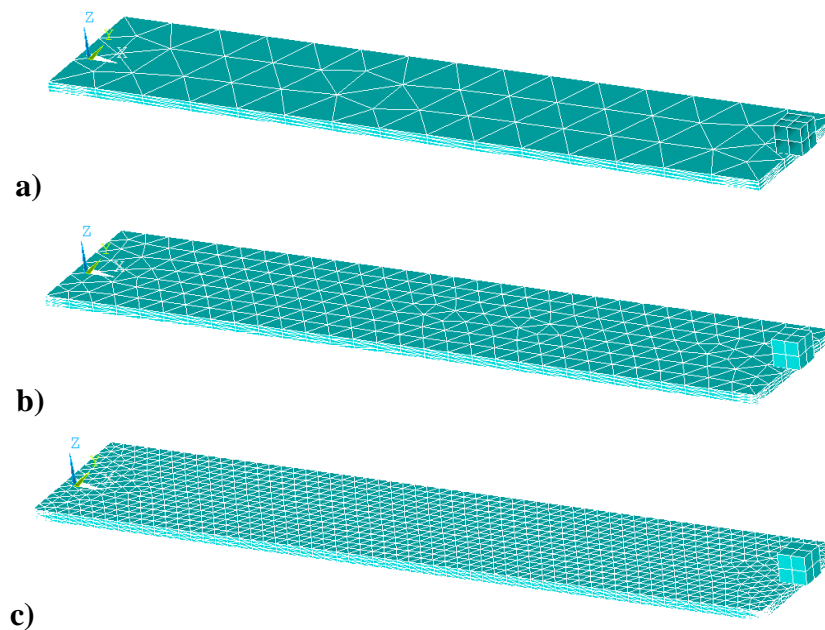
Nakon opisa volumena konzole, potrebno je umrežiti strukturu. Jedna je mogućnost dopustiti dopustiti ANSYS-u da automatski „odluči“ koji će algoritam umrežavanja koristiti, ali isto tako i da automatski odredi gustoću mreže. S druge strane, kada se planira istraživanje osjetljivosti rezultata u ovisnosti o gustoći mreže, korisnik može sam unaprijed odrediti gustoću, odnosno veličinu elemenata. Gustoća mreže se određuje dijeljenjem linija kojima su definirani volumeni na točno određen broj podjela naredbom LESIZE (engl. *line element size*). Konačno umrežavanje izvodi se naredbom VSWEPT (za prizmatične elemente) odnosno VMESH (za tetraedarske elemente). Naredba VSWEPT podržava samo jednostavne oblike, stoga je potrebno koristiti VMESH za umrežavanje nepravilne tetraedarske mreže. U ovoj fazi svi definirani volumeni još uvijek djeluju kao zasebna tijela pa ih je potrebno sjediniti u zajedničkim čvorovima na granicama dodira i to korištenjem naredbe NUMMRG. Rad s prizmatičnim elementima je jednostavniji, osobito u slučaju sjedinjavanja ploha. Međutim, kod tetraedarskih elemenata mogu se javiti greške pri umrežavanju ili sjedinjavanju, jer poneki element ne zadovoljava zahtjeve ANSYS procesora zbog nepovoljne orijentacije elementa ili kuta koji zatvara tetraedar. U slučaju da se pojave navedene pogreške potrebno je dodatno popraviti/rafinirati mrežu komandom VIMP.

Kako bi se mogla uočiti osjetljivost dobivenog rezultata u ovisnosti od gustoće mreže, za analize u ovome radu korištena su tri tipa gustoće mreže. Koristile su se tako gustoće mreže označene s G_1 (Slika 56 i Slika 57, a), G_2 (Slika 56 i Slika 57, b) i G_3 (Slika 56 i Slika 57, c). Indeksi pritom simboliziraju multiplikator gustoće, gdje je '1' početna mreža, '2' je dvaput gušća dok je '3' triput gušća mreža od G_1 . Gustoća mreže G_1 određena je podjelama linija po bridovima

piezoelektrične konzole i to: petnaest podjela po duljini konzole (L), tri podjele po širini (b) i jedna podjela po debljini svakog piezoelektričnog sloja (h_p), odnosno jedna podjela po debljini supstrata (h_s).



Slika 56. Prikaz modela piezoelektrične bimorfne konzole i tri različite gustoće mreže sastavljene od prizmatičnih elemenata: a) G_1 , b) G_2 i c) G_3

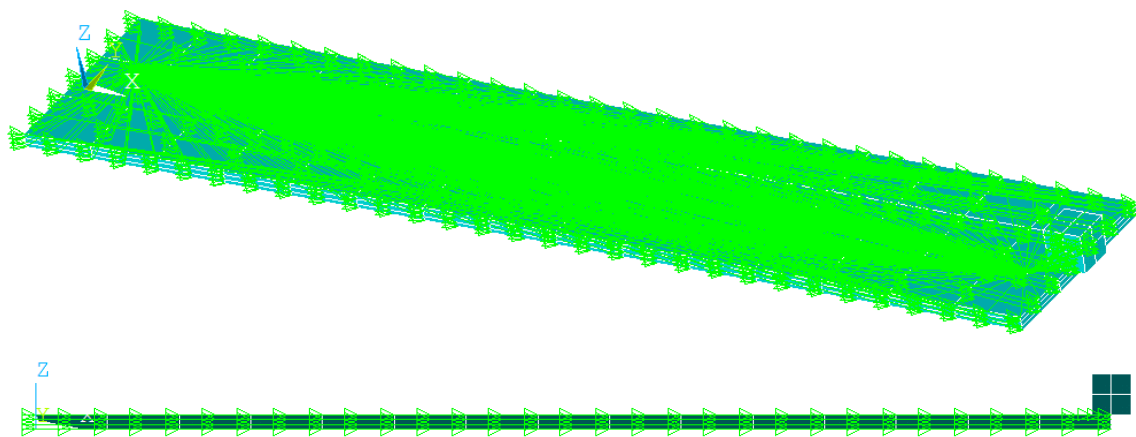


Slika 57. Prikaz modela piezoelektrične bimorfne konzole i tri različite gustoće mreže sastavljene od tetraedarskih elemenata: a) G_1 , b) G_2 i c) G_3

4.2.4 Uspostavljanje elektromehaničke sprege

Prije analize vlastitih vrijednosti sustava i harmonijskog odziva potrebno je još definirati elektrode na vanjskim i unutarnjim plohama piezoelektričnih slojeva (na granici sa supstratom) tj. spregnuti sve čvorove na tim plohama. Prema pretpostavkama Erturkovog matematičkog modela iz potpoglavlja 3.2, dvije elektrode prekrivaju plohe svakog piezoelektričnog sloja, što u slučaju bimorfa rezultira s ukupno četiri elektrode.

Sprezanje se izvodi na način da se na svim slojevima koje je potrebno spregnuti (slojevi prekriveni elektrodama, tj. elementima s električnim stupnjevima slobode), povežu svi čvorovi preko jednog glavnog čvora (Slika 58). Prvo se pomoću naredbe *GET pronade čvor s najmanjim identifikacijskim brojem čvora, te se zatim svi električni stupnjevi slobode (u ANSYS-u označeni oznakom VOLT) pomoću naredbe CP povežu u jedan skup preko navedenog čvora s najmanjim identifikacijskim brojem. Ovaj postupak se provodi za sva četiri sloja na kojima se definiraju elektrode. Time se simulira pretpostavka da su elektrode savršeno provodljive, bez električnih gubitaka, odnosno da postoji identični električni potencijal duž svake pojedine elektrode. U ovoj fazi elektrode su još uvijek odvojene tj. nisu spojene na otpornik pa svaka djeluje (generira električni potencijal proizveden u piezoelektriku) odvojeno od drugih elektroda.



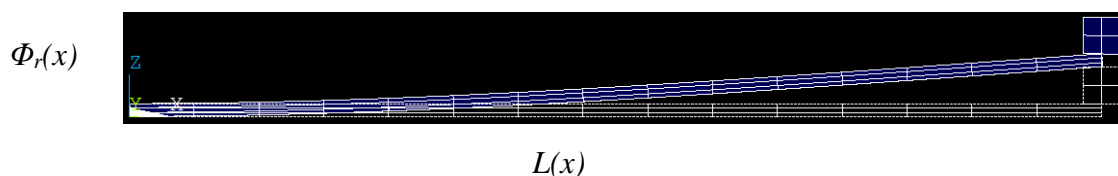
Slika 58. Prikaz međusobno povezanih čvorova elektroda na stranicama piezoelektričnih slojeva

4.3 Analiza vlastitih vrijednosti

Kako bi se provjerilo je li model bimorfne strukture dobro izveden, odnosno je li mehanička sprega među slojevima različitih materijala prisutnih u piezoelektričnom bimorfu u podudarnosti s teorijskim pretpostavkama, potrebno je provesti analizu vlastitih vrijednosti opisanu u potpoglavlju 3.1. Time je omogućeno potvrđivanje vlastitih vrijednosti sustava i uvid u mehanički odziv konstrukcije, a isto tako i predviđanje temeljnih frekvencija za kompliciranije oblike konzola koje bi se analizirale u budućnosti.

Kao što je već navedeno u 3. poglavlju, od posebnog interesa je prvi oblik savojnih vibracija konzole. Kako analiza ne bi bila pod utjecajem piezoelektričnog efekta, u ovoj je fazi potrebno odstraniti konstantu piezoelektričnosti \bar{e}_{31} iz svojstava materijala piezoelektričnih slojeva.

U ANSYS programskom paketu, analiza vlastitih vrijednosti izvodi se pomoću modula modalne analize u 'Solution' procesoru tj. rješavaču. Nakon pokretanja analize s naredbom ANTYPE, MODAL potrebno je definirati postavke naredbom MODOPT. U ovom slučaju bitan je odabir tipa rješavača koji će se koristiti za matično rješenje problema vlastitih vrijednosti, broj oblika savijanja koje je potrebno riješiti te frekvencijski raspon unutar kojeg će se analiza izvršavati. Prema preporukama ANSYS dokumentacije odabran je direktni rješavač prorijeđenih matrica⁴⁷ (engl. *sparse direct solver*) kao najrobusniji rješavač (i memorijski najzahtjevniji), a temelji se na direktnoj eliminaciji jednadžbi. Postoje i iterativni rješavači s kojima se rješenje dobiva putem iterativnog procesa tako da se početno pretpostavljeno rješenje sukcesivno približava točnom rješenju unutar unaprijed određene dozvoljene pogreške. Kako je pomoću matematičkog modela prethodno određena teorijska vlastita frekvencija pri prvom modu za bimorfnu konzolu s utegom i bez utega, i ovdje će se definirati raspon unutar kojeg se nalazi tražena vlastita frekvencija. Uspostavljanje graničnih uvjeta, u ovom slučaju definicija uklještenja konzole, izvodi se naredbom D pomoću koje se svim čvorovima na uklještenom kraju onemogućava gibanje u x , y i z smjeru.



Slika 59. Grafički prikaz 1. oblika savijanja dobivenog modalnom analizom

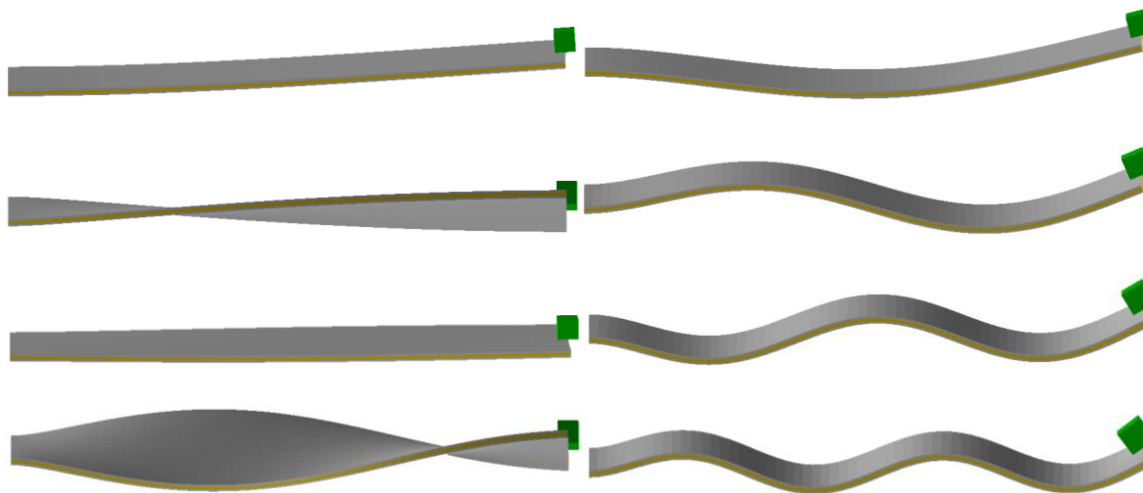
⁴⁷ Prorijeđene matrice (engl. *sparse matrix*) su većinom sastavljene od 0 i koriste se za matično rješavanje sustava parcijalnih diferencijalnih jednadžbi.

Tablica 8. Usporedba vlastite frekvencije konzole: MKE vs. analitički model

| | Vlastita frekvencija, Hz | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Bez utega | | | S utegom | | |
| Matematički model | 62,5 | | | 57,1 | | |
| MKE | Mreža G_1 | Mreža G_2 | Mreža G_3 | Mreža G_1 | Mreža G_2 | Mreža G_3 |
| Prizmatični elementi | 62,5 | 62,49 | 62,49 | 57,18 | 57,18 | 57,17 |
| Greška MKE/model | 0 % | 0,016 % | 0,016 % | 0,14 % | 0,14 % | 0,12 % |
| Tetraedarski elementi | 62,16 | 62,98 | 62,57 | 56,916 | 57,64 | 57,25 |
| Greška MKE/model | 0,54 % | 0,7 % | 0,11 % | 0,32 % | 0,94 % | 0,26 % |

Pri iznošenju rezultata analize naglasak je stavljen na prvi oblik vibriranja (Slika 59) budući da je taj oblik ujedno i najbitniji pri pretvaranju energije vibracija u električnu energiju. Istovremeno je analizirana i osjetljivost gustoće mreže konačnih elemenata u odnosu na konačni rezultat. Iz prikazanih rezultata (Tablica 8) vidljivo je kako je analiza vlastitih vrijednosti s prizmatičnim elementima manje osjetljiva na broj korištenih elemenata od analize s tetraedarskim elementima, dok vrijeme izvršavanja proračuna raste s gustoćom mreže, a sama je greška u svim slučajevima daleko ispod 1% čime je potvrđena nespregnuta rezonantna frekvencija kod obiju konzola. Kod analize pomoću tetraedarskih elemenata, G_1 mreža rezultira najvećim odstupanjima, a tek je s G_3 mrežom moguće dobiti rezultat koji se može usporediti s MKE rezultatima dobivenim pomoću jednostavne prizmatične mreže. Greška je također većinom manja od 1% odnosu na analitički model. Uzimajući u obzir utrošeno vrijeme za provođenje analize, kao i podudarnost rezultata, došlo se do zaključka da kod ovdje razmatranih sustava općenito nije poželjno imati pregustu mrežu.

ANSYS za razliku od analitičkog modela, omogućava predviđanje i drugih vlastitih oblika osim savojnih. Slika 60 prikazuje 3D rezultate elastično deformiranih konzola za prvih osam vlastitih oblika vibriranja. Međutim samo su savojni usporedivi s temeljnim oblicima iz poglavlja 3.3.4 (Slika 34 i Slika 35).



Slika 60. Prvih osam vlastitih oblika vibracija konzole s utegom, na vrhu lijevo je prvi savojni oblik

4.4 Spregnuta harmonijska analiza

Nakon određivanja vlastitih frekvencija bimorfne konzole korištenjem analize vlastitih vrijednosti, a radi utvrđivanja elektromehaničkog odziva konzole pri harmonijskoj (sinusoidalnoj) uzbuđi, moguće je primijeniti i harmonijsku analizu u uskom frekvencijskom području oko temeljnih frekvencija vibriranja.

Kako bi se mogao utvrditi naponski odziv, prije harmonijske analize potrebno je definirati element otpora CIRC94 koji se sastoji od dvaju odvojenih čvorova između kojih se mjeri električni potencijal. Vrijednost električnog otpora definira se konstantom, a za potrebe ove simulacije koristi se otpor istog iznosa kao u potpoglavlju 3.3, odnosno $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$. Kao što je naglašeno u potpoglavlju 4.2.4, elektrode su još uvijek odvojene od otpornog elementa, a u ovoj fazi ih je potrebno spojiti. Spajanje se izvodi na način da se čvorovi četiriju postojećih elektroda grupiraju u dvije skupine i to dvije elektrode uz supstrat i dvije elektrode na vanjskim stranicama piezoelektrika (serijski spoj elektroda). Svaka od ovih dviju skupina čvorova se zatim povezuje na jedan čvor elementa električnog otpora i time je sustav električno spregnut. Za nametanje početne razlike potencijala, jednome od čvorova otpornog elementa onemogućuju se električni stupnjevi slobode, tj. „nulira“ se potencijal navedenog čvora.

Pri harmonijskoj analizi u ANSYS-u potrebno je definirati frekvencijski raspon koji se analizira, npr. $\pm 5 \text{ Hz}$ oko prve vlastite frekvencije. U ovoj analizi je korišten nešto širi raspon radi buduće usporedbe s modelima i eksperimentima. Potrebno je dodatno definirati i amplitudu

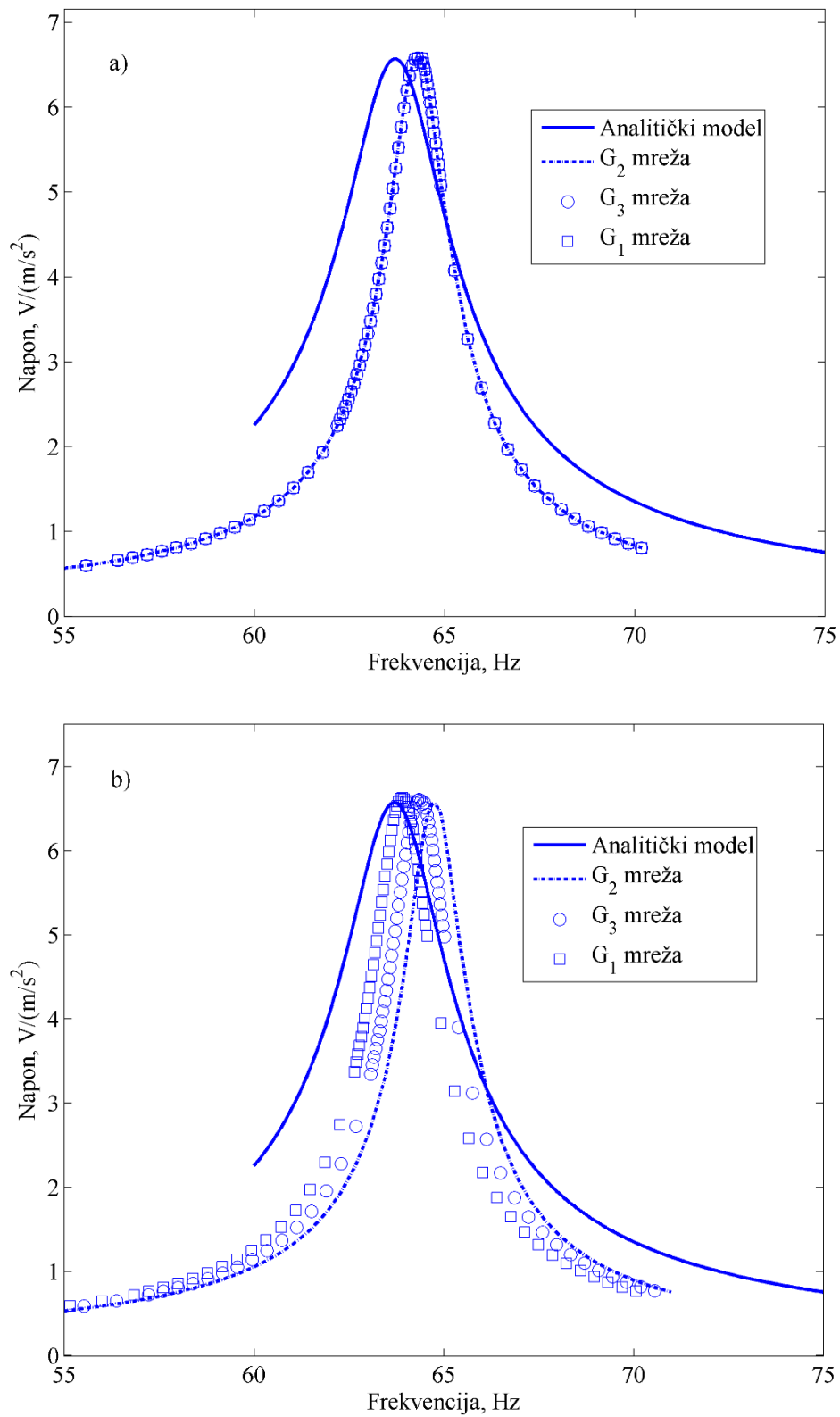
uzbude – u ovom slučaju ubrzanje u smjeru osi z u iznosu od 1 m/s^2 , koja će se harmonijski izmjenjivati u zadanom frekvencijskom rasponu. Ograničenja gibanja u uklještenju opisana su u prijašnjem poglavlju i ona ostaju nepromijenjena, što znači da je svim čvorovima na uklještenom kraju onemogućeno gibanje u svim smjerovima. Prije samog početka analize definiraju se i koeficijenti prigušenja ALPHAD i BETAD koji predstavljaju množitelje matrice mase i matrice krutosti, a izračunavaju se iz sljedećeg sustava jednadžbi s dvije nepoznanice [Nash]:

$$\begin{aligned}\frac{\alpha}{4\pi f_1} + \beta\pi f_1 &= \zeta \\ \frac{\alpha}{4\pi f_2} + \beta\pi f_2 &= \zeta\end{aligned}\tag{4.1}$$

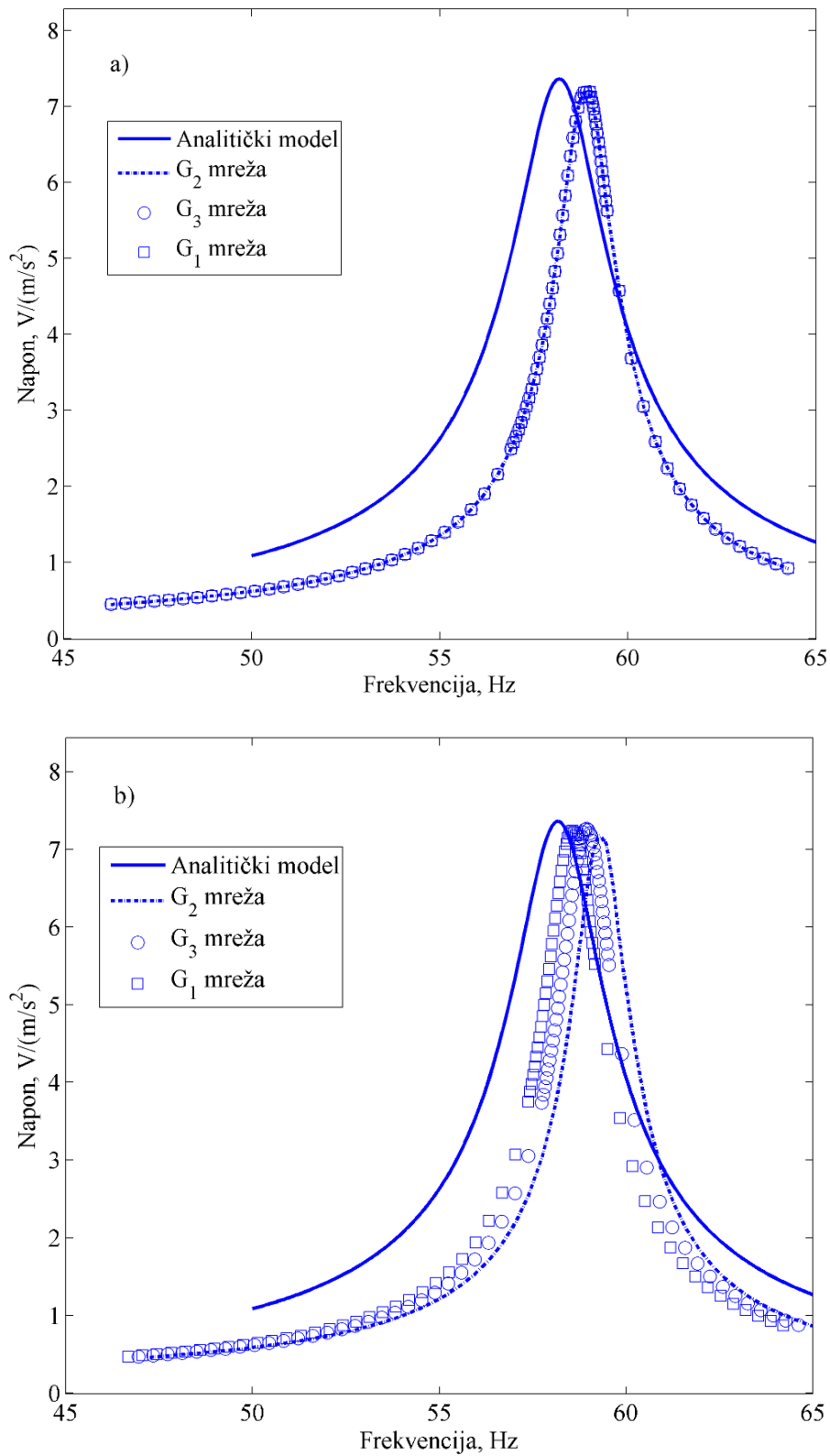
U jednadžbi (4.1) ζ je koeficijent prigušenja dok su f_1 i f_2 granice frekvencijskog raspona za koji se proračunavaju koeficijenti α i β . Prema podacima za mehanička svojstva materijala (Tablica 7), a na temelju prijašnjih eksperimentalnih mjerenja [Zelenika i Blažević, 2011.], pretpostavljeno je prigušenje konzole u iznosu od $\zeta = 0,008$ pa. Pa su tako za vrijednosti $f_1 = 45 \text{ Hz}$ i $f_2 = 80 \text{ Hz}$, vrijednosti koeficijenata $\alpha = 2,8953$ i $\beta = 2,0372 \cdot 10^{-5}$.

Nakon provedenih simulacija korištenjem ANSYS postprocesorskih funkcija, moguće je povezati vrijednosti napona sa svakom pojedinom frekvencijom te ih prikazati u obliku dijagrama. Usporedbom vrijednosti ostvarenih analitičkom simulacijom u MATLAB-u i numeričkih rezultata iz ANSYS modela moguće je utvrditi opisuje li model s konačnim elementima dobro fiziku pretvaranja energije vibracija u električnu energiju, te isto tako koliko gustoća mreže utječe na rezultat pri harmonijskoj analizi.

Potrebno je napomenuti da je u ovom slučaju direktna usporedba moguća jer je Erutrkov matematički model normaliziran po ubrzanju, dok je u ANSYS-u korištena uzbuda od 1 m/s^2 pa nije potrebno koristiti normalizacijske faktore kako bi se ostvarilo podudaranje reda veličina amplituda napona.



Slika 61. Prikaz utjecaja gustoće mreže konačnih elemenata na rezultat harmonijske analize naponskog odziva za konzolu bez utega: a) prizmatični elementi, b) tetraedarski elementi



Slika 62. Prikaz utjecaja gustoće mreže konačnih elemenata na rezultat harmonijske analize naponskog odziva za konzolu s utegom: a) prizmatični elementi, b) tetraedarski elementi

Iz usporedbi na prethodnim dvjema slikama (Slika 61 – konzola bez utega i Slika 62 – konzola s utegom), uočljivo je, kao i kod modalne analize, kako rezultati za pravokutne elemente nisu ovisni o gustoći mreže, dok tetraedarski elementi pokazuju izrazitu ovisnost i samo G_3 mreža daje rezultat koji je usporediv s rezultatima dobivenim prizmatičnim elementima. Model pokazuje usporedive vrijednosti maksimalnih amplituda napona u neposrednoj blizini prvog oblika vibriranja kao i dobro poklapanje vlastitih frekvencija u spregnutom načinu rada (vidljivo je kako elektromehanička sprega utječe na promjenu vlastitih frekvencija). Analiza odstupanja između analitičkih i numeričkih rezultata pokazuje da za vlastite frekvencije greška iznosi $\approx 1\%$, dok je kod proračuna maksimalnog napona greška ipak malo izraženija i nalazi se u rasponu od 2 do 4%.

Tablica 9. Usporedba 1. vlastite frekvencije elektromehanički spregnute konzole: MKE vs. analitički model

| | Vlastita frekvencija, Hz | | | | | |
|-------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Bez utega | | | S utegom | | |
| Analitički model | 63,71 | | | 58,19 | | |
| MKE | Mreža G_1 | Mreža G_2 | Mreža G_3 | Mreža G_1 | Mreža G_2 | Mreža G_3 |
| Pravokutni el. | 64,3 | 64,3 | 64,3 | 59 | 59 | 59 |
| Greška MKE/model | 0,92 % | 0,92 % | 0,92 % | 1,4 % | 1,4 % | 1,4 % |
| Tetrahedralni el. | 63,91 | 64,74 | 64,36 | 58,57 | 59,31 | 58,95 |
| Greška MKE/model | 0,31 % | 1,61 % | 1,02 % | 0,65 % | 1,92 % | 1,3 % |

Razlike u krivuljama jasno su uočljive i to poglavito pri pomaku vlastitih frekvencija, ali i u samom obliku krivulje (MATLAB oblik je 'zvonastiji' tj. širi), što se može pripisati ranije spomenutim ograničenjima ANSYS-a po pitanju simuliranja direktnog piezoelektričnog efekta. Kako bi mogli sa sigurnošću donijeti ovaj zaključak potrebno prije svega provesti usporedbe s eksperimentima radi utvrđivanja točnosti kako analitike tako i numerike. U nastavku se navode usporedne tablice maksimalnih ostvarenih amplituda i modificiranih vlastitih frekvencija pri kojima su iste prisutne, za različite tipove konačnih elemenata i gustoća mreža (Tablica 9 i

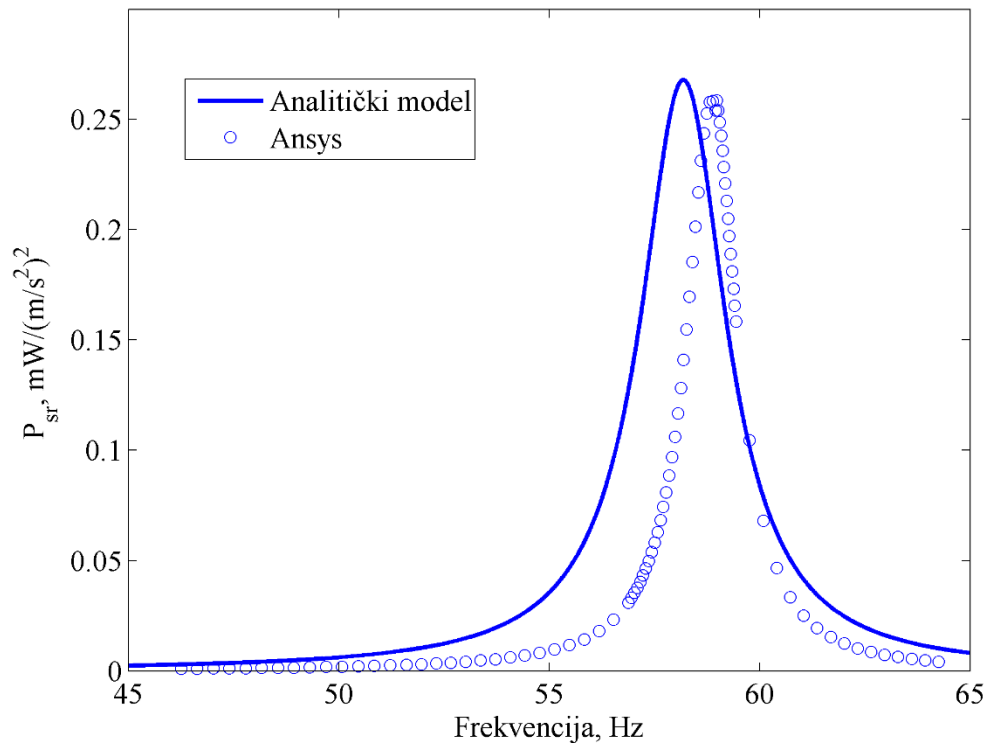
Tablica 10). Naknadnom analizom osjetljivosti različitih faktora utvrđeno je da se vlastite vrijednosti dobro slažu u slučaju skraćivanja konzole u matematičkom modelu za 400 μm (što, naravno, u praksi uvelike ovisi o načinu montaže konzole i načinu dobivanja uklještenja), dok oblik krivulja ovisi o vrijednosti faktora permitivnosti.

Tablica 10. Usporedba maksimalnog napona normaliziranog s translacijskim ubrzanjem uklještenja elektromehanički spregnute konzole: MKE vs. analitički model

| | Maksimalni napon, V | | | | | |
|-------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Bez utega | | | S utegom | | |
| Analitički model | 6,9 | | | 7,363 | | |
| MKE | Mreža G_1 | Mreža G_2 | Mreža G_3 | Mreža G_1 | Mreža G_2 | Mreža G_3 |
| Pravokutni el. | 6,58 | 6,58 | 6,58 | 7,2 | 7,2 | 7,2 |
| Greška MKE/model | 4,63 % | 4,63 % | 4,63 % | 2,21 % | 2,21 % | 2,21 % |
| Tetrahedralni el, | 6,63 | 6,56 | 6,61 | 7,24 | 7,17 | 7,26 |
| Greška MKE/model | 3,91 % | 4,9 % | 4,2 % | 1,67 % | 2,62 % | 1,4% |

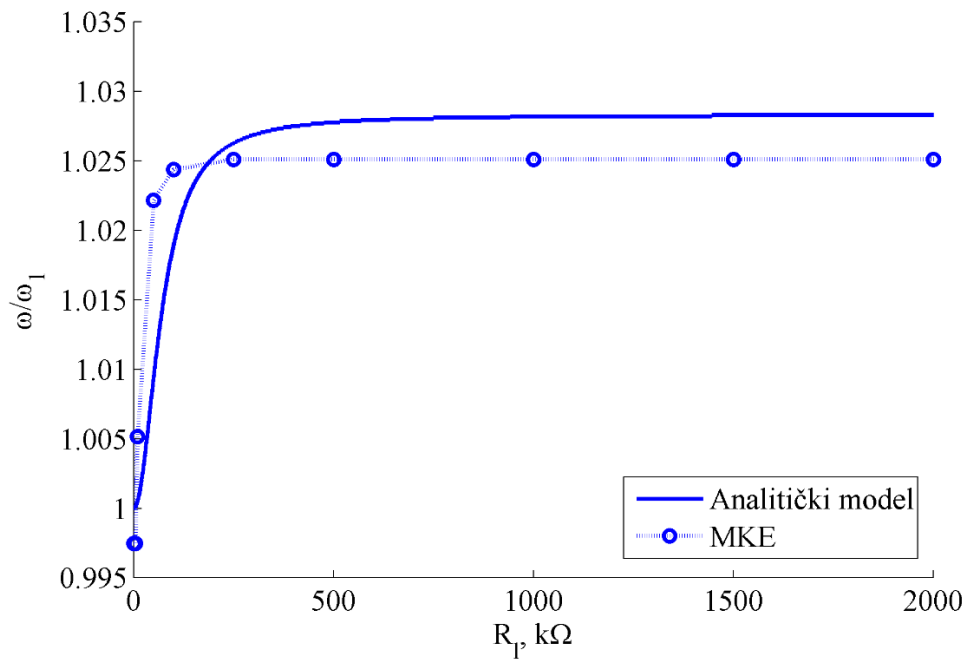
Ova analiza potkrepljuje rezultate Tanga & Yanga [Yang i Tang, 2009.] o vrlo dobrim simulacijskim mogućnostima ANSYS-a kada je riječ o simuliranju maksimalne snage dobivene putem bimorfni piezoelektričnih konzola. Rezultat se naravno temelji na vrlo dobroj procjeni maksimalnog napona ostvarenog pri točno određenoj uzbudnoj frekvenciji koja se poklapa s prvom vlastitom frekvencijom sustava za pretvorbu niskorazinske energije vibracija iz okoliša.

Daljnji grafički prikazi i usporedbe u ovom poglavlju temeljeni su na konzoli s utegom kao najčešćem slučaju primjene ovdje razmatranog tipa uređaja. Iz podataka dobivenih iz ANSYS-a za konzolu s utegom, lako se izračuna snaga pomoću izraza (3.78) (Slika 63).



Slika 63. Prosječna snaga na otporniku za konzolu s utegom: usporedba temeljena na prizmatičnoj G_1 mreži konačnih elemenata

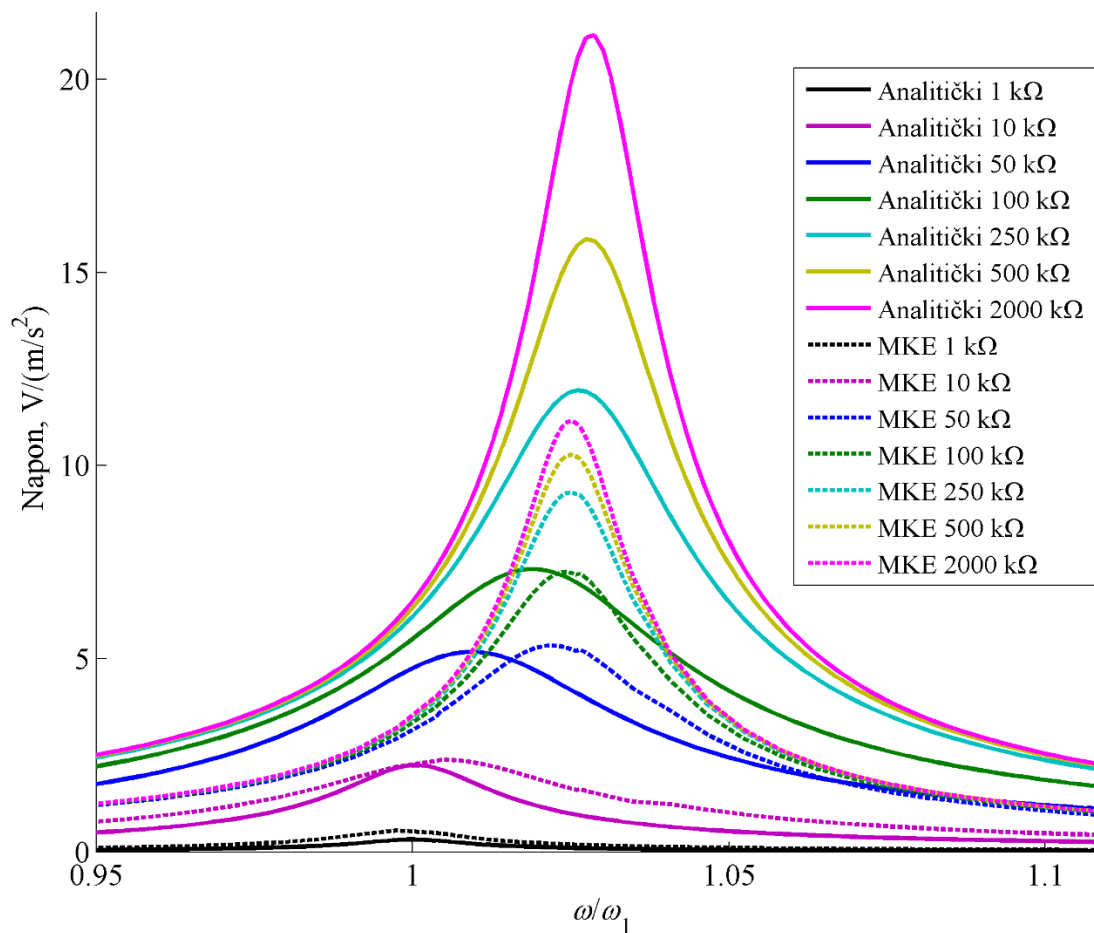
Na analogan način moguće je prikazati i krivulju ukrućenja strukture u vidu zasićenja vrijednosti vlastite frekvencije za 12 različitih vrijednosti otpora radnog trošila (Slika 64.).



Slika 64. Porast vlastitih frekvencija konzole pri sukcesivnom povećavanju 12 vrijednosti električnog otpora ($10 \Omega - 2 \text{ M}\Omega$)

Kako bi se potvrdili navodi Yanga i Tanga [Yang i Tang, 2009] koji tvrde da se ANSYS ne može koristiti za kvalitetno simuliranje direktnog piezoelektričnog efekta, već samo za približne procjene maksimalne dostupne snage u sustavu, potrebno je usporediti u literaturi empirijski potvrđen, a u 3. poglavlju izložen analitički model s MKE rezultatima i to za 12 različitih vrijednosti otpora. U grafičkom prikazu (Slika 65.) radi čitljivosti nisu uvrštene sve krivulje već samo sedam vrijednosti otpora

MKE model pokazuje zadovoljavajuću korespondenciju s analitičkim rezultatima maksimalnog naponskog odziva u rasponu otpora od 10Ω do $250 \text{ k}\Omega$ (Slika 65.). Međutim od te točke na dalje rezultati pokazuju veliku diskrepanciju, uz prethodno prikazanu dobru procjenu rezonantnih frekvencija koja pritom uzima u obzir efekt elektromehaničkog ukrućenja strukture (Slika 64).



Slika 65. Usporedba analitičkog i MKE modela za 7 različitih vrijednosti otpora R_i

4.5 Spregnuta tranzijentna analiza

Kako bi se premostili nedostaci harmonijske analize i istražio utjecaj nelinearne geometrije tj. velikih deformacija na dinamički odziv piezoelektričnog bimorfa, potrebno je sprovesti tzv. tranzijentnu analizu kojoj je cilj u točno definiranim vremenskim inkrementima simulirati fizikalni sustav u stanju prisilne uzbude te u svakoj iteraciji dobiti rezultate postignutog stacionarnog stanja (engl. *steady state*). Korištenje ovog postupka unutar ANSYS-a omogućuje i korištenje nelinearne analize. U ovom je poglavlju objašnjen taj postupak, i predstavljena je usporedba linearne i nelinearne tranzijentne analize.

U mehanici konstrukcija nelinearni odziv sustava može nastupiti u dvama slučajevima: zbog nelinearnosti materijala ili geometrijskih nelinearnosti. U prvom slučaju promjenjiva mehanička svojstva materijala izazivaju nelinearni odnos naprezanja/deformacija (npr. ovisnost svojstava o temperaturi), dok je u drugom slučaju nelinearan odnos naprezanje/progib (pomak). Uzrok geometrijske nelinearnosti je velika amplituda progiba zbog čega nastupaju zakretanja poprečnih presjeka strukture što na kraju rezultira drugačijim odzivom od onog predviđenog linearnim modelom. Ako se ovaj učinak uključi u model, dinamički odziv postaje nelinearna funkcija amplitude uzbude. Drugim riječima, može se reći da krutost i uzbudna sila tada postaju funkcije pomaka čvorova konačnih elemenata jer se pri svakom ciklusu uzbude mijenja geometrija konstrukcije pa je u svakom inkrementu analize potrebno ponovno proračunati krutost konstrukcije. Jedan od mogućih uzroka geometrijske nelinearnosti može se pripisati i tzv. antiklastičkom učinku odnosno nastajanju poprečne, antiklastičke zakrivljenosti [Ashwell, 1950.]. U ANSYS-u je moguće koristiti funkciju NLGEOM kojom se uzima u obzir nelinearnost geometrije, tj. automatski proračunava modificirana krutost u svakom koraku analize.

4.5.1 Definiranje harmonijske uzbude uklještenja

U postavkama tranzijentne analize u ANSYS-u nije moguće definirati uzbudno ubrzanje kao što je to slučaj kod harmonijske analize korištenjem naredbe ACCELZ. Kako bi se riješio ovaj problem, potrebno je programirati profil uzbude u MATLAB-u te zatim taj profil učitati u ANSYS i pozivati ga u svakom vremenskom inkrementu.

Harmonijska uzbuda programirana je na sljedeći način: za uzbudno ubrzanje koje se želi postići (u predmetnom slučaju $a = 1 \text{ m/s}^2$) izračunata je maksimalna amplituda iz izraza za slobodne

vibracije bez prigušenja prema izrazu (4.3), a zatim je korištenjem više petlji i iterativnim proračunavanjem jednadžbe (4.2), dobiven profil frekvencijskog pojasa uzbude. Za uzbudu konzole bez utega proračunata je pojasna uzbuda od 63 do 64,5 Hz, dok je za konzolu s utegom frekvencijski pojas bio od 57,5 do 59 Hz (Slika 66). Razlog za ovako uski frekvencijski pojas je u vrlo dugom vremenu izvršavanja tranzijentne analize (poglavito kad su uključene geometrijske nelinearnosti).

Što se tiče ostalih postavki pojasne uzbude, potrebno je spomenuti broj točaka kojima je definirana jedna perioda sinusoidalne uzbude $N = 16$, inkrement frekvencije od 0,05 Hz, a broj ciklusa uzbude pri pojedinoj frekvenciji radi ostvarivanja stacionarnog stanja je $n = 16$. Inkrement frekvencije uzima se mali, kako bi se što više moglo približiti vlastitoj frekvenciji. Navedene postavke rezultiraju s pojasnom uzbudom raspoređenom po 7936 točaka (Slika 66.).

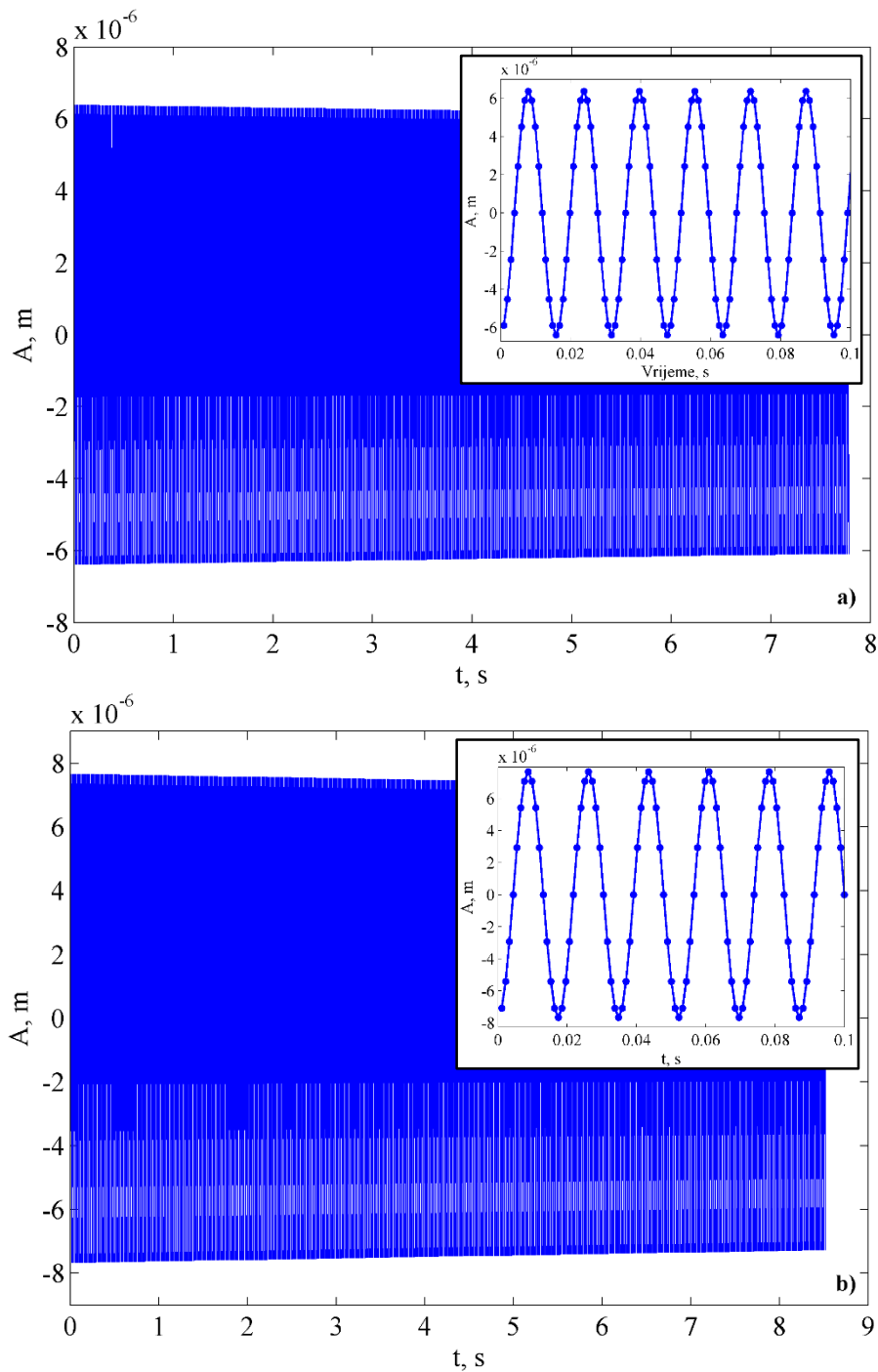
$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (4.2)$$

$$A_{\max} = -\frac{a}{\omega^2} = -\frac{a}{(2\pi f)^2} \quad (4.3)$$

4.5.2 Postavke analize

Velikim brojem predanaliza i različitih definicija profila uzbude (variranje broja ciklusa i točaka), kao i na temelju već navedenih analiza osjetljivosti gustoće mreže na dobiveni rezultat, utvrđeno je kako je pravokutna G_1 mreža najbolja radi velike brzine izvršavanja i točnosti. ALPHAD i BETAD faktori prigušenja proračunati su kao u poglavlju 4.4, dok je maksimalni broj iteracija do konvergencije rješenja NEQIT = 5. Integracijski parametri tranzijentne analize namješteni su prema preporukama ANSYS dokumentacije za spregnutu piezoelektričnu analizu: ALPHA = 0.25, DELTA = 0.5, THETA = 0.5.

U prethodnom odlomku objašnjen je postupak proračuna profila uzbude, iz čega se može zaključiti kako je za njegovo korištenje u ANSYS-u potrebno programirati i *DO petlju koja će se pozivati na spomenuti profil uzbude. U svakom tranzijentnom koraku potrebno je učitati podatke vremenskog inkrementa i pomak čvorova uklještenja prema trenutnoj amplitudi za zadano vrijeme. Nakon pomicanja uklještenja, u ANSYS-u se proračunava odgovarajuće rješenje i sprema u bazu. Geometrijske nelinearnosti, tj. velike deformacije uključuju se opcijom NLGEOM, ON.



Slika 66. Profil uzbude uklještenja pri ubrzanju od 1 m/s^2 za frekvencijski raspon od: a) 63 do 64,5 Hz i b) 57,5 do 59 Hz

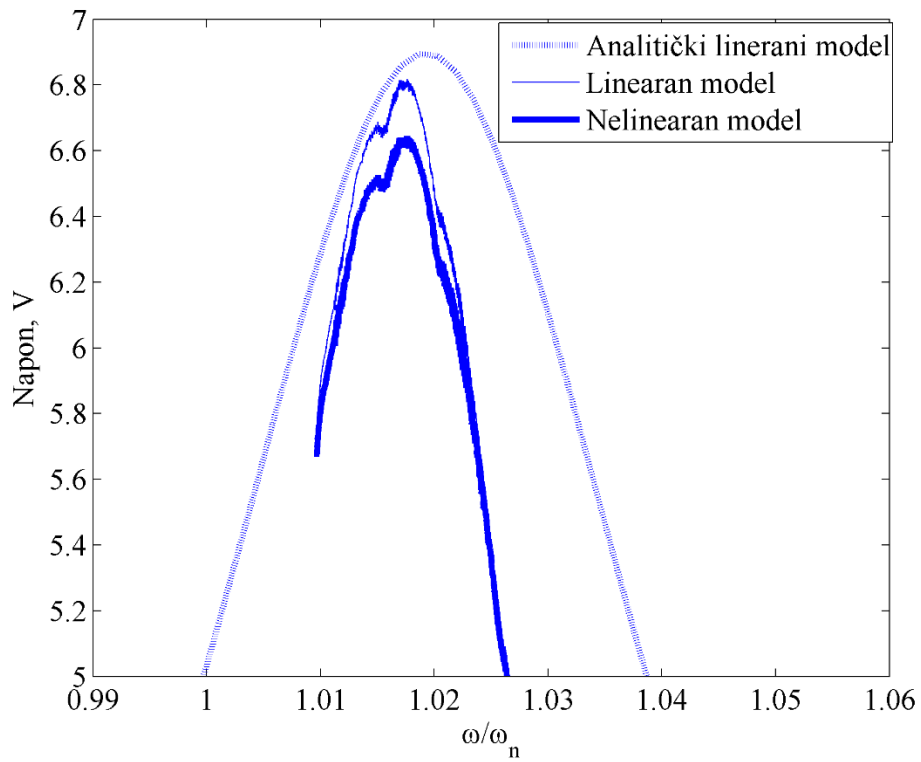
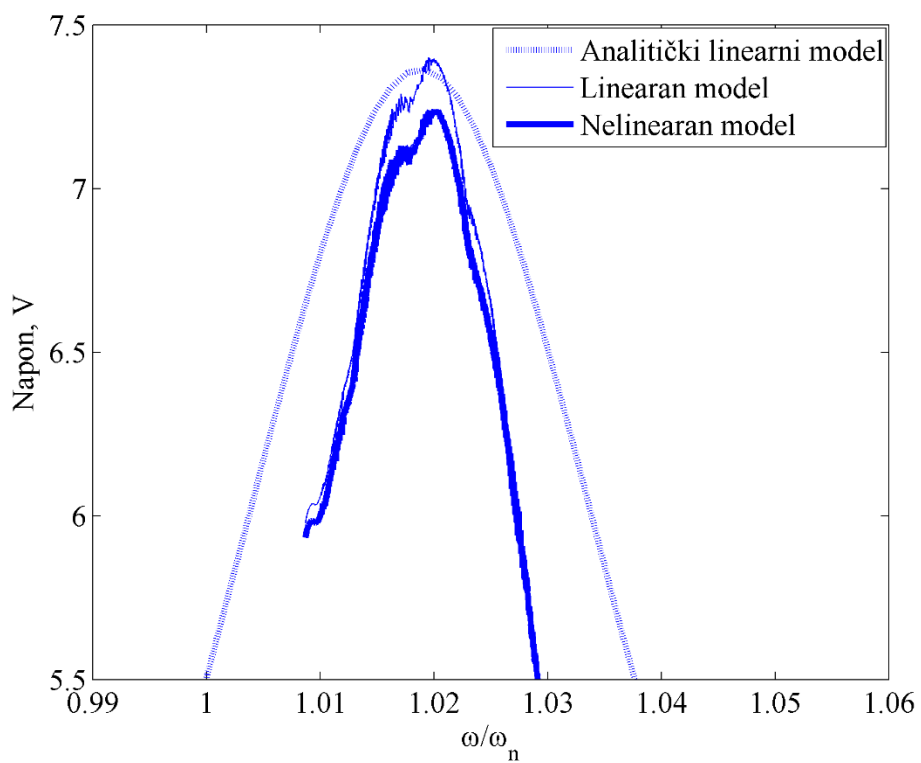
4.5.3 Rezultati

Izvršene su tranzijentne analize s uključenim i isključenim geometrijskim nelinearnostima i to za piezoelektričnu konzolu sa i bez utega. Kako je broj potrebnih točaka za dobivanje fizikalno zadovoljavajućih rezultata poprilično (≈ 8000) i to u uskom području oko vlastitih frekvencija konzola ($\pm 0,75$ Hz), bilo je za očekivati kako će izvršavanje pojedinačnih analiza, a pogotovo nelinearnih, dugo trajati (cca. 10 h). Nakon što su dobiveni rezultati u vremenskoj domeni u ANSYS rješavaču, bilo ih je potrebno prebaciti u frekvencijsku domenu i usporediti s analitičkim modelom.

Rezultati linearne tranzijentne analize pokazuju dobru korelaciju s modelom (Slika 67, X-os normalizirana vlastitom frekvencijom, 1. oblik savijanja). Razlike u predviđanju rezonantne frekvencije su drastično opale u odnosu na rezultate harmonijske analize (Tablica 11) i nalaze se u rasponu od 0,05 do 0,17%, dok je kod predviđanja maksimalnog napona također uočeno značajno poboljšanje i razlika u odnosu na rezultate maksimalnog naponskog odziva dobivenog pri harmonijskoj analizi također je smanjena te se nalazi u rasponu od 0,5 do 1,15% (Tablica 11). U slučaju uključenih geometrijskih nelinearnosti lako je uočiti odstupanja od linearnog MKE modela. Vlastita frekvencija odstupa od one predviđene linearnim MKE modelom za zanemarivih do 0,05%, dok je najveća razlika uočljiva u predviđanju maksimalnog napona i to za 2 do 2,6 %.

Tablica 11. Rezultati tranzijentne analize i razlike između analitičkog modela te linearne/nelinearne MKE

| | Vlastita frekvencija [Hz] | | Maksimalni napon pri vlastitoj frekvenciji [V] | |
|--|---------------------------|----------|--|----------|
| | Bez utega | S utegom | Bez utega | S utegom |
| Analitički model: 1. vlastita frekvencija | 63,71 | 58,19 | 6,9 | 7,363 |
| MKE SOLID226 G_1 , linearno | 63,6 | 58,22 | 6,82 | 7,4 |
| MKE SOLID226 G_1 , nelinearno | 63,6 | 58,25 | 6,64 | 7,24 |
| Razlika linearni MKE/model | 0,17 % | 0,05 % | 1,15 % | 0,5 % |
| Razlika MKE linearno/nelinearno | 0 | 0,05 % | 2,63 % | 2,16 % |

**a)****b)**

Slika 67. Rezultati tranzijentne analize: a) za konzolu bez utega i b) za konzolu s utegom (donji dijagram).

Prema rezultatima iz 3. i 4. poglavlja može se zaključiti da su matematički te MKE alati za procjenu učinka bimorfni piezoelektričnih pretvarača energije vibracija u električnu energiju uspješno razvijeni. Prethodno objavljen i eksperimentalno potvrđen [Erturk & Inman 2009.; Benasciutti et al. 2010.; Yang & Tang 2009.] matematički model prof. Erturka implementiran je u MATLAB-u, dok je numerički model kojega su opisali Yang i Tang, ovdje u potpunosti iskodiran i modificiran za bimorfnu strukturu. Model s MKE može se upotrijebiti kao rješenje koje omogućuje brzu procjenu maksimalne snage i rezonantne frekvencije za konzole različitih oblika čime su riješena ograničenja analitičkog rješenja. Nelinearna MKE analiza temeljena na geometrijskim nelinearnostima pokazuje dobru frekvencijsku usklađenost uzimajući u obzir pomak vlastite frekvencije na račun povećanja vrijednosti otpora. Međutim, kao što je prikazano u usporedbi s analitičkim modelom (Slika 65.), model podcjenjuje maksimalne iznose napona pri većim iznosima otpora ($> 250 \text{ k}\Omega$).

Na temelju rečenoga, u idućem su poglavlju opisani eksperimentalni postavi razvijeni s ciljem procjene učinka realnih konzola i usporedbe njihovog odziva s rezultatima teorijskih modela razvijenih u 3. i 4. poglavlju.

5. Eksperimenti i usporedbe s teorijskim modelima

U ovom su poglavlju opisani eksperimentalni postavi korišteni za mjerenje mehaničkog i elektromehaničkog odziva piezoelektričnih bimorfni konzola za prikupljanje niskorazinske kinetičke energije vibracija iz okoliša.

U potpoglavlju 2.6.3.3, navedeno je više različitih proizvođača piezoelektričnih konzola čija je glavna namjena pretvaranje kinetičke energije vibracija u električnu energiju. Zbog izuzetne propulzivnosti ovog znanstveno-tehnološkog polja i novih mogućnosti ove tehnologije, u literaturi su predstavljani brojni analitički i numerički modeli za opisivanje odziva spomenutih uređaja. Međutim, komercijalno dostupni uređaji često su drugačiji od literaturom predstavljenih referentnih bimorfni konzola sastavljenih u klasičnoj konfiguraciji od dva sloja piezoelektrika i jednog centralnog sloja supstrata. Razlike se ponajviše očituju u konstrukciji (npr. piezoelektrični sloj ne prekriva cijeli sloj supstrata, nego je udaljen od krajnjih rubova konzole za određeni iznos) i različitim međuslojevima koji su potrebni za proizvodnju i dugotrajniji rad ovakvih tipova uređaja. Najčešće su to slojevi ljepila (zanemareni u modelima) kojima se piezoelektrični slojevi lijepe na supstrat, a proizvođači često koriste i zaštitne polimerne slojeve kojima štite elektrode i kristalni sloj piezoelektrika. Na samom početku ovog istraživanja većina podataka o strukturi i mehaničkim svojstvima komercijalnih konzola nije bila dostupna zbog čega je bilo potrebno provesti eksperimente radi utvrđivanja glavnih mehaničkih karakteristika konzola da bi se utvrdili podaci potrebni za naknadne usporedbe modela i stvarnog elektromehaničkog odziva uređaja.

5.1 Midé piezoelektrične konzole

Kao eksperimentalni uzorci korištene su po cijeni pristupačne Volture piezoelektrične konzole proizvođača Midé Technology Corporation, modeli: V21B i V25B [URL: Mide]. Za razliku od većine dostupnih piezoelektričnih konzola, koje su razvijene kao pokretači (indirektni piezoelektrični efekt), ovi uređaji razvijeni su kao pretvarači (direktni piezoelektrični efekt).

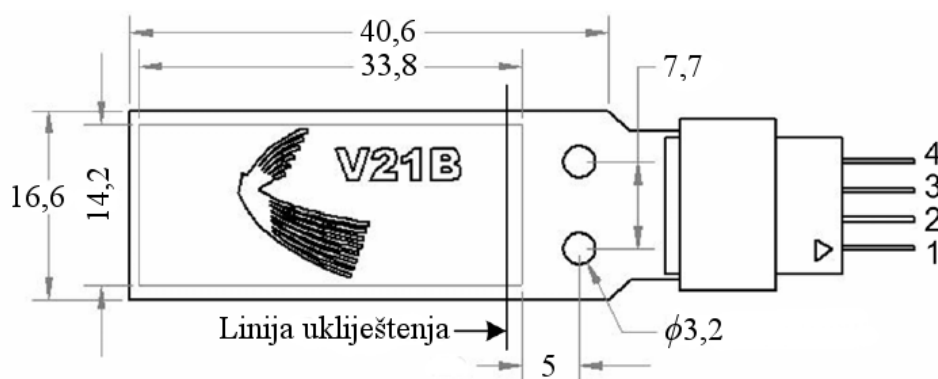


Slika 68. Voltre piezoelektrične konzole: V21B i V25W [URL: Mide]

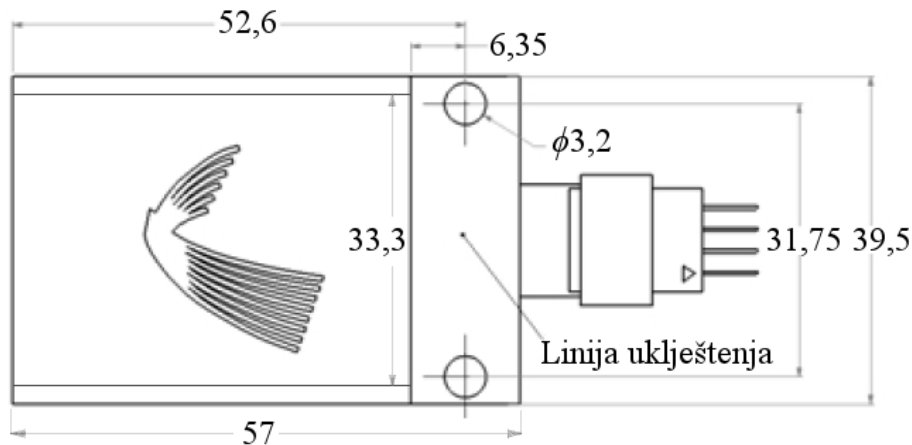
U Tablici 12 i na slikama 68 i 69 prikazane su geometrijske karakteristike obaju tipova Voltre konzola:

Tablica 12. Dimenzije MIDE Voltre konzola

| Glavne dimenzije | Simbol | V21B | V25W |
|---------------------------|--------|-------|------|
| Ukupna duljina, mm | L | 69,5 | 81 |
| Ukupna širina, mm | b | 16,6 | 39,5 |
| Ukupna debljina, mm | h | 0,8 | 0,61 |
| Visina piezoelektrika, mm | h_p | 0,225 | 0,2 |

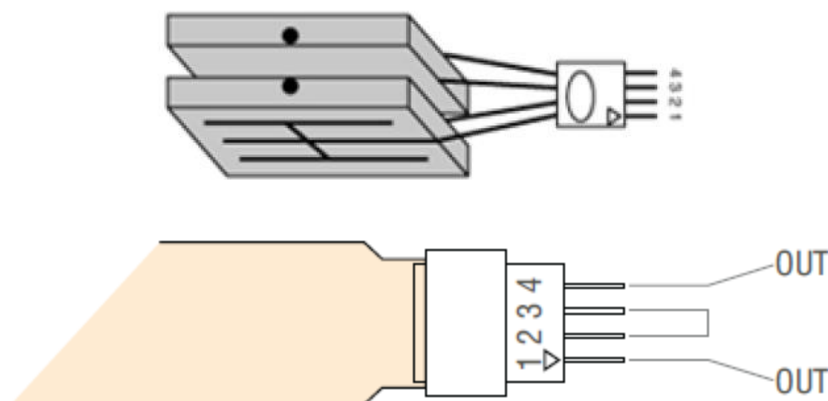


Slika 69. Dimenzije konzole Midé Voltre V21B u milimetrima. Kote 14,2 mm i 33,8 mm označavaju dimenzije aktivnog piezoelektričnog sloja [URL: Mide]



Slika 70. Dimenzije konzole Midé Volture V25W u milimetrima. Kota 33,3 mm označava širinu aktivnog piezoelektričnog sloja. [URL: Mide]

Elektrode na stranicama svakog piezoelektričnog sloja povezane su kao što to prikazuje Slika 71:



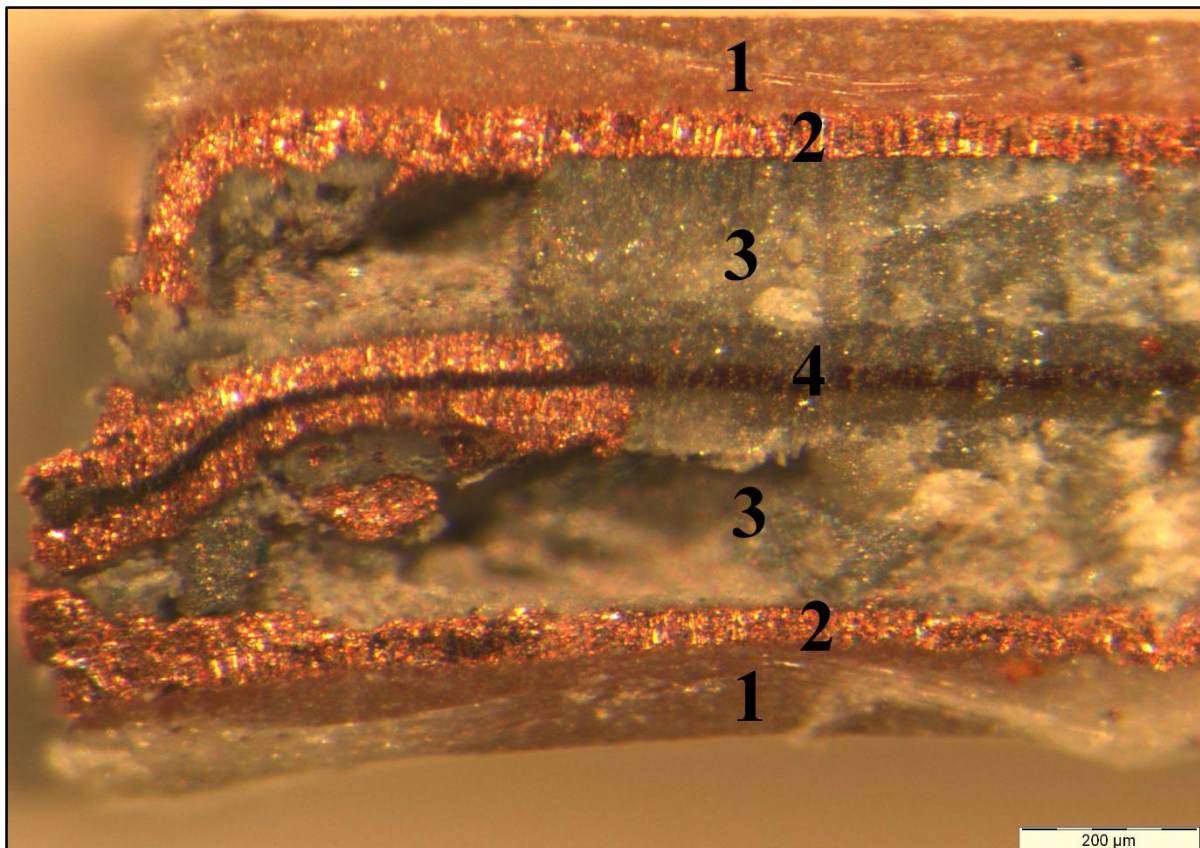
Slika 71. Veza elektroda na piezoelektričnim slojevima s izlaznim pinovima konektora i prikaz serijskog spoja [URL: Mide]

Pri početnim ispitivanjima postalo je evidentno da neće biti moguće povezati eksperimentalne rezultate s rezultatima modela bez detaljnijeg poznavanja strukture ovih uređaja. U kontaktima s proizvođačem Midé Technology Corporation nije bilo moguće dobiti dodatne informacije.

Jedan od načina pomoću kojeg je detaljnije utvrđena struktura uređaja bilo je zarezivanje konzole na dijelu iza linije uklještenja (Slika 69) i ispitivanje na optičkom stereomikroskopu Olympus SZX16 u Laboratoriju za precizno inženjerstvo Tehničkog fakulteta u Rijeci te, nakon toga, i na Oxford Instruments INCA uređaju za spektroskopiju pri Metalurškom laboratoriju za ispitivanje materijala na Sveučilištu u Udinama. Spektrometar je uređaj kojim se analizira

struktura materijala predmetnog uzorka, a na temelju emisije X-zraka s površine uzorka, uzrokovane prvotnim sudarom elektrona preglednog elektronskog mikroskopa (engl. *Scanning electron microscope*) i promatranog uzorka. Konzola je poprečno zarezana skalpelom (rez duljine 2 mm), a uzdužno cirkularom s dijamantnom oštricom.

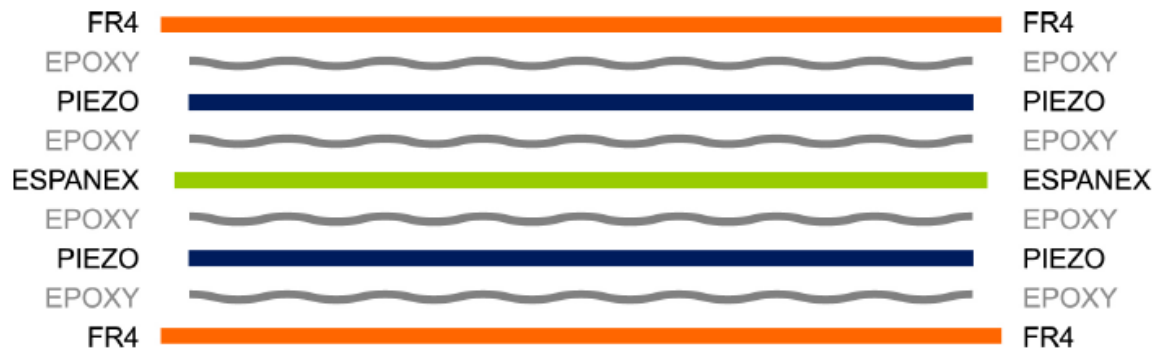
Slika 72. prikazuje rezultate stereomikroskopske analize koji su pokazali kompleksnu strukturu konzole.



Slika 72. Midé konzola pod optičkim stereomikroskopom Olympus SZX16.

Utvrđeno je tako da je ispitivana struktura složenija od klasičnog bimorfa predstavljenog u dostupnoj literaturi. Optičkom mikroskopijom (Slika 72) utvrđeno je postojanje simetrične strukture sastavljene od 7 slojeva (ne uključujući slojeve epoksidnog ljepila). Vidljiva su 4 lako razlučiva sloja označena rednim brojevima: 1. pletena najlonska mreža u epoksidnoj matrici, 2. bakrena elektroda, 3. piezoelektrik i 4. pobakreni polimimid. Spektroskopska analiza nije jasnije razlučila slojeve iako je potvrdila postojanje piezoelektričnih slojeva (potvrđeni spektri elemenata Pb i Zr, sastavni dijelovi PZT materijala označenog brojem '3') i bakrenih elektroda (element Cu, označen brojem '2').

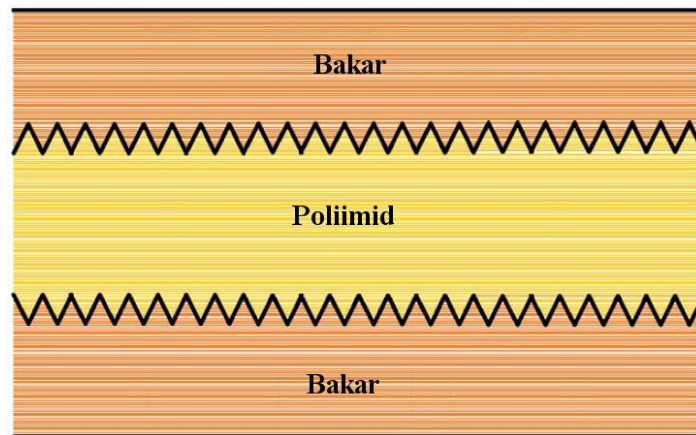
Skoro dvije godine nakon ovdje predstavljenih istraživanja, proizvođač je objavio podatke o strukturi uređaja i svojstvima materijala pojedinih slojeva (vjerojatno nakon mnoštva upita od strane korisnika), ali neki od ključnih podataka su još uvijek nedostajali i to: mehaničko prigušenje uređaja ζ i ekvivalentni modul elastičnosti. Slika 73 prikazuje strukturu konzole koju je proizvođač naknadno objavio.



Slika 73. Struktura Midé Volture konzole bez prikazanih bakrenih elektroda [URL: Mide]

Za razliku od mikroskopske snimke, proizvođač prikazuje slojeve ljepila 'EPOXY', dok su bakrene elektrode vidljive na mikroskopskoj snimci i ujedno nužne za prikupljanje naboja s piezoelektrika (Slika 73), najvjerojatnije uvrštene unutar slojeva FR4 i ESPANEX. Ako se na slojeve s mikroskopske snimke (Slika 72), kojih je ukupno sedam, dodaju i četiri sloja ljepila, dobije se struktura sastavljena od 11 zasebnih slojeva. Sloj FR4 je zaštitni epoksidni sloj s upletenom najlonskom mrežom koja povećava krutost uređaja, a ujedno djeluje i kao izolator i vatro-otporni sloj (engl. *FR – fire retardant*). Centralni ESPANEX sloj sastavljen je od supstratnog sloja poliimida na koji je i s jedne i s druge strane laminiran sloj bakrenih elektroda (Slika 74). Ovaj kompozitni materijal često se koristi u fleksibilnoj elektronici.

Svojstva materijala promatranih komercijalnih konzola za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša navedena su u posljednjem dijelu ovoga poglavlja u kojem su izvršene i usporedbe eksperimenata. U nastavku su, pak, dati opisi eksperimentalnih postava korištenih za saznavanje nepoznatih svojstava promatranih Midé konzola.



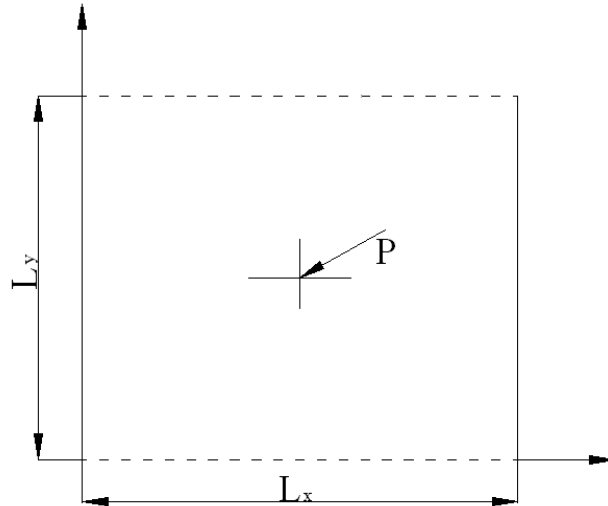
Slika 74. Grafički opis supstratnog sloja ESPANEX označenog na mikroskopskoj snimci s '4'
[URL: Mide]

5.2 Utvrđivanje mehaničkih svojstava piezoelektričnih Midé konzola

U ovom potpoglavlju opisani su eksperimenti izvedeni za utvrđivanje modula elastičnosti, mehaničkog prigušenja i dinamičkog odziva konzole pri harmonijskoj uzbudi.

5.2.1 Eksperimentalno utvrđivanje modula elastičnosti

Zbog nedostupnosti podataka o ekvivalentnom modulu elastičnosti komercijalnih Midé piezoelektričnih konzola za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša bilo je potrebno osmisliti eksperimentalni način za utvrđivanja istog. Pri početnim razmatranjima problema utvrđeno je kako ovaj postav mora imati mogućnost mjerenja sile i pomaka u elastičnom području deformacija konzole što je značilo da je potrebna mehanička kidalica za ispitivanje svojstava materijala. Uz suradnju i pomoć članova Laboratorija za ispitivanje čvrstoće konstrukcija na Zavodu za tehničku mehaniku pri Tehničkom fakultetu u Rijeci, u literaturi su pronađene teorijske formulacije za rješavanje promatranog problema na temelju kojih je osmišljen eksperiment. Na Slici 75 data je skica za koju su navedeni i empirijski izrazi koji proizlaze iz teorije ploča, a omogućavaju izračunavanje progiba u točki težišta vertikalno opterećene ploče jednostavno oslonjene na dva suprotna kraja (ploča nije kruto vezana za oslonce). S P je označena vertikalna sila koja djeluje u točki težišta na ovaj način oslonjene ploče, L_x je duljina ploče između oslonaca, a L_y širina ploče. [Stiglat i Wippel, 1973.].



Slika 75. Vertikalno u težištu opterećena ploča jednostavno oslonjena na suprotnim krajevima (pune linije), sa slobodnim, neoslonjenim stranicama (crtkane linije). [Stiglat i Wippel, 1973.]

Izraz koji opisuje rješenje ovog problema glasi:

$$w = \frac{P \cdot L_x^2}{k_w \cdot N} \quad (5.1)$$

gdje je:

w – deformacija/progib, m,

P – sila opterećenja, N,

L_x – duljina ploče između oslonaca, m,

k_w – geometrijski koeficijent ovisan o omjeru L_y/L_x ,

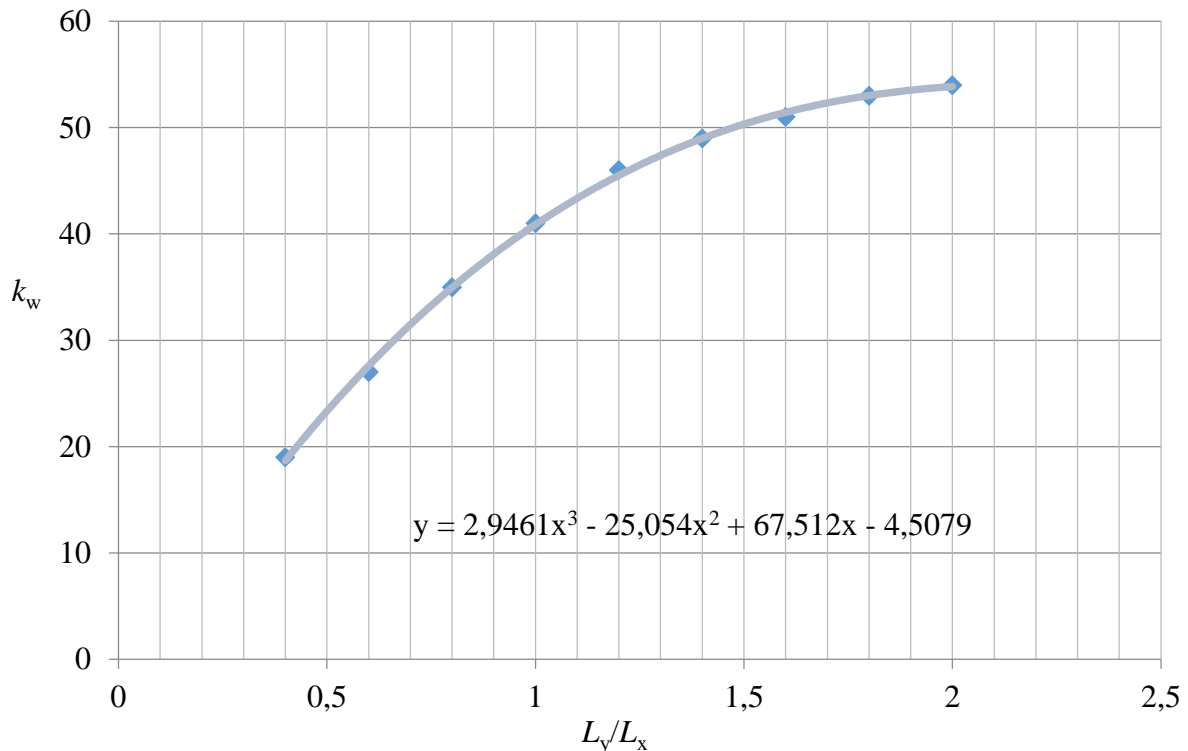
N – faktor definiran kao $N = d^3 E/12$, Nm,

L_y – širina ploče, m,

d – debljina ploče, m,

E – Youngov modul elastičnosti, N/m².

Geometrijski koeficijent k_w određuje se, u ovisnosti o iznosu omjera L_y/L_x , odnosno omjeru širine ploče i neoslonjene duljine ploče, a na temelju tabličnih podataka [Stiglat i Wippel, 1973.]. Interpolacijom tih podataka (Slika 76) omogućuje se točniji odabir koeficijenta k_w .

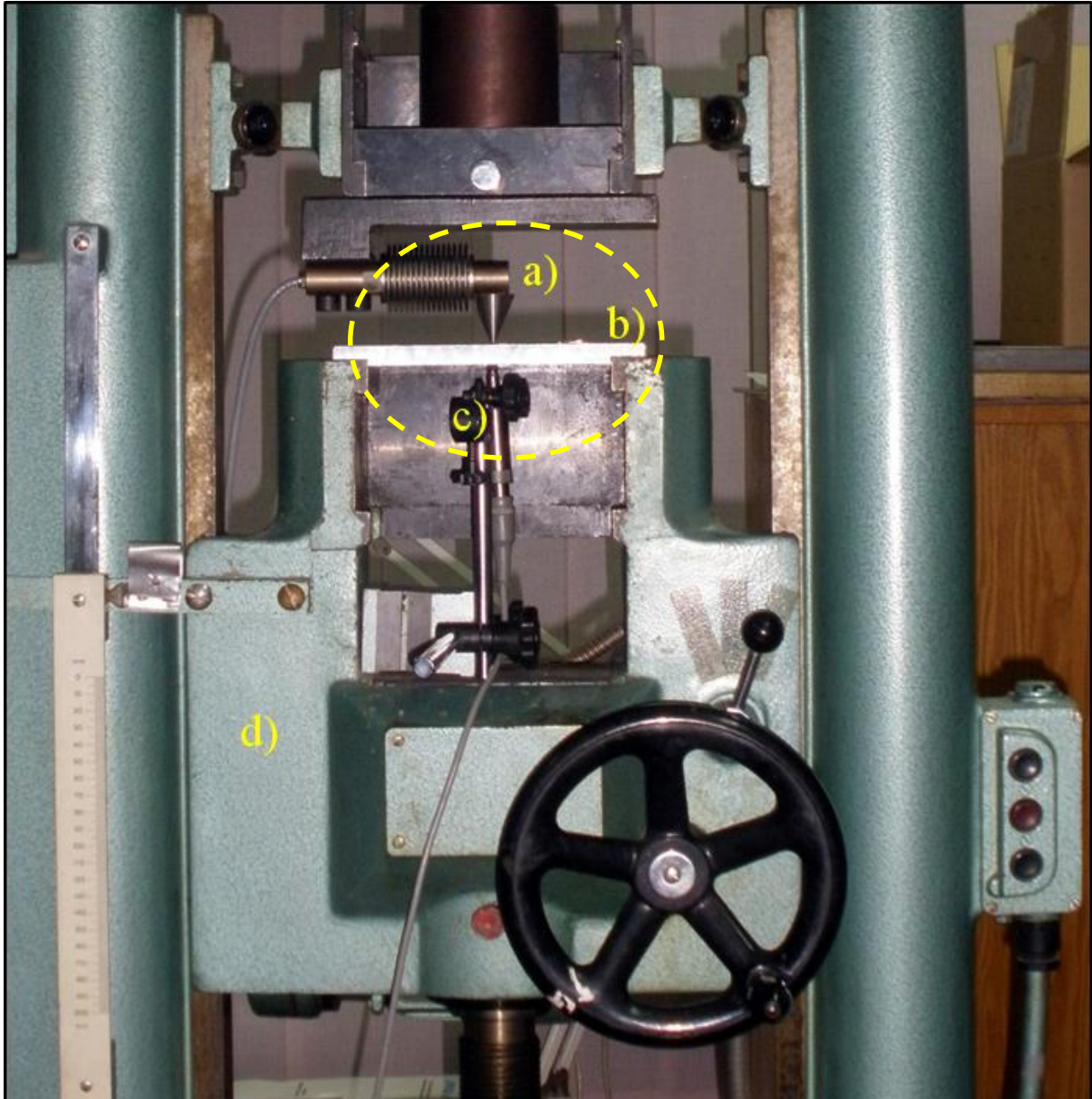


Slika 76. Interpolacijski dijagram za faktor k_w na temelju tabličnih podataka

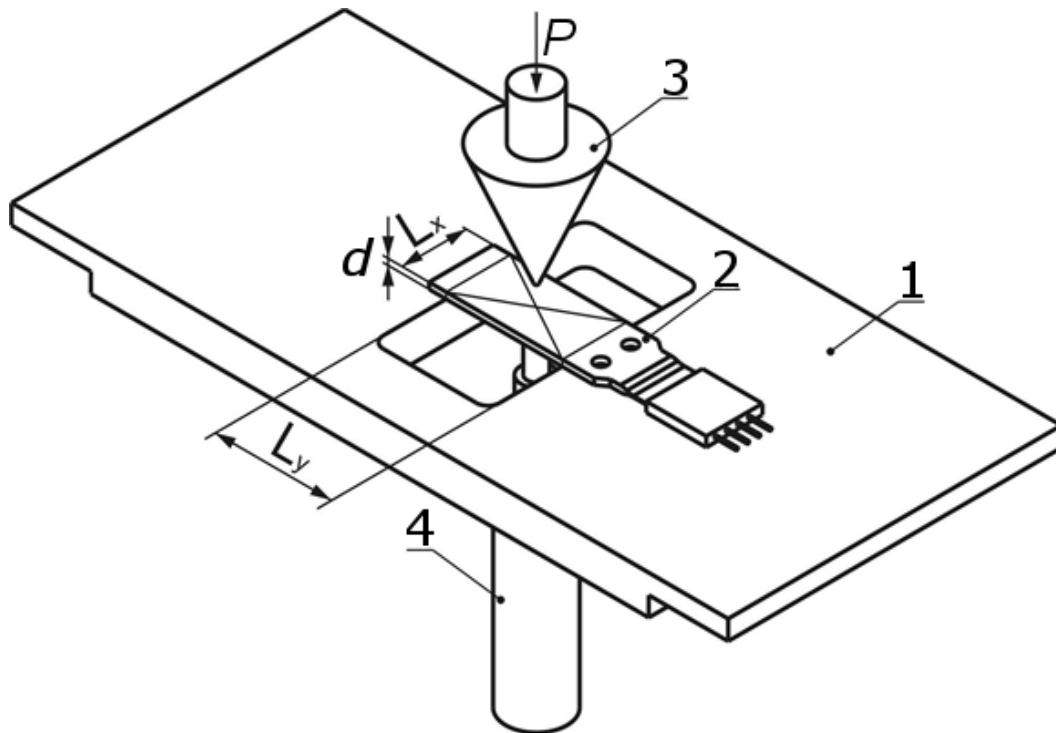
Youngov modul elastičnosti tada možemo izraziti preko izraza za progib (5.1) kao:

$$E = \frac{12 \cdot P \cdot L_x^2}{k_w \cdot d^3 \cdot w} \quad (5.2)$$

Na temelju iznesene teorije obavljena su višekratna mjerenja korištenjem VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein mehaničke kidalice u Laboratoriju za ispitivanje čvrstoće konstrukcija Tehničkog fakulteta u Rijeci (Slika 77). Na kidalicu je postavljen i konzolni sustav za mjerenje sile HBM Z6FD1 te induktivni mjerač progiba HBM W1T3 s mjernom osjetljivošću od 10 V/mm.



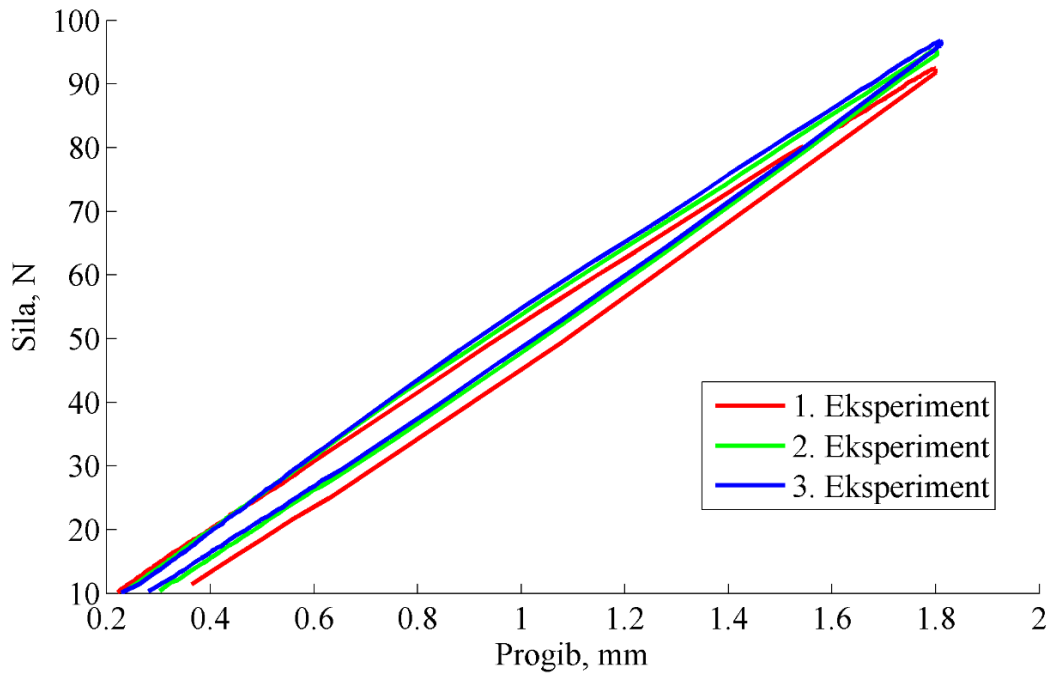
Slika 77. VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein mehanička kidalica: a) mjerач opterećenja, b) specijalni nosač konzole (ovdje vidljiv s boka), c) mjerач progiba i d) pomični dio kidalice



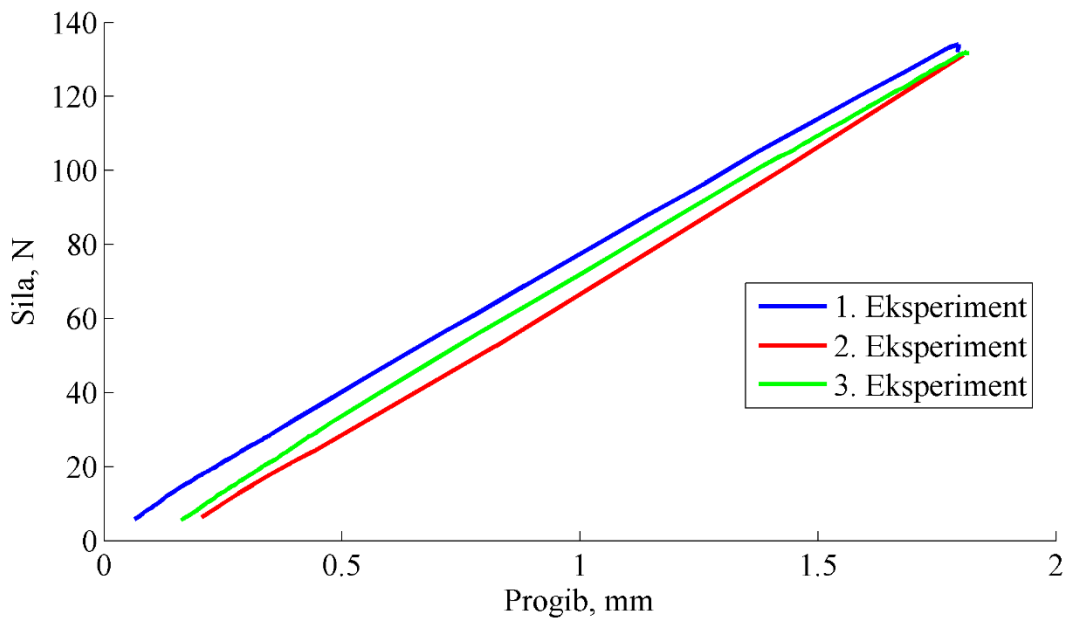
Slika 78. Detalj opreme za provođenje eksperimenta

Mjerenja su izvođena za oba tipa Midé konzola jednostavno oslonjenih na specijalno izrađeni nosač. Prethodno su na nosaču označene konture konzola te su točkalom označene i krajnje granice oslanjanja. Prema predstavljenom modelu proračuna progiba, opterećenje se odvija u točki težišta oslonjene plohe, tako da je bilo potrebno uporabiti konusni element (krajnji radijus 1 mm) za prenošenje opterećenja s kidalice, a radi što točnijeg mjerenja. Slika 78 prikazuje detalje eksperimentalnog postava: 1) specijalni čelični nosač s centralnim utorom, 2) Midé konzola, 3) konusni prijenosnik sile (spojen direktno na mjerac sile HBM Z6FD1) i 4) mjerac progiba HBM W1T3 postavljen točno na mjestu opterećenja.

Ponavljanjem eksperimenta na kidalici unutar ograničenih iznosa progiba, ustanovljen je linearni karakter odnosa sile i deformacije (sa zanemativom histerezom) s ponovljivošću eksperimenata unutar 2% (Slika 79 i Slika 80).



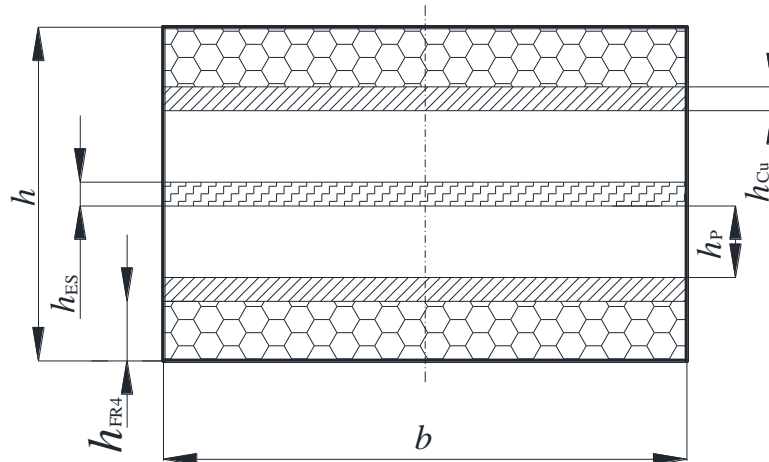
Slika 79. Izmjereni odnos sile i progiba za piezoelektričnu Midé konzolu V21B



Slika 80. Izmjereni odnos sile i progiba za piezoelektričnu Midé konzolu V25W

Na osnovu prikazanih dijagrama izračunata je prosječna vrijednost modula elastičnosti i to: za konzolu V21B u iznosu od 42,2 GPa, te za konzolu V25W 31,2 GPa. Razlike u iznosima modula elastičnosti mogu se pripisati različitim dimenzijama konzola i različitim širinama pojedinih slojeva.

Na temelju metode iznesene u potpoglavlju 3.3.3, nakon mjerenja stvarnih debljina slojeva pod stereomikroskopom (Slika 72.), moguće je izračunati i teorijsku vrijednost modula elastičnosti. Slika 81. prikazuje ilustraciju poprečnog presjeka piezoelektričnih konzola Midé V21B i V25W sa zanemarenim slojevima epoksidnog ljepila



Slika 81. Poprečni presjek piezoelektričnih konzola Midé: V21B i V25W

Pritom su debljine pojedinih slojeva:

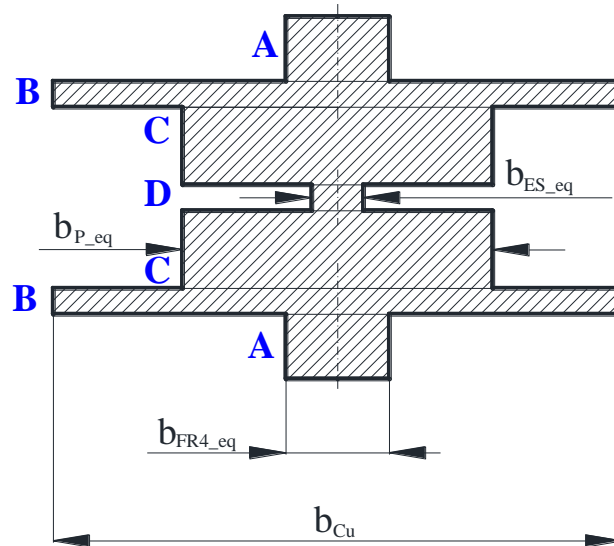
- h – ukupna debljina konzole
- h_{ES} – debljina ESPANEX sloja
- h_{FR4} – debljina FR4 sloja
- h_P – debljina PZT sloja
- h_{Cu} – debljina bakrenog sloja (elektrode).

Debljine slojeva izmjerene na stereomikroskopu, ali su provjerene i u katalogima proizvođača [URL: Civa; Nippon Steel Chemical Ltd.]. Moduli elastičnosti svakog pojedinog materijala prikazani su u nastavku (Tablica 13):

Tablica 13. Debljine slojeva Midé konzola V21B i V25W s pripadajućim modulima elastičnosti

| | V21B | V25W | |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Oznaka sloja | Debljina sloja, μm | Debljina sloja, μm | modul elastičnosti, GPa |
| h_{ES} | 25 | 25 | 4,5 |
| h_{FR4} | 120 | 100 | 23,4 |
| h_P | 225 | 200 | 67 |
| h_{Cu} | 35 | 18 | 110 |

Kao sloj na temelju kojeg su modificirane proračunske širine drugih slojeva i kojim je definiran materijal ekvivalentne konzole odabran je sloj bakrenih elektroda s debljinom h_{Cu} . Poprečni presjek s modificiranim širinama slojeva tada poprima oblik prikazan na sljedećoj slici (Slika 82).



Slika 82. Ekvivalentni presjek bakrene konzole: A) modificirani FR4 sloj, B) sloj bakrene elektrode, C) modificirani piezoelektrični sloj i D) modificirani ESPANEX sloj

Uzimajući u obzir Huygens-Steinerov teorem, moment tromosti presjeka ekvivalentne konzole tada se može napisati kao:

$$I_x = 2I_A + 2I_B + 2I_C + I_D, \quad (5.3)$$

Gdje su I_A , I_C i I_D momenti tromosti poprečnog presjeka modificiranih slojeva definirani kao:

$$I_A = \frac{b_{FR_eq} h_{FR}^3}{12} + b_{FR_eq} h_{FR} \left(\frac{h_{ES}}{2} + h_P + h_{SS} + \frac{h_{FR}}{2} \right)^2 \quad (5.4)$$

$$I_B = \frac{bh_{SS}^3}{12} + bh_{SS} \left(\frac{h_{ES}}{2} + h_P + \frac{h_{SS}}{2} \right)^2 \quad (5.5)$$

$$I_C = \frac{b_{P_eq} h_P^3}{12} + b_{P_eq} h_P \left(\frac{h_{ES}}{2} + \frac{h_P}{2} \right)^2 \quad (5.6)$$

$$I_D = \frac{b_{ES_eq} h_{ES}^3}{12} \quad (5.7)$$

Modificirane proračunske širine slojeva iznose:

$$b_{FR4_eq} = \frac{E_{FR4}}{E_S} b \quad b_{P_eq} = \frac{E_P}{E_S} b \quad b_{ES_eq} = \frac{E_{ES}}{E_S} b \quad (5.8)$$

Nakon proračunske provjere, teorijski iznos savojne krutosti EI_x iznosi $0,034 \text{ Nm}^2$, a eksperimentalno utvrđeni $0,03 \text{ Nm}^2$ za konzolu V21B i $0,039$ odnosno $0,035$ za konzolu V25W Time je potvrđen eksperiment, a ujedno i razvijena metoda za karakterizaciju mehaničkih svojstava višeslojnih uređaja za pretvorbu niskorazinske kinetičke energije vibracija.

5.2.2 Eksperimentalno određivanje koeficijenta mehaničkog prigušenja

U ovom je poglavlju opisana je oprema za eksperimentalno utvrđivanje koeficijenta mehaničkog prigušenja ζ . Ovaj eksperimentalni postav osmišljen i izveden u Laboratoriju za precizno inženjerstvo Tehničkog fakulteta u Rijeci [URL: Precenglab]. Glavni dijelovi korištene opreme istovremeno su i osnova za provođenje eksperimenata za utvrđivanje dinamičkog odziva konzole.

Koeficijent mehaničkog prigušenja ζ najlakše je izmjeriti pri vrlo kratkom udarnom opterećenju konzole. Pri tome blagi udarac alatom može biti izveden na bazi odnosno uklještenju konzole indirektno, ili može biti izveden direktno na slobodnom kraju konzole. Pri udarcu je konzola impulsno pobuđena i počinje slobodno vibrirati do umirenja, što se obično zbiva u vrlo kratkom vremenskom periodu. Nakon udarne uzbude, kontinuiranim praćenjem progiba konzole ili njenog naponskog odziva (pri malim vrijednostima otpora⁴⁸) moguće je zabilježiti karakter slobodnih vibracija sustava. Na taj se način uz pomoć logaritamskog dekrementa odziva konzole izračunava i koeficijent prigušenja ζ .

Slika 83 prikazuje Newport optički stol u Laboratoriju za precizno inženjerstvo, Tehničkog fakulteta u Rijeci s instaliranim National Instruments PXI (NI PXI) [URL: Precenglab] sustavom za prikupljanje podataka i kontrolu temeljenom na LabVIEW v. 8.5 sučelju za grafičko programiranje. NI PXI je robusna modularna PC platforma za mjerenje i automatizaciju sustava temeljena na PXI standardu za računalne sabirnice. Predstavljeni sustav ima široku primjenu, pa se osim laboratorijskih mjerenja koristi i u industriji za mjerenja,

⁴⁸ Ovo svojstvo je bitno radi izbjegavanja elektromehaničkih efekata opisanih u 3.3.5, posebice ukrućenja strukture koje nastupa pri većim iznosima otpora.

kontrolu i upravljanje procesima ili sustavima. Ovdje predstavljeni sustav opremljen je multifunkcionalnom PXI 6221 karticom za prikupljanje podataka i upravljanje sustavima koja ima više analognih i digitalnih ulaza i izlaza. Pri ovim mjerenjima su se koristili analogni ulazi ograničeni sa ulaznim naponskim signalom od ± 10 V. LabVIEW (engl. *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) je softverska platforma napravljena za upravljanje NI PXI sustavom, a bazira se na vizualnom programskom jeziku koji se kratko naziva 'G' i služi za grafičko programiranje sustava za upravljanje i akviziciju podataka.

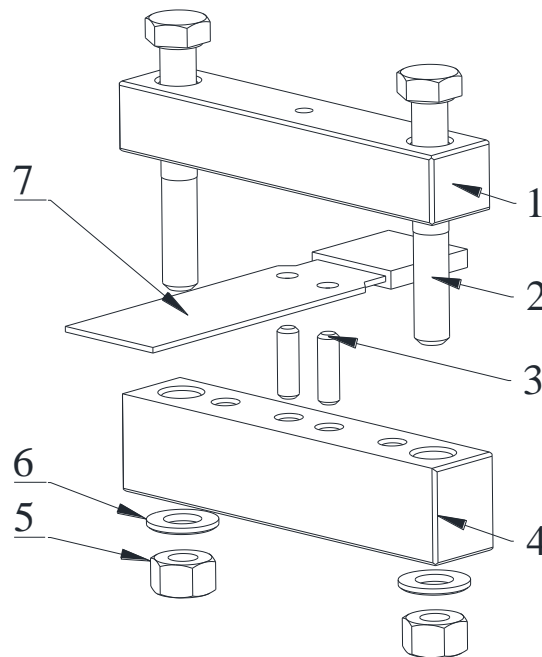
Mjerenje odziva izvedeno je na dva načina: mjerenjem naponskog odziva konzole pri čemu su piezoelektrični slojevi konzole poslužili kao senzor vibracija, te mjerenjem brzine dinamičkog progiba konzole laserskim Doppler vibrometrom MetroLaser VibroMet 500V. Laserski doppler vibrometar je uređaj za precizno, beskontaktno i udaljeno (< 10 m) mjerenje vibracija pomičnih struktura, a rezultati se dobivaju na temelju Dopplerovog efekta. Laserska zraka koju emitira vibrometar odbija se od vibrirajuće strukture, a dio zrake se vraća nazad u vibrometar gdje se na temelju Dopplerovog pomaka frekvencije koji nastupa uslijed vibrirajuće strukture izračunava brzina pomaka strukture. Mjerni raspon vibrometra je od $5 \mu\text{m/s}$ do 1000 mm/s [URL: Metrolaser]. Mjerenje naponskog odziva piezoelektrične konzole, izuzetno je osjetljivo i precizno, toliko da samo malo grublje otvaranje/zatvaranje vrata laboratorija generira napon na konzoli.



Slika 83. Optički stol Newport i sustav za prikupljanje podataka NI PXI

Slika 83 prikazuje optički stol u Laboratoriju za precizno inženjerstvo na koji je bio montiran eksperimentalni postav. Pri provođenju eksperimenta konzola je kruto montirana vijcima na sam rub optičkog stola pomoću jednostavnog mehaničkog uklještenja. Uklještenje je

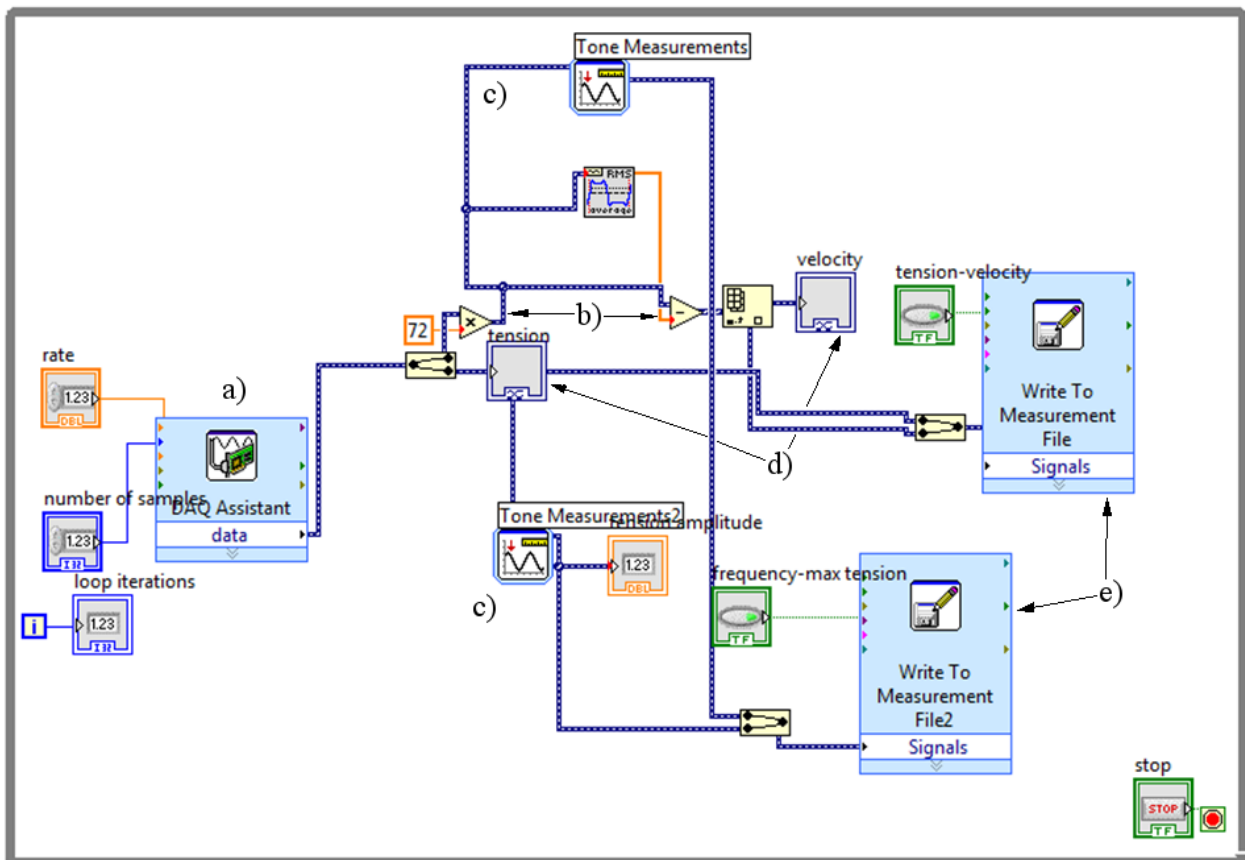
konstruirano kao spoj dviju krutih mjedenih gredica koje se međusobno spajaju M8 vijcima, a između njih se smješta piezoelektrična konzola (Slika 84): 1) gornja gredica uklještenja, 2) vijak M8, 3) zatici za točno pozicioniranje linije uklještenja, 4) donja gredica uklještenja, 5) matica M8, 6) podloška i 7) piezoelektrična konzola Midé. Izlazni kontakti piezoelektrične konzole i vibrometra postavljenog ispod razine stola direktno su spojeni u razvodnu kutiju NI sustava, svaki na svoj zasebni analogni akvizicijski kanal.



Slika 84. Mehaničko uklještenje konzole

Pomoću LabVIEW sučelja programira se tzv. virtualni instrument (engl. *VI – virtual instrument*) odnosno grafički program u 'G' programskom jeziku, kojim je omogućeno vizualiziranje, obrada i pohrana podataka na National Instruments računalu. Ovim se alatom prikupljaju naponski odzivi piezoelektrične konzole te signal brzine pomaka vrha konzole izmjeren s laserskim vibrometrom. Postupak programiranja u LabVIEW sučelju temelji se na tzv. grafičkom programiranju tj. odabiru gotovih blokova funkcija koje su grafički prikazane u virtualnom instrumentu i njihovom međusobnom povezivanju virtualnim 'žicama' čime se omogućava protok ulazno/izlaznih signala (varijabli) svakog funkcijskog bloka. Svakom bloku je potrebno definirati ulazne podatke kao što je npr. frekvencija uzorkovanja ili kanal s kojeg je potrebno obaviti uzorkovanje. Slika 85 prikazuje upotrijebljene funkcijske blokove: a) za prikupljanje podataka, b) za jednostavne aritmetičke operacije potrebne za dekodiranje vrijednosti brzina pomaka konzole, c) za pretvorbu podataka iz vremenske u frekvencijsku

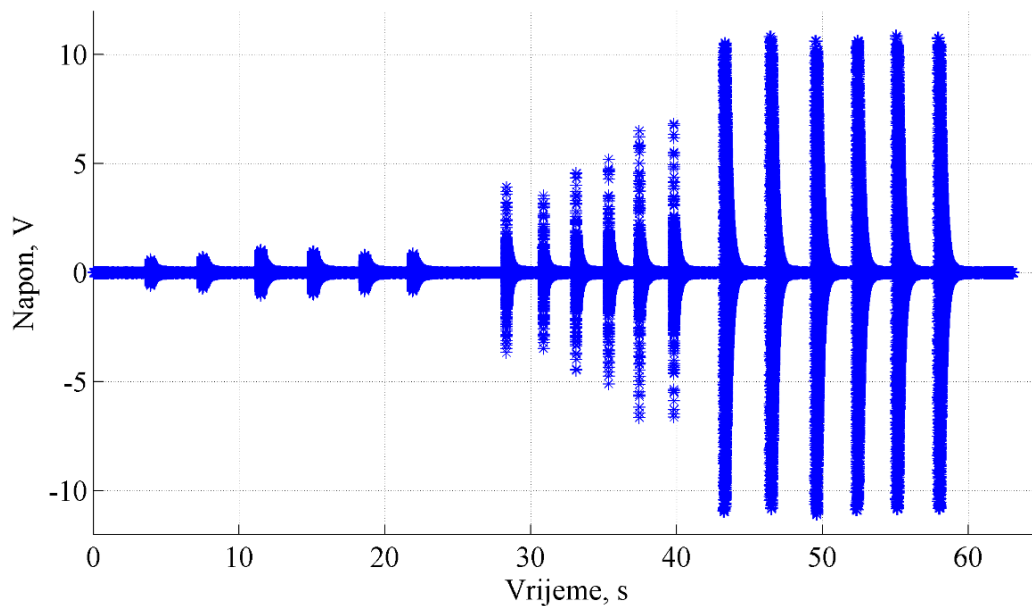
domenu, d) za prikaz podataka kao i e) blokovi za pohranjivanje prikupljenih uzoraka u *.lvm* datotečnom zapisu.



Slika 85. Funkcijski blokovi u LabVIEW virtualnom instrumentu za prikupljanje i obradu podataka naponskog signala, i signala brzine progiba slobodnog kraja konzole.

Višekratni udarni testovi provedeni su direktno i indirektno, tj. udarcem u uklještenje ili blagim udarcem u sam vrh konzole. Slika 86 prikazuje rezultat kontinuiranih mjerenja pri više metoda udarne uzbude i to slijeva nadesno s porastom amplitude odziva:⁴⁹ udarci po stolu, udarci po uklještenju i direktni udarci po konzoli. Prednost indirektna metode je čisti odziv istitravanja, a prednost direktne metode su više amplitude napona i dulje vrijeme istitravanja. Signal proizašao iz direktne metode je nečist utoliko što je potrebno zanemariti prvih nekoliko ciklusa titranja pri kojima je još naglašen utjecaj prisile udarca.

⁴⁹ Najmanju amplitudu imat će odziv udarca po stolu, dok će najvišu amplitudu pokazati direktni udarci u vrh konzole.



Slika 86. Prikaz kontinuiranog mjerenja naponskog odziva pri udarnom testiranju.

Signal vibrometra je bio nejasan i isprekidan za vrijeme vršenja mjerenja. Razlog tomu je tek kasnije otkriven „lutajući“ napon u strujnoj mreži laboratorija koji je izrazito nepovoljno utjecao na vibrometerska mjerenja. Naponski odziv piezoelektričnih konzola savršeno je prikazivao udarno opterećenje i naknadne slobodne vibracije (Slika 87 i Slika 88).

Brzina kojom se smanjuju amplitude prigušenih vibracija omogućava utvrđivanje stupnja prigušenja u sustavu. U dostupnoj literaturi [Beards, 1996] moguće je pronaći rješenje problema pronalazanja koeficijenta prigušenja sustava, poglavito jer je to jedan od klasičnih problema dinamike sustava. U nastavku su dani konačni izrazi metode određivanja logaritamskog dekrementa.

Jednadžba slabo prigušenih vibracija dana je sljedećim izrazom [Krgan et al., 2001.]:

$$y_n = Y_0 e^{-\zeta \omega_n t_n} \cos(\omega_d t - \phi), \quad (5.9)$$

gdje su:

y_n – pomak pri n-tom periodu, m

$Y_0 e^{-\zeta \omega_n t_n}$ – promjenjiva amplituda vibriranja u funkciji vremena, m

ζ – koeficijent prigušenja

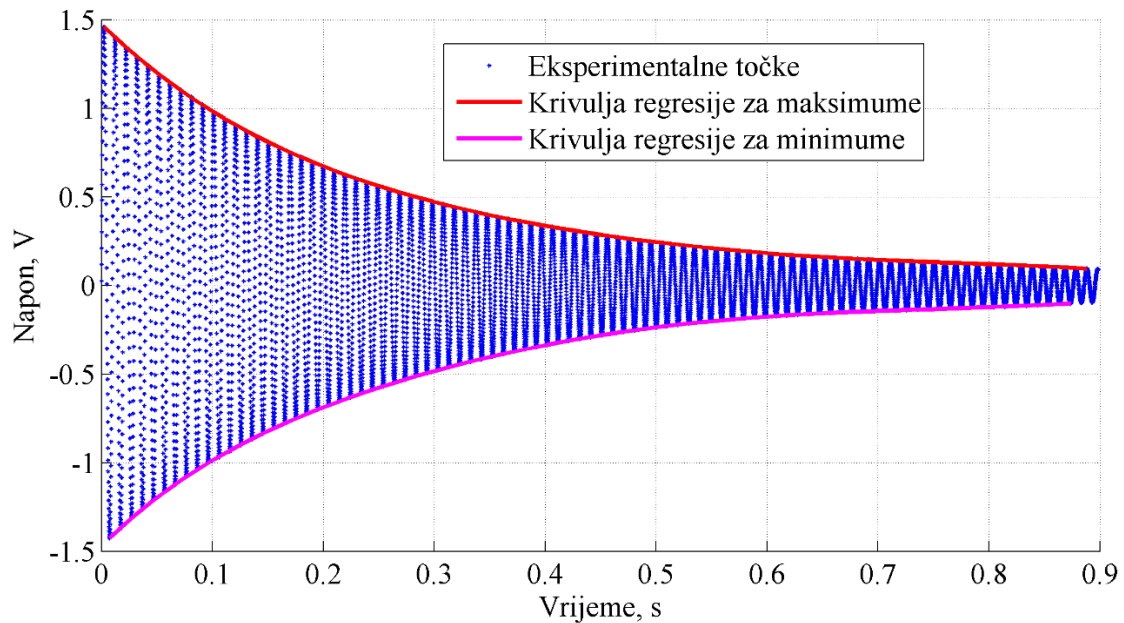
ω_n – vlastita frekvencija sustava, s^{-1}

ω_d – frekvencija prigušenja, $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$, s^{-1}

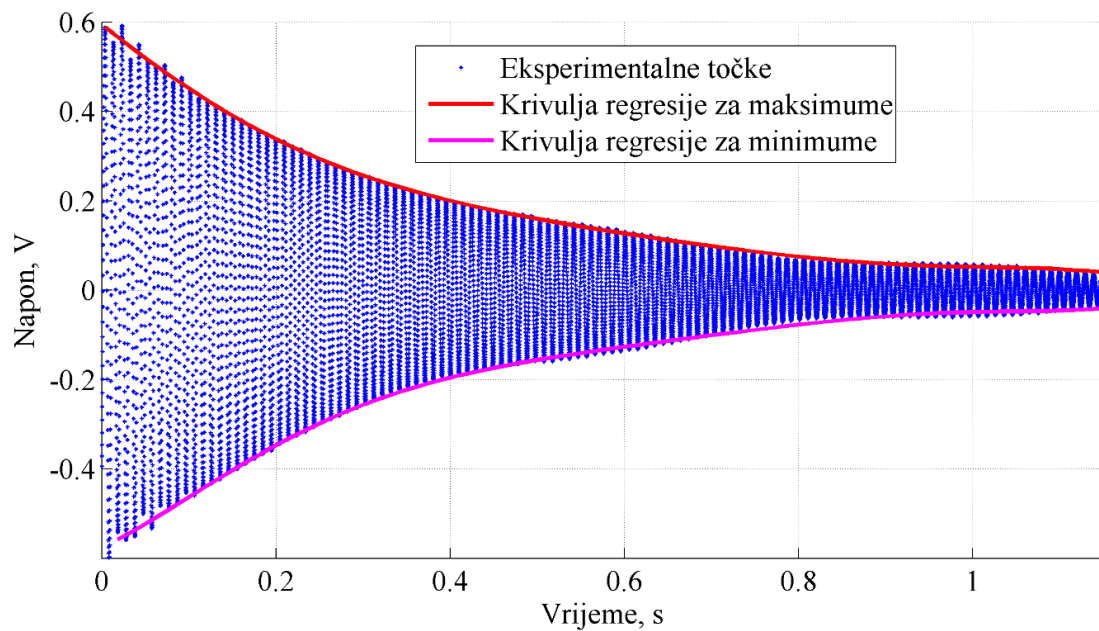
t – vrijeme, s

t_n – vrijeme n-tog maksimuma, s

ϕ – fazni pomak.



Slika 87. Karakter naponskog odziva konzole nakon direktnog udarnog testa



Slika 88. Karakter naponskog odziva konzole nakon udarnog testa na uklještenju

Razmatraju li se slučajevi maksimuma, odnosno slučaj kada je $\cos(\omega_d t - \phi) = 1$, jednadžba (5.9) poprima sljedeći oblik:

$$y_n = Y_0 e^{-\zeta \omega_n t} \quad (5.10)$$

A nakon perioda T_d u sljedećem ciklusu:

$$y_{n+1} = Y_0 e^{-\zeta \omega_n (t+T_d)} \quad (5.11)$$

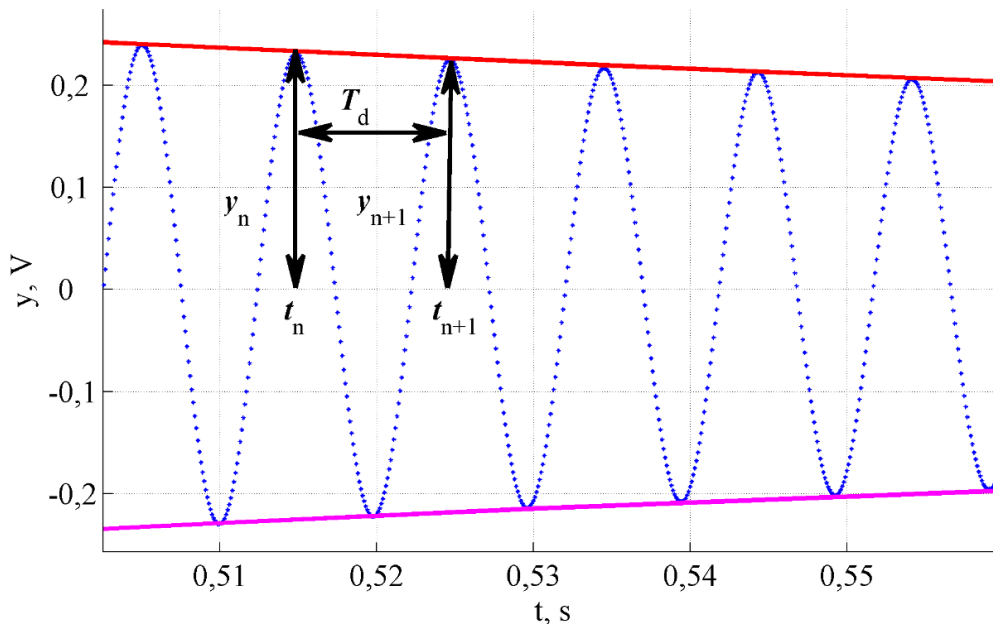
gdje je T_d period prigušenih titraja. Podijele li se izrazi za dvije susjedne amplitude (5.10) i (5.11), logaritamski se dekrement δ može odrediti iz:

$$\frac{y_n}{y_{n+1}} = e^{\zeta \omega_n T_d} \quad (5.12)$$

$$\delta = \ln \left(\frac{y_n}{y_{n+1}} \right) = \zeta \omega_n T_d = \zeta \omega_n \frac{2\pi}{\omega_d} = \zeta \omega_n \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}},$$

i koeficijent prigušenja kao [Krpan et al., 2001.]:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (5.13)$$



Slika 89. Detalj odziva s prikazanim prigušenim amplitudama i vremenom perioda T_d

Na temelju rezultata mjerenja (Slika 87) i jednadžbe (5.13) moguće je izračunati koeficijent prigušenja ako su poznati iznosi sukcesivnih amplituda y_n i y_{n+1} . Uzimajući u obzir više različitih mjerenja i više sukcesivnih prigušenih amplituda pri svakom mjerenju (Slika 89) izračunat je prosjek koeficijenata prigušenja koji iznosi $\zeta = 0,006$ (što je vrlo blizu prethodno pretpostavljenih 0,008).

5.2.3 Eksperimentalni postav za mjerenje dinamičkog odziva

Za potvrdu rezultata analitičkog i numeričkog modela spregnutog elektromehaničkog odziva piezoelektrične konzole za prikupljanje niskorazinske energije vibracija iz okoliša obrađenih u 3. i 4. poglavlju, bilo je potrebno razviti eksperimentalni sustav koji omogućuje kontinuirano mjerenje određenih ključnih veličina kao što su, primjerice, napon, pomak slobodnog kraja konzole i ubrzanje uklještenja. Mjerenje dinamičkog odziva piezoelektričnih konzola također uključuje i harmonijsko pobuđivanje uklještenja pri točno određenim frekvencijskim rasponima bliskima prvoj vlastitoj savojnoj frekvenciji konzole, te mogućnost kontroliranja otpora radnog trošila. Dinamički eksperimenti na Midé konzolama prvo su provedeni u Laboratoriju za mehaniku pri Sveučilištu u Udinama, a kasnije i u Laboratoriju za precizno inženjerstvo pri Tehničkom Fakultetu Sveučilišta u Rijeci. U nastavku su opisane procedure dinamičkih eksperimenata u obama Laboratorijima.

5.2.3.1 Temeljne postavke eksperimenta

Radi ostvarivanja mogućnosti usporedbe s analitičkim rješenjem potrebno je uspostaviti nekoliko temeljnih uvjeta kontrole eksperimenta:

1. Uzbuda uklještenja treba biti harmonijska translatorna bez rotacije (ili s jako malom rotacijom):
 - Ovaj uvjet slijedi iz pretpostavke u analitičkom modelu opisanom u 3.2.1.
2. Amplituda ubrzanja treba biti konstantna u cijelom frekvencijskom rasponu uzbude (uključuje aktivno prilagođavanje amplitude vibracija):
 - Konstantna amplituda ubrzanja je nužna radi mogućnosti usporedbe sa završnim elektromehaničkim izrazom naponskog odziva (3.74) koji je prirodno normaliziran s amplitudom uzbudne frekvencije.

3. Točka težišta utega mora biti na rubu konzole (granični uvjet analitičkog modela):
 - Taj je uvjet temeljen na početnim pretpostavkama analitičkog modela opisanog u točki 3.2.1, ali i u analizi vlastitih vrijednosti opisanoj u točki 3.1.3.
4. Elektrode trebaju biti serijski spojene:
 - Uvjet temeljen na pretpostavkama analitičkog modela opisanog u točki u 3.2.1.
5. Struktura konzole treba biti bimorfna s jednim slojem supstrata i dvama slojevima piezoelektrika:
 - Ovakva je struktura klasičnog piezoelektričnog pretvarača opisana u točki 3.2.1.

5.2.3.2 Eksperimentalni postav u Laboratoriju za mehaniku na Sveučilištu u Udinama

Eksperimenti u Laboratoriju za mehaniku, Sveučilišta u Udinama provedeni su na postavu koji je uključivao istovremeno mjerenje napona na radnom trošilu, ubrzanja na uklještenju i pomaka vrha konzole (Slika 92 i Slika 93). Harmonijska uzbuda uklještenja dobivena je pomoću vibracijskog uzбудnika (Slika 90) pri konstantnom ubrzanju. Kako bi se zadržao konstantan iznos ubrzanja pri kontinuiranoj promjeni frekvencije uzbude, bilo je potrebno aktivno algoritamski prilagođavati amplitudu pomaka uklještenja uzimajući u obzir izmjereno ubrzanje na uklještenju.⁵⁰ Radno trošilo je predstavljeno u obliku dva jednostavna potenciometra promjenjivog otpora s ucrtanom $k\Omega$ skalom (Slika 91, desno). Nakon utvrđivanja vlastitih frekvencija konzola udarnim testom, vršena su višestruka ponavljajuća mjerenja u uskom rasponu oko prve vlastite savojne frekvencije (± 3 Hz) za oba tipa konzole, i to pri s različita iznosa mase utega M_t .⁵¹ Utezi su lijepljeni na konzolu pomoću ljepila za papir, a višak ljepila je istisnut tijekom primjene pritiska na mjesto lijepljenja. Ovakvo ljepilo je odabrano jer ono nakon sušenja tvori kruti spoj sa strukturom na koju se objekt lijepi, a lako ga je odstraniti. Iznos otpora R_1 mijenja se pomoću potenciometra u širokom rasponu od jako malih vrijednosti otpora (uvjeti kratkog spoja) do visokih vrijednosti otpora (10^2 k Ω) i to, sukcesivno, u sljedećim iznosima (k Ω): 0, 21,9, 66, 111, 156, 2, 206, 219, 262, 333, 421, 502, 606, 651. Tablica 14

⁵⁰ Algoritam je prikazan u 4.5. Povećanjem frekvencije proporcionalno se smanjuje pomak kako bi se zadržao konstantan iznos ubrzanja.

⁵¹ Korišteni su standardni Midé utezi od volframa; V21B: 2,4 g, 4,8 g i 7,2 g; V25W: 7,8 g, 15,6 g i 23,4 g.

prikazuje postavke dinamičkog eksperimenta, i to korištene uzbudne frekvencije, rezonantne frekvencije konzola, ubrzanje uzбудnika te korištene utege i vrste piezoelektričnih konzola.

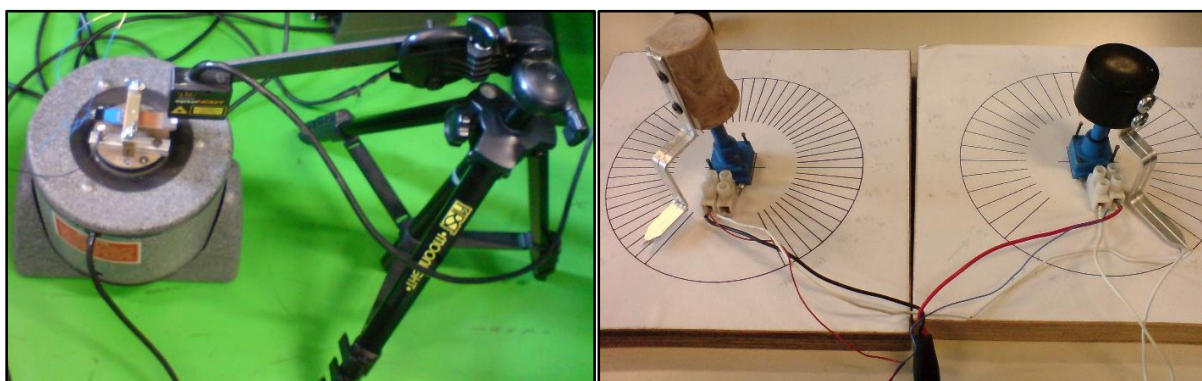
Eksperimentalni postav uključivao je sljedeću opremu:

- precizni akcelerometar temeljen na piezoelektričnim osjetnicima za mjerenje ubrzanja na uklještenju (Slika 92, b i Slika 93, b). [URL: B&K 4375]
 - Bruel&Kjaer 4375, serija 1623394 s faktorom osjetljivosti $0,315 \text{ pC}/(\text{m/s})^2$
- laboratorijski elektromagnetski vibracijski uzбудnik temeljen na tehnologiji linearnog *voice coil*⁵² motora (Slika 92, a i Slika 93, a). [URL: MB Dynamics]
 - MB Dynamics PM25A s maksimalnim ubrzanjem bez tereta od 50 G i rasponom frekvencija od 5 – 10000 Hz
- laserski vibrometar korišten za mjerenje pomaka konzole (Slika 92, e i Slika 93, e) [URL; Micro-Epsilon Messtechnik]
 - Micro-Epsilon Messtechnik optoNCDT 1605 s naponskim izlazom: 0 - 10 V
- generator sinusoidalnog signala, koji služi za simuliranje harmonijske uzbude u zadanom rasponu frekvencija i amplituda osciliranja [URL: B&K 1047]
 - Bruel&Kjaer 1047
- pojačalo za pojačavanje slabog sinusoidalnog signala iz generatora, a služi za napajanje vibracijskog uzбудnika [URL: B&K 2635]
 - Bruel&Kjaer 2635
- sustav za akviziciju podataka, baziran na LabVIEW programskom sučelju, opisan u točki 5.2.2 [URL: NI PXI-1042]
 - National Instruments NI PXI-1042

⁵² *Voice coil* motor temelji se na istim principima na kojima rade i audio zvučnici. Kroz zavojnicu se propušta električna struja koja rezultira induciranim magnetskim poljem. Inducirano magnetsko polje, ovisno o predznaku, reagira s permanentnim magnetom u uzбудniku te se time ostvaruje kontrolirani pomak.



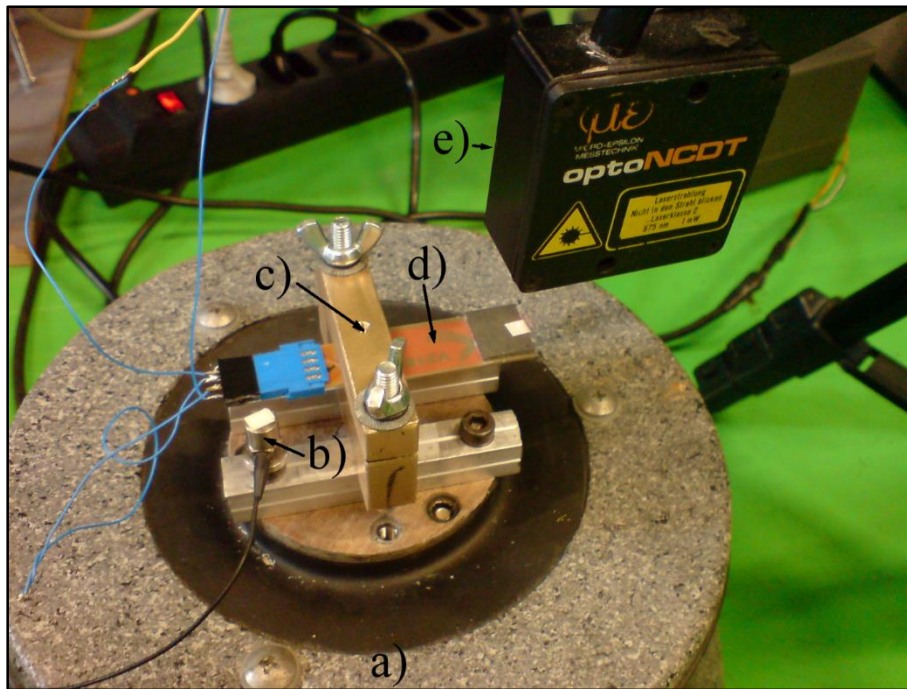
Slika 90. Ukliještena piezoelektrična konzola s utegom na slobodnom kraju postavljena na elektromagnetski vibracijski uzбудnik MB Dynamics PM25A



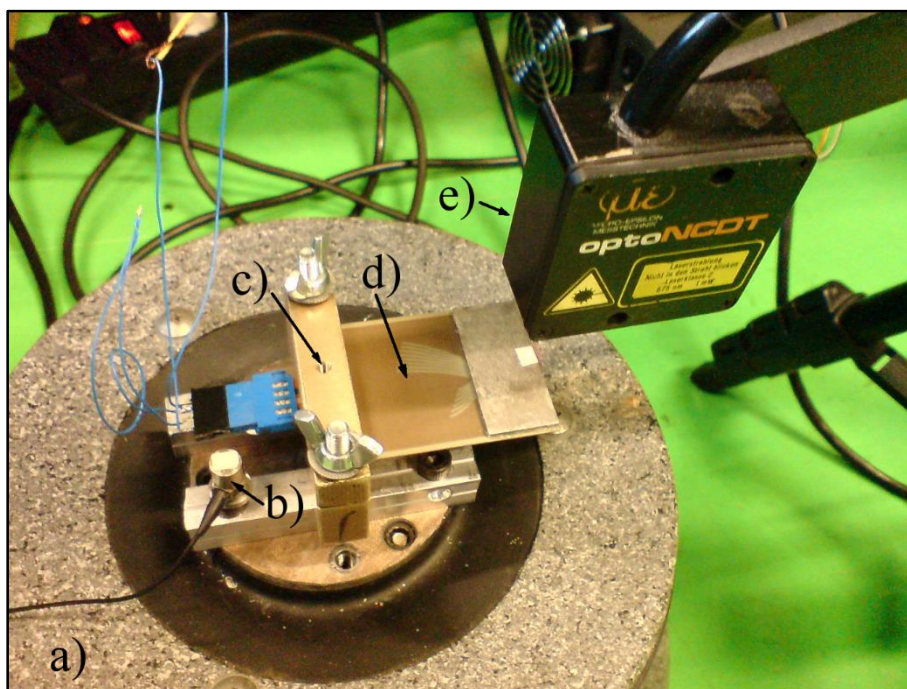
a)

b)

Slika 91. a) Dio eksperimentalnog postava i b) potenciometri korišteni za promjenu otpora R_1



Slika 92. Eksperimentalni postav: a) vibracijski uzбудnik MB Dynamics PM25A, b) akcelerometar Bruel & Kjaer 4375, c) uklještenje, d) piezoelektrična konzola Midé V21B, i e) laserski vibrometar Micro-Epsilon Messtechnik optoNCDT 1605



Slika 93. Eksperimentalni postav: a) vibracijski uzбудnik MB Dynamics PM25A, b) akcelerometar Bruel & Kjaer 4375, c) uklještenje, d) piezoelektrična konzola Midé V25W, i e) laserski vibrometar Micro-Epsilon Messtechnik optoNCDT 1605

Tablica 14. Dizajn dinamičkog eksperimenta i korištene veličine

| Red. br. eksper. | M_t , g | f_{vlastito} , Hz | f_{uzbuda} , Hz | R_i , k Ω | \ddot{z} , ms ⁻² |
|------------------|-----------|----------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Midé V21B | | | | | |
| Eksperiment #1 | 7,2 | ≈ 106 | 103 - 109 | 0 - 651 | 0,633 |
| Eksperiment #2 | 4,8 | ≈ 125 | 122 - 128 | 0 - 651 | 0,633 |
| Eksperiment #3 | 2,4 | ≈ 163 | 160 - 166 | 0 - 651 | 0,633 |
| Midé V25W | | | | | |
| Eksperiment #4 | 23,4 | ≈ 45 | 42 - 48 | 0 - 651 | 0,633 |
| Eksperiment #5 | 15,6 | ≈ 53 | 50 - 56 | 0 - 651 | 0,633 |
| Eksperiment #6 | 7,8 | ≈ 71 | 68 - 74 | 0 - 651 | 0,633 |

Eksperimentima su utvrđeni naponski odzivi te su izmjereni pomaci slobodnog kraja konzole i to za oba tipa piezoelektrične konzole i tri različita utega na slobodnom kraju. Rezultati eksperimenata obrađeni su i uspoređeni s rezultatima analitičkih i numeričkih modela u točki 5.3.

5.2.3.3 Eksperimentalni postav u Laboratoriju za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci

Nakon prethodno opisanog eksperimentalnog postava i provedenih eksperimenata na Sveučilištu u Udinama, pristupilo se razradi eksperimentalnog postava na Sveučilištu u Rijeci, a u sklopu Laboratorija za precizno inženjerstvo.

Razvojem ovog postava trebalo se obaviti detaljnije ispitivanje piezoelektričnih pretvarača na matičnoj instituciji. Kao što je opisano u nastavku ove točke, postav konačno nije poslužio za dobivanje detaljnijeg uvida u dinamiku sustava zbog drugačije arhitekture postava kojom je omogućena prevelika rotacija uklještenja, ali je korišten za izradu i ispitivanje prototipa u poglavlju 6.



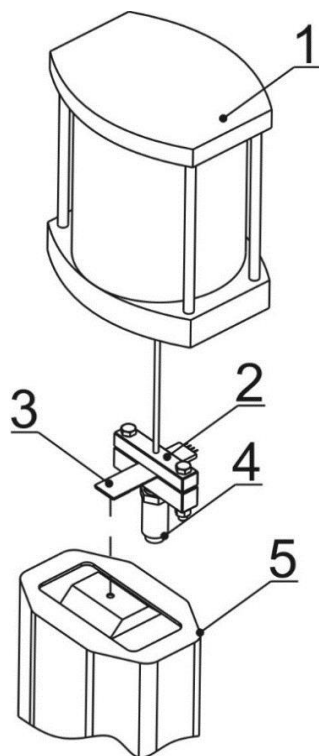
Slika 94. Eksperimentalni postav u Laboratoriju za precizno inženjerstvo: a) vibracijski uzбудnik Schenk AG Vibroexciter 41, b) uklještenje konzole, c) akcelerometar Schenk AS-020, d) laserski vibrometar MetroLaser VibroMet 500V, e) upravljačka jedinica vibrometra, f) upravljačka jedinica akcelerometra, g) potencijometri, h) upravljačka jedinica vibracijskog uzбудnika, i) osciloskop

Prikazani postav uključuje (Slika 94):

- akcelerometar s piezoelektričnim osjetnicima za mjerenje ubrzanja na uklještenju (Slika 94, c) [URL: Schenk AS-020]
 - Schenk AS-020 s faktorom osjetljivosti $10,2 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ i gornjim mjernim granicama frekvencija do 15 kHz i ubrzanja do 800 ms^{-2} ,
- elektromagnetski vibracijski uzбудnik (Slika 94, a)
 - Schenk AG Vibroexciter 41, baziran na istoj voice coil tehnologiji opisanoj u 5.2.3.2,

- laserski vibrometar za mjerenje pomaka konzole (Slika 94, d) [URL: Metrolaser]
 - MetroLaser VibroMet 500V opisan u 5.2.2 s naponskim izlazom 0 – 10V i mjernim rasponom 5 $\mu\text{m/s}$ - 1000 mm/s,
- generator i pojačalo sinusoidalnog signala za vibracijski uzбудnik (Slika 94, h)
 - Vibropower 41
- sustav za prikupljanje podataka [URL: NI PXI-8196]
 - National Instruments NI PXI 8196/6221 temeljen na LabVIEW programskom sučelju, a opisan u potpoglavlju 5.2.2.

Izlazni signali piezoelektrične Midé konzole, akcelerometra i vibrometra spojeni su na analogne ulaze razvodne kutije NI sustava i povezani na PXI 6221 karticu (opisana u poglavlju 5.2.2) za prikupljanje podataka. U LabView programskom sučelju dodatno je grafički programiran virtualni instrument za uzorkovanje, obradu i pohranjivanje podatkovnih signala proizašlih iz navedene mjerne opreme (Slika 85). Eksperimenti provedeni su jednakom metodologijom kao i u prethodno opisanom eksperimentu (Tablica 14):



Slika 95. Detalj eksperimentalnog postava u Laboratoriju za precizno inženjerstvo: 1) vibracijski uzбудnik, 2) uklještenje, 3) piezoelektrična konzola, 4) akcelerometar, 5) vibrometar

Uzбудnik korišten u ovim eksperimentima nije bio idealno rješenje, ali je bio dostupan. Naime, za razliku od teškog seizmičkog uzbudnika korištenog u Laboratoriju za mehaniku Sveučilišta u Udinama koji je stajao na podu, ovaj vibracijski uzбудnik je ovješena na vrlo podatljivu oprugu koja omogućava visoku razinu prigušenja. Upravljačka jedinica vibracijskog uzbudnika korištena u ovom eksperimentu ima mogućnost kontrole uzbudne frekvencije, automatiziranu promjenu raspona harmonijske uzbude, ali i uzбудu nasumičnim vibracijama. Od ostalih uzbudnih faktora moguće je kontrolirati uzbudnu silu u fiksnom rasponu od 1 – 10 N (u inkrementima od po 1 N), što znatno ograničava provođenje eksperimenta zbog nemogućnosti držanja konstantne akceleracije na uklještenju. Dodatno ograničenje je prisutno i zbog nemogućnosti prikupljanja signala s amplitudom većom od ± 10 V. Naime, korišteni National Instruments PXI sustav je ograničen ovim iznosom amplitude ulaznog signala (kao što je opisano u potpoglavlju 5.2.2), pa je stoga bilo potrebno koristiti i transformator. Transformator je specijalno izveden za ovaj eksperiment i koristio se za smanjivanje vrijednost izlaznog napona 2,1 puta, a temeljen je na operacijskom pojačalu TL072 [URL: TL072].

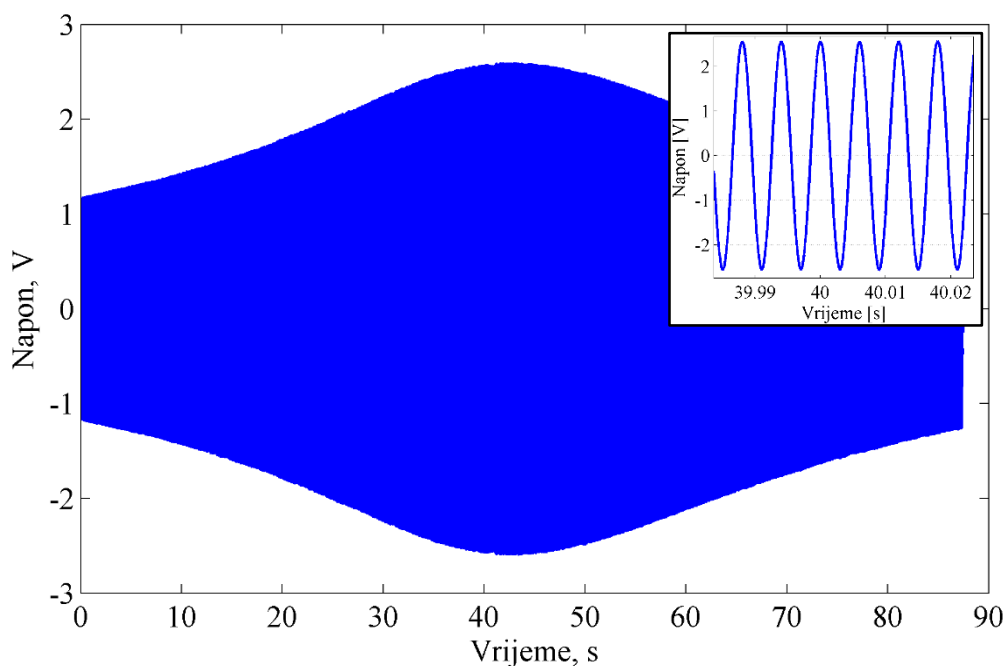
Uklještenje se na uzбудnik spaja putem tanke duge šipke (ϕ 3mm) s navojnim krajem. Nakon provođenja eksperimenta na temelju podataka akcelerometra i vibrometra, postalo je razvidno da se dobiveni rezultati neće moći uspoređivati s teorijskim modelima. Naime, spomenuta tanka šipka koja spreže uklještenje s uzbudnikom pokazala se izrazito podatljivom i omogućavala je znatno zakretanje uklještenja oko njegove uzdužne osi (os poprečna na konzolu). Ovaj učinak je bio najizraženiji u rezonantnom području. Time se narušavaju temeljne pretpostavke analitičkog modela u kojima je uklještenje kruto vezano za bazu i bio bi potreban potpuno novi model koji bi uključivao i faktor podatljivosti spojne šipke u početnim pretpostavkama.

Zbog nedostataka ovog eksperimentalnog postava, usporedba eksperimentalnih rezultata s onima dobivenim iz analitičkih i numeričkih simulacija, obavljena je samo rezultatima eksperimenata provedenih u Laboratoriju za mehaniku na Sveučilištu u Udinama. Ovaj postav ipak je korišten i to za razvoj i ispitivanje inovativnog rješenja uređaja za autonomno i bežično mjerenje tlaka u automobilskim gumama u poglavlju 6.

5.3 Usporedba eksperimenata i modela

Eksperimenti provedeni u Laboratoriju za mehaniku na Sveučilištu u Udinama opisani u 5.2.3.2, rezultirali su zasebnim datotečnim zapisom za svaki provedeni eksperiment i to za svaki korišteni otpor, obje konzole i tri različite mase utega. Struktura datoteke je matrična i sastoji se od četiri stupca: 1) vrijeme, 2) ubrzanje,⁵³ 3) napon i 4) pomak.

Svaki eksperiment je trajao otprilike 90 s, a provedeno je više od 80 eksperimenata. Da bi usporedba mjerenja s analitičkim rješenjem i harmonijskom analizom proizašlom iz ANSYS-a bila moguća, podatke prikupljene u vremenskoj domeni treba transformirati u frekvencijsku domenu posredstvom Fourierove transformacije (transformacija je izvedena `fft` naredbom u MATLAB-u).⁵⁴ Kao primjer izmjerenih i pohranjenih podataka dan je grafički prikaz datotečnog zapisa naponskog odziva piezoelektrične konzole u vremenskoj domeni s uvećanim detaljem odziva (Slika 96) u kojem su spremljeni podaci za eksperiment s konzolom V21B, otporom od 651 k Ω , sinusoidalnom uzbuđom od 163 Hz do 169 Hz i jednim utegom od 2,4 g.

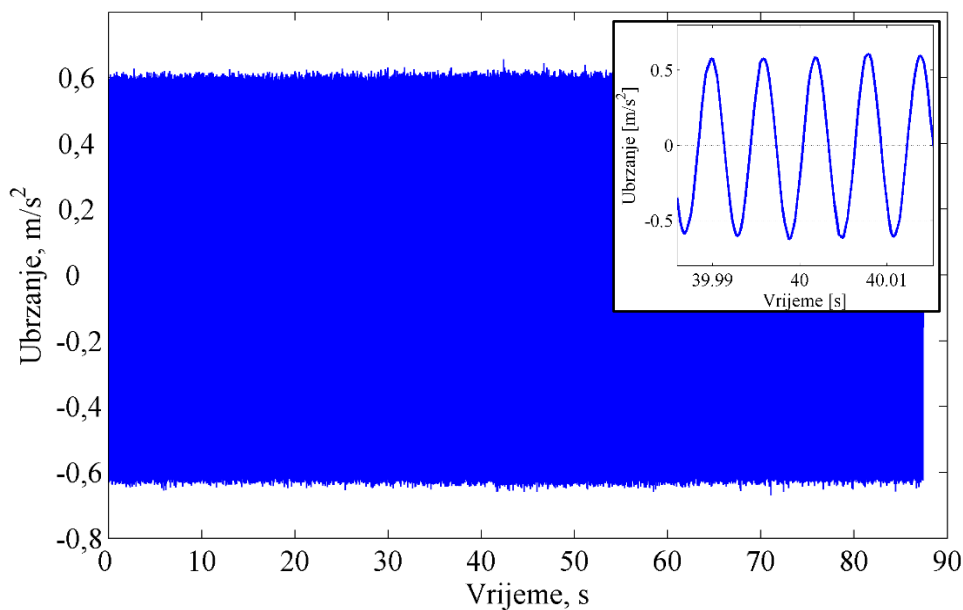


Slika 96. Promjena napona s vremenom tijekom jednog eksperimenta te uvećani detalj sinusoidalnog odziva

⁵³ Podatke ubrzanja je potrebno podijeliti s 0,0036 V/ms⁻² radi dobivanja stvarnih vrijednosti.

⁵⁴ Treba uzeti u obzir da Fourierova transformacija transformira i iznose amplitude koje treba naknadno skalirati stvarnim vrijednostima.

Kao što je napomenuto u temeljnim postavkama dinamičkog eksperimenta u poglavlju 5.2.3.1, jedan od osnovnih uvjeta je i održavanje konstantne amplitude ubrzanja uklještenja, a radi usporedbe s analitičkim izrazom (3.74). Održavanje konstantne amplitude ubrzanja moguće je samo uz aktivno prilagođavanje uzbudne amplitude pomaka elektromagnetskog uzбудnika pri promjeni uzbudne frekvencije, a na temelju akcelerometarskih očitavanja.⁵⁵ Slika 97 grafički prikazuje akcelerometarska mjerenja ubrzanja na uklještenju s vidljivom konstantnom maksimalnom amplitudom od $\pm 0,633 \text{ m/s}^2$, a za iste eksperimentalne uvjete pri kojima je dobiven naponski odziv (Slika 96).



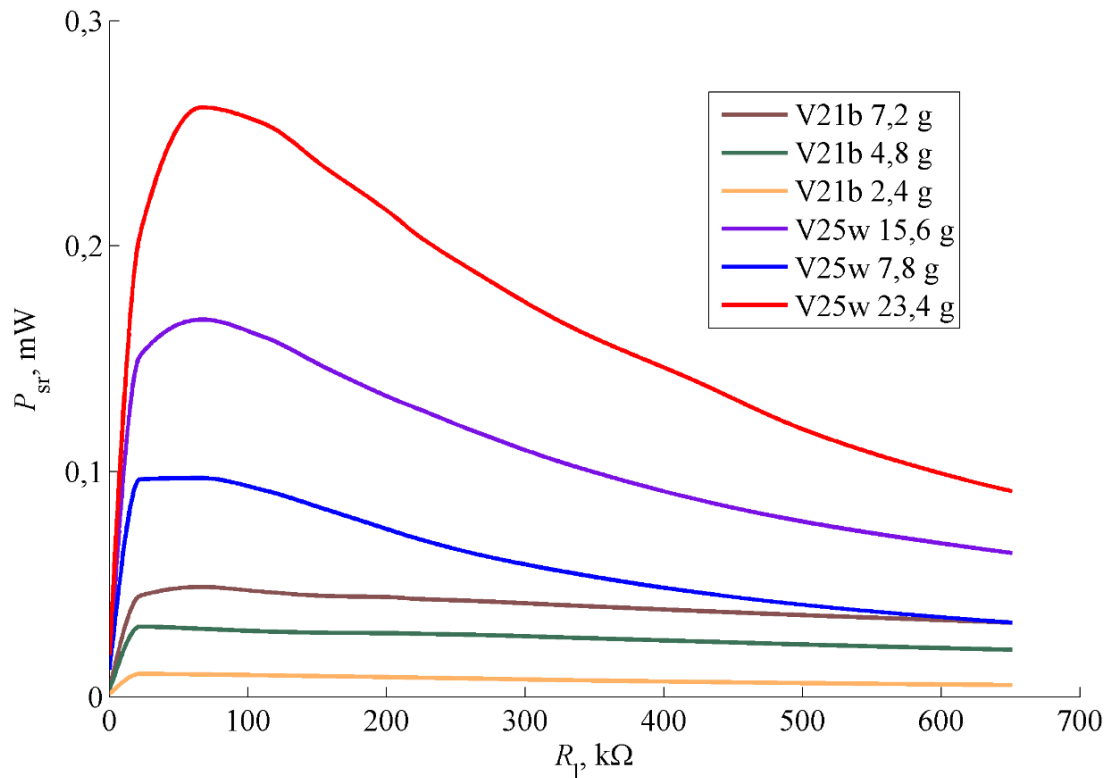
Slika 97. Konstantna amplituda ubrzanja od $0,633 \text{ ms}^{-2}$

Analizom prikupljenih rezultata bilo je moguće dobiti preliminarnu ocjenu snage dostupne u sustavu u ovisnosti o vrijednosti radnog trošila i mase utega (Slika 69).⁵⁶

Iz ove prve procjene vidljivo je da konzola V25W omogućava postizanje veće snage (proporcionalno masi utega). S utegom od 23,4 g razvija maksimalnu snagu od 0,26 mW pri otporu od 65 k Ω . S konzolom V21B razvija se maksimalna snaga od 0,05 mW s utegom mase 7,2 g pri otporu od 70 k Ω .

⁵⁵ Algoritam prilagodbe amplitude pomaka prikazan je u potpoglavlju 4.5.1

⁵⁶ U ovom prikazu nisu korištene normalizirane vrijednosti već sirovi podaci.



Slika 98. Snaga u ovisnosti o električnom otporu za različite mase utega i oba tipa konzoli

Tablica 15. Svojstva materijala Midé konzola

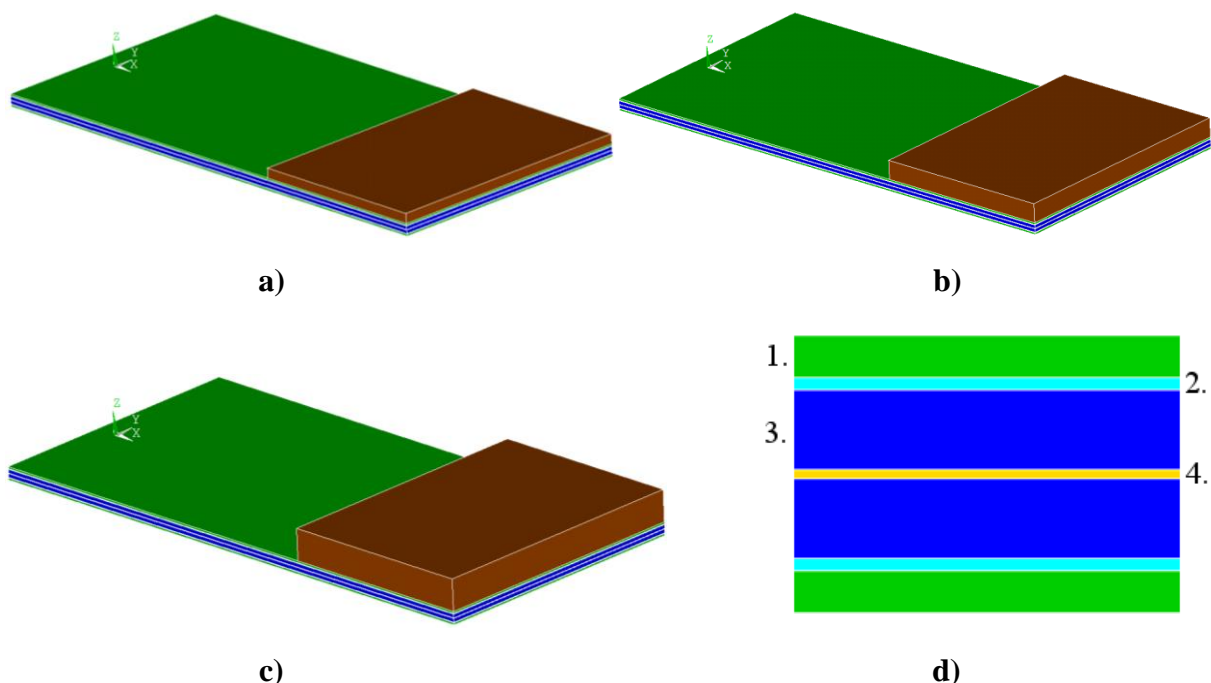
| Veličina | Jedinica | Simbol | Iznos |
|---|-------------------|-------------------------|------------------|
| Modul elastičnosti Cu | GPa | E_s | 110 |
| Modul elastičnosti PZT mjereno pri uvjetima konstantnog električnog polja | GPa | $E_p = \bar{c}_{11}^E$ | 67 |
| Modul elastičnosti ESPANEX | GPa | E_{ES} | 4,5 |
| Modul elastičnosti FR4 | GPa | E_{FR} | 23,4 |
| Gustoća Cu | kg/m ³ | ρ_s | 8940 |
| Gustoća PZT | kg/m ³ | ρ_p | 7800 |
| Gustoća ESPANEX | kg/m ³ | ρ_{ES} | 1430 |
| Gustoća FR4 | kg/m ³ | ρ_{FR} | 1920 |
| Gustoća W (uteg) | kg/m ³ | ρ_{Mt} | 19250 |
| Masa utega V21B (1x, 2x, 3x) | g | M_t | 2,4, 4,8 i 7,2 |
| Masa utega V25W (1x, 2x, 3x) | g | M_t | 7,8, 15,6 i 23,4 |
| Piezoelektrična konstanta | C/m ² | \bar{e}_{31} | -11,585 |
| Konstanta permitivnosti mjerena pri konstantnoj deformaciji | nF/m | $\bar{\epsilon}_{33}^S$ | 830 |
| Mehaničko prigušenje konzole | - | ζ | 0,006 |
| Kapacitet konzole V21B | nF | C_p | 26 |
| Kapacitet konzole V21B | nF | C_p | 130 |

5.3.1 Svojstva materijala Midé konzole

Prethodno je definirana geometrija piezoelektričnih Midé konzola za prikupljanje niskorazinske kinetičke energije vibracija iz okoliša (Slika 69 i Slika 70) te su izmjerene debljine njihovih slojeva (Tablica 13). U Tablici 15 nalaze se pak svojstva materijala slojeva Midé konzola prikupljena iz literature dok je koeficijent prigušenja ζ dobiven mjerenjima opisanim u poglavlju 5.2.2. [URL: Midé Technology Corporation, 2009.; Midé Technology Corporation², 2009.; Ražnjević, 1997.]

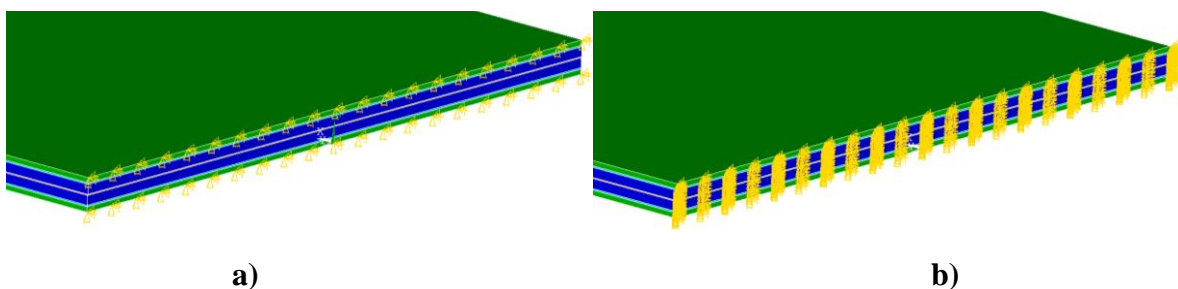
5.3.2 ANSYS model Midé piezoelektrične konzole

Dok je u 4. poglavlju modeliran piezoelektrični bimorf s ukupno tri sloja, ovdje je prikazan numerički model piezoelektrične konzole s ukupno sedam slojeva po uzoru na laminiranu konstrukciju Midé konzola (Slika 81). Utezi su također modelirani po standardnim dimenzijama Midé volframovih utega za ugađanje frekvencije, dok je položaj utega usklađen s položajem utega u eksperimentima (težište utega pomaknuto bliže uklještenju).



Slika 99. ANSYS model Midé konzole V21B s tri različita utega: a) 2,4 g, b) 4,8 g, c) 7,2 g i d) uvećani isječak presjeka konzole s jasno vidljivim slojevima: 1. FR4 sloj (zeleno), 2. bakreni sloj (tirkizno), 3. piezoelektrični sloj (plavo) i 4. ESPANEX sloj (žuto).

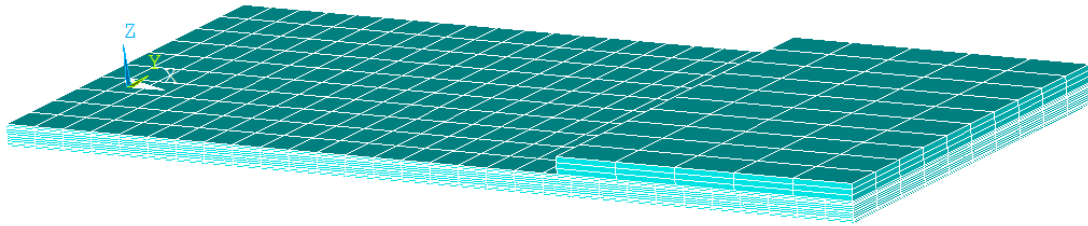
Za razliku od teorijski razmatrane bimorfne strukture u poglavljima 3 i 4, Midé konzole imaju kompleksniju strukturu, a prisutna je i temeljna razlika u načinu izvođenja uklještenja. U 4. poglavlju je uklještenje modelirano tako da je svim čvorovima po debljini konzole na uklještenom kraju konzole ($x = 0$) onemogućeno gibanje u svim smjerovima. Međutim, stvarno mehaničko uklještenje korišteno u eksperimentima (Slika 84) izvedeno je na drugačiji način. Stvarno uklještenje zapravo onemogućava gibanje samo ruba krajnjih slojeva⁵⁷ piezoelektričnog bimorfa, ali posljedično i cijelog uklještenog kraja pri koordinati $x = 0$. Slika 100 prikazuje opisane razlike pri modeliranju uklještenja u ANSYS-u: a) stvarni slučaj kojim je onemogućeno gibanje samo rubnih čvorova krajnjih FR4 slojeva na liniji uklještenja i b) druga mogućnost koja uključuje onemogućavanje gibanja svih čvorova na liniji uklještenja. Ova razlika ima značajan utjecaj na temeljnu frekvenciju sustava što je pokazano preliminarnim modalnim analizama u ANSYS-u. U slučaju kada su uklješteni svi slojevi (Slika 100, b), zbog krucceg uklještenja raste vlastita frekvencija sustava i rezultati se udaljavaju od eksperimentalnih vrijednosti, dok se u slučaju uklještenja samo rubnih slojeva linije uklještenja (Slika 100, a) postižu rezultati bliski eksperimentalnima.



Slika 100. Prikaz dvaju različitih pristupa modeliranja uklještenja: a) uklješteni samo čvorovi na krajnjim plohama i b) uklješteni krajnji čvorovi svih slojeva konzole.

Pri umrežavanju korištene su smjernice iz 4. poglavlja u kojem je napravljena analiza osjetljivosti utjecaja tipa i gustoće mreže elemenata na krajnji rezultat. Korištena je prizmatična mreža s trideset podjela po duljini konzole i deset podjela po širini, tri podjele po debljini piezoelektričnih slojeva, jedna podjela po bakrenim i ESPANEX slojevima te dvije podjele po debljini FR4 slojeva.

⁵⁷ Najniži i najviši sloj, u slučaju Midé konzola to je sloj FR4, na slikama označen zelenom bojom.



Slika 101. Primjer umrežene konzole Midé V21B s utegom mase 2,4 g

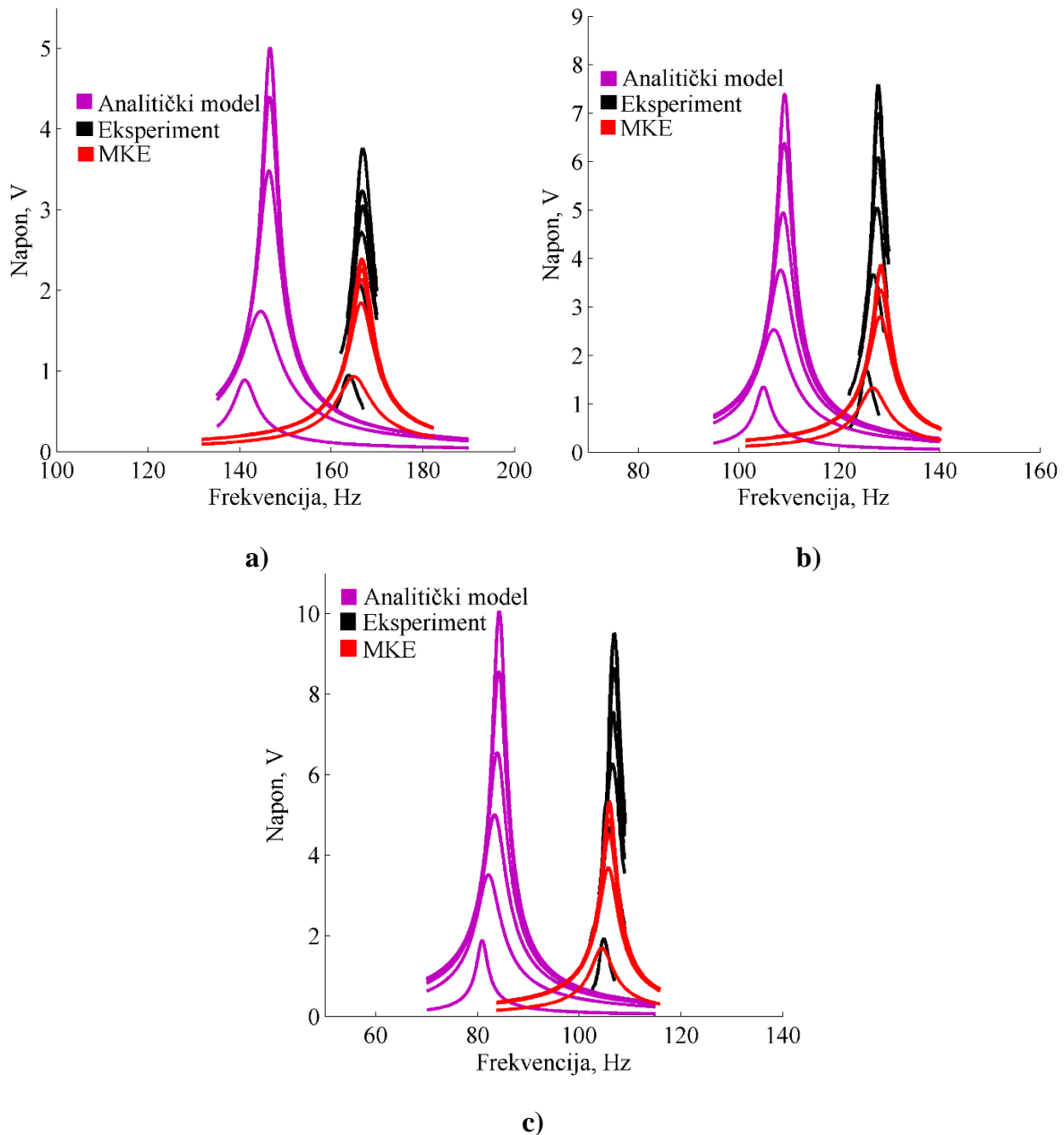
5.3.3 Usporedba analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata

U ovom su poglavlju prikazani i uspoređeni rezultati analitičkih i numeričkih modela opisanih u 3. i 4. poglavlju s rezultatima eksperimenata opisanih u potpoglavlju 5.2.3.2. Pri usporedbama nisu korištene sve vrijednosti otpora R_1 jer je tako moguće uočiti trendove i raspoznati razlike između modela i eksperimenata. Od dvanaest vrijednosti otpora radnog trošila R_1 navedenih u 5.2.3.2, izdvojeno je sljedećih šest ($k\Omega$): 21,9, 111, 219, 333, 502, 651. Pri provođenju eksperimenata s konzolom V25W i najvećim iznosom mase utega od 23,4 g te iznosom otpora $R_1 = 651 k\Omega$, razvio se napon veći od granice 10 V koliko iznosi granični napon ulaza u NI sustav za prikupljanje podataka kao što je navedeno u 5.2.3.2, pa se ta vrijednost nije mogla uzeti u obzir.

Potrebno je podsjetiti čitatelja da je analitički model opisan u 3. poglavlju originalno zamišljen za simuliranje odziva piezoelektričnog bimorfa sastavljenog od dvaju slojeva piezoelektrika i jednog centralnog sloja supstrata (sa zanemarenim slojevima ljepila i elektroda). S druge strane, korištene eksperimentalne konzole proizvođača Midé, sastavljene su od sedam slojeva (s također zanemarenim slojevima ljepila; Slika 72). Zbog toga su Midé konzole uvrštene u analitički model kao ekvivalentni bimorf koristeći postupak opisan u 5.2.1. Isto tako, uteg je u analitičkom modelu konzole modeliran kao matematička singularnost na slobodnom kraju konzole, dok je u eksperimentima težište utega bilo pomaknuto prema uklještenju. Ova razlika sigurno utječe na dinamički odziv u vidu manjeg momenta proizvedenog od gibajuće mase i samim time povećanja vlastite frekvencije eksperimentalnih konzola za razliku od teorijskih.

Rezultati analize provedene analitičkom metodom na temelju izraza (3.74) prirodno su normalizirani amplitudom uzbudne frekvencije, dok su analize s MKE vršene uzbuđom maksimalne amplitude od $1 m/s^2$ pa normalizacija tih rezultata nije bila potrebna. Rezultati eksperimenata normalizirani su konstantnim iznosom amplitude uzbuđe od $0.633 m/s^2$ koja je održavana za vrijeme dinamičkih eksperimenata (Slika 97).

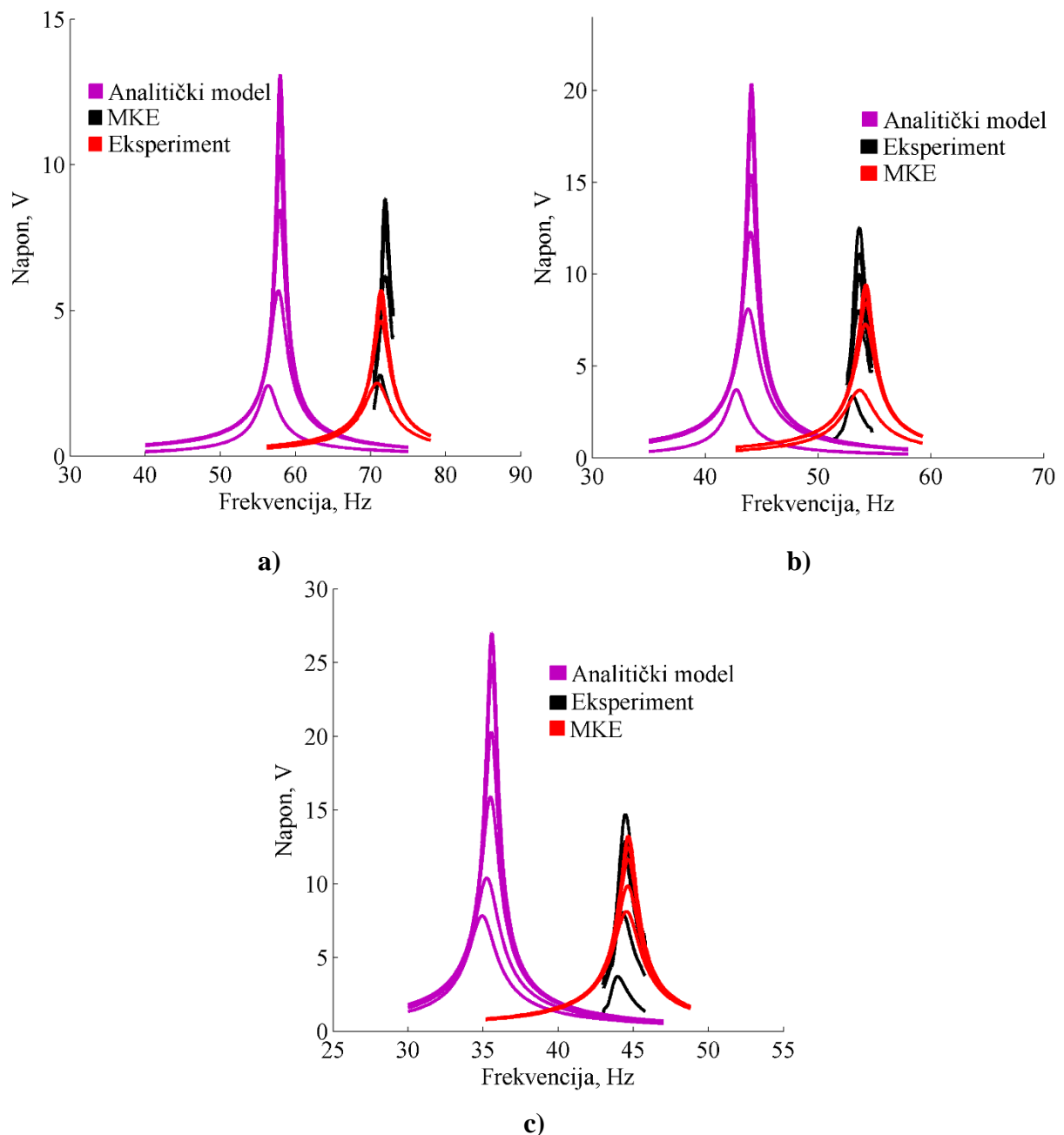
Slika 102 prikazuje usporedbu analitičkih, numeričkih (MKE) i eksperimentalnih rezultata s konzolom V21B i utegom od: a) 2,4 g, b) 4,8 g i c) 7,2 g, za šest vrijednosti prije navednih iznosa električnog otpora. Na ovom prikazu teško je međusobno usporediti krivulje dinamičkog odziva za svaki pojedini otpor (što će biti učinjeno kasnije; Slika 108 i Slika 109), ali se mogu dobro uočiti razlike u trendovima uspoređenih krivulja dinamičkog odziva.



Slika 102. Usporedba analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva ovisno o uzbudnoj frekvenciji s konzolom V21B i utegom od: a) 2,4 g, b) 4,8 g i c) 7,2 g

Kao što je teorijski pretpostavljeno u prethodnom odlomku, analitički model vidljivo odstupa od eksperimentalnih i numeričkih rezultata i to za sva tri slučaja upotrijebljenih utega na konzoli V21B (Slika 102). Razlika u iznosu postignutih vlastitih frekvencija analitičkog rješenja u

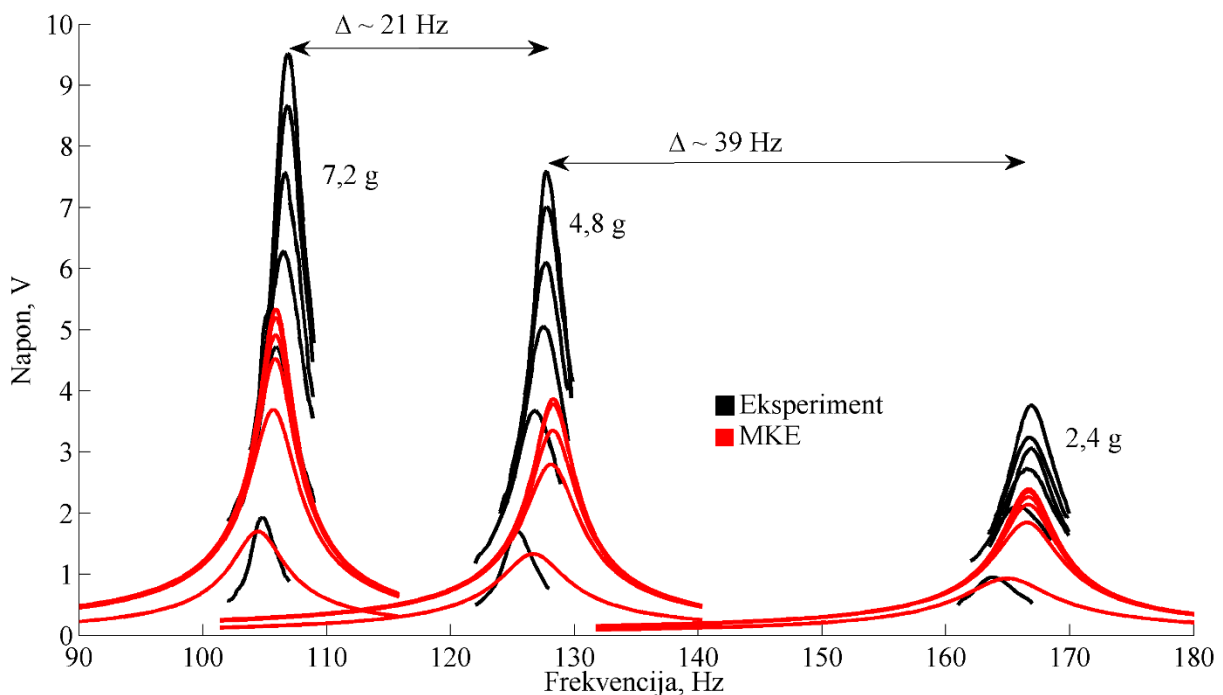
odnosu na MKE i eksperimente je značajna dok su iznosi maksimalnog naponskog odziva relativno dobro usklađeni između eksperimenata i analitičkog modela (Slika 102, b i c). Sa slike je vidljiv i veći utjecaj elektromehaničke sprege u rezultatima analitičkog modela, a može se uočiti u većem porastu vlastitih frekvencija (ljubičaste krivulje se više pomiču u desno) u odnosu na eksperimentalne, a posebno rezultate dobivene s MKE, koji sporo mijenjaju vlastitu frekvenciju s povećanjem otpora. Rezultati dobiveni MKE i eksperimentalni rezultati pokazuju dobru frekvencijsku usklađenost, ali i značajna odstupanja u iznosima postignutih napona čemu će više pažnje biti posvećeno u nastavku.



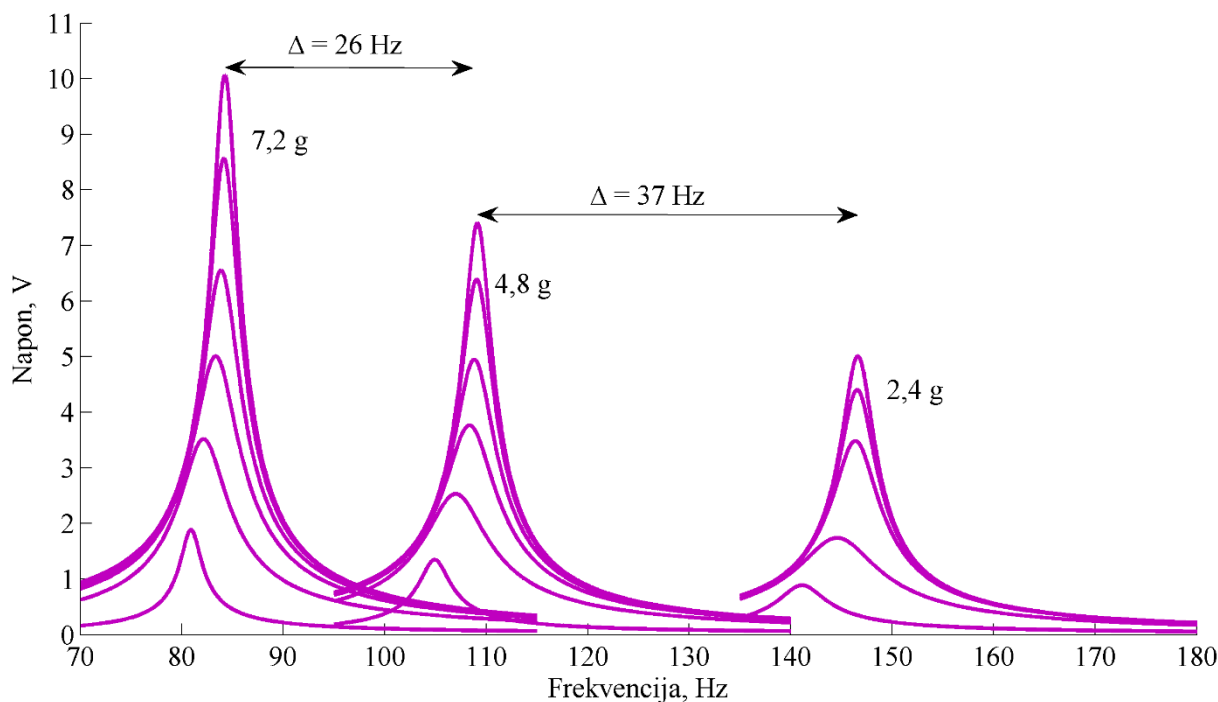
Slika 103. Usporedba analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva ovisno o uzbudnoj frekvenciji s konzolom V25W i utegom od: a) 7,8 g, b) 15,6 g i c) 23,4 g

Identičan rezultat može se uočiti i pri usporedbama trenda dinamičkih odziva, ali ovaj put sa širom i dužom konzolom V25W i većim uprijebljenim utezima od: 7,8 g (Slika 103, a), 15,6 g (Slika 103, b) i 23,4 g (Slika 103, c). Konzola većih dimenzija podrazumijeva i veći volumen piezoelektričnog materijala pa je za očekivati da će postići i veće napone i snagu. Dijagram za masu od 23,4 g (Slika 103 c) jedini odstupa od trenda koji se ponavlja u ove dvije usporedbe (Slika 102 i Slika 103), a odstupanje se odlikuje drugačijim naponskim odzivom s boljom procjenom maksimalnog napona pri najvećem otporu od 651 k Ω . S druge strane, nepovoljna razlika u odnosu na ostale dijagrame očituje se u lošijoj usporedbi pri najmanjoj vrijednosti otpora od 21,9 k Ω . Ova razlika je uočljiva i u usporedbama elektromehaničkog učinka ukrućenja konzole koje su detaljnije pojašnjene pri kraju ovog poglavlja.

Usporedba analitičkog modela s modelom MKE pokazuje znatne razlike između ova dva pristupa, kako u frekvencijskom, tako i u naponskom odzivu. Model MKE s druge strane pokazao je dobru procjenu frekvencijskog odziva pri usporedbi s eksperimentalnim rezultatima. Zbog navedenog, iz daljnjih će usporedbi u posebne slike biti izdvojeni rezultati analitičke metode te zasebno prikazani. Kako bi se bolje uočio trend promjene vlastitih frekvencija s promjenom iznosa mase utega, odabran je usporedni prikaz svih rezultata s MKE i eksperimenata vršenih s konzolom V21B (Slika 104) i V25W (Slika 106), ali zasebno i analitičkih rezultata za iste konzole (Slika 105 i Slika 107).



Slika 104. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva za konzolu V21B u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji

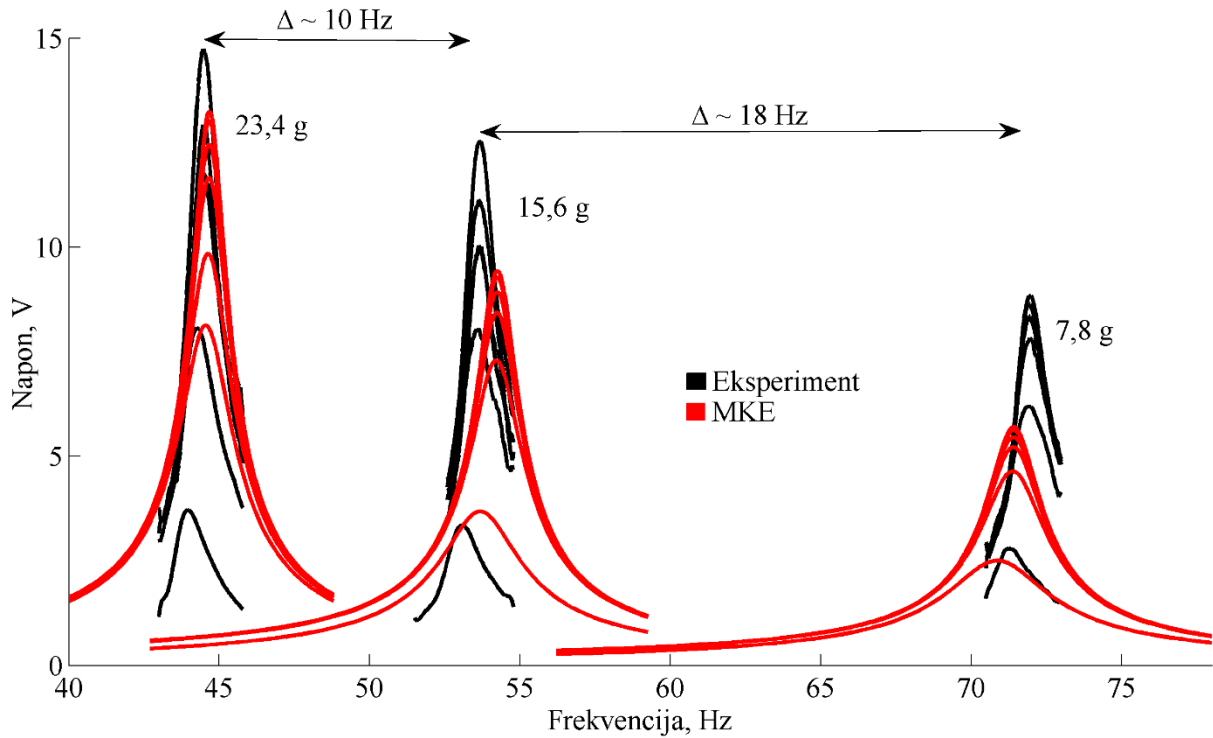


Slika 105. Usporedba analitičkih rezultata naponskog odziva za konzolu V21B u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji

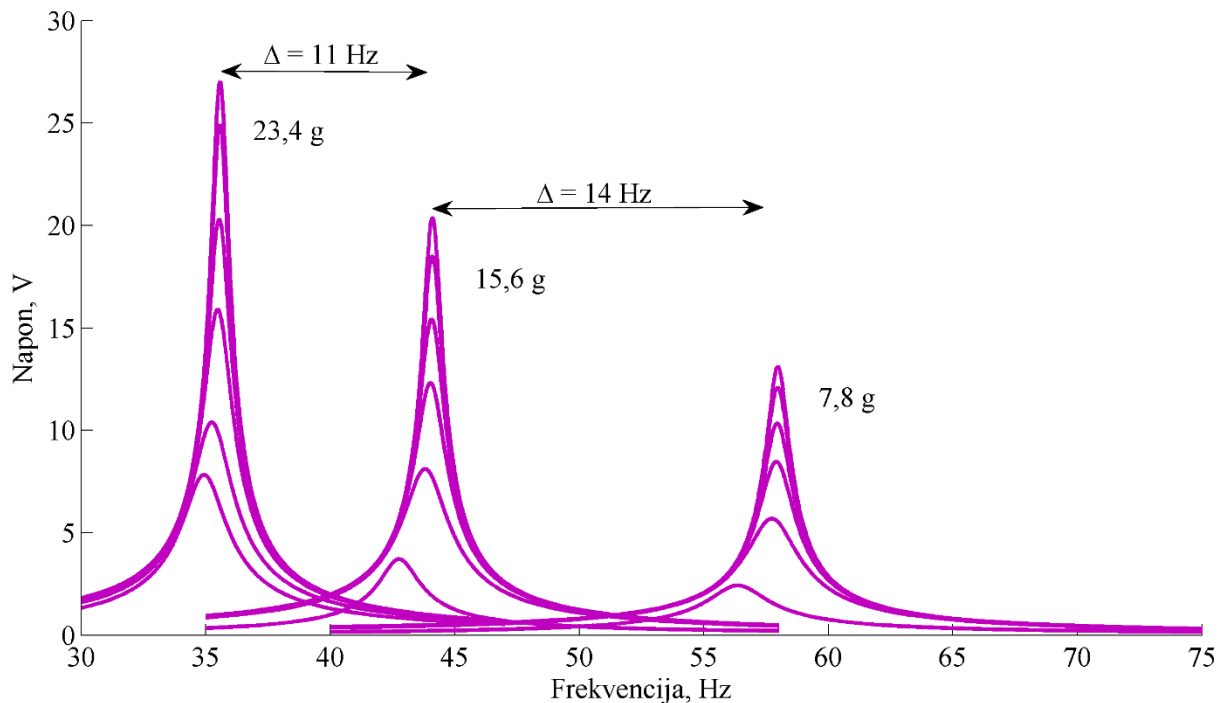
Promatranjem utjecaja veličine utega na promjenu vlastitih frekvencija, iz priloženih usporedbi za konzolu V21B (Slika 104 i Slika 105) i za konzolu V25W (Slika 106 i Slika 107), uočava se da je interval promjene frekvencije veći kada se prelazi sa najmanje mase utega na srednju (V21B s 2,4 g na 4,8 g i V25W 7,8 g na 15,6 g). Manja se promjena intervala uočava pri povećavanju mase utega sa srednje na najveću (V21B s 4,8 g na 7,2 g i V25W sa 15,6 g na 23,4 g).

Kako bi se pokazalo, da je glavni razlog velikih razlika u frekvencijskim rasponima pri usporedbi analitičkih rezultata s rezultatima pomoću MKE i eksperimentalnim rezultatima, zaslužno drugačije montiranje utega (prethodno objašnjeno) mogu se usporediti frekvencijski pomaci koji se događaju pri povećanju masa utega. Za prvo povećanje masa, razlike između pripadnih rezonantnih frekvencija iznose 37 Hz (V21B, Slika 105) i 14 Hz (V25W, Slika 107) za analitičke rezultate i ≈ 39 Hz (V21B, Slika 104) odnosno ≈ 18 Hz (V25W, Slika 106) za eksperimentalne/MKE rezultate. Pri drugom povećanju težine utega intervali se mijenjaju na sljedeći način: 26 Hz (V21B, Slika 105) i 11 Hz (V25W, Slika 107) za analitičke rezultate i ≈ 21 Hz (V21B, Slika 104) odnosno ≈ 10 Hz (V25W, Slika 106) za eksperimente/MKE. Kako su ovi iznosi podudarni tj. analitička analiza ispravno prati promjenu vlastitih frekvencija s povećanjem utega što je vidljivo iz usporedbi s eksperimentalnim rezultatima, može se zaključiti da bi boljim postavkama analitičkog modela ili drugačijom montažom utega

vjerojatno došlo i do boljeg poklapanja analitičkih rezultata s rezultatima pomoću MKE i eksperimentalnim rezultatima, ali ipak uz razlike.

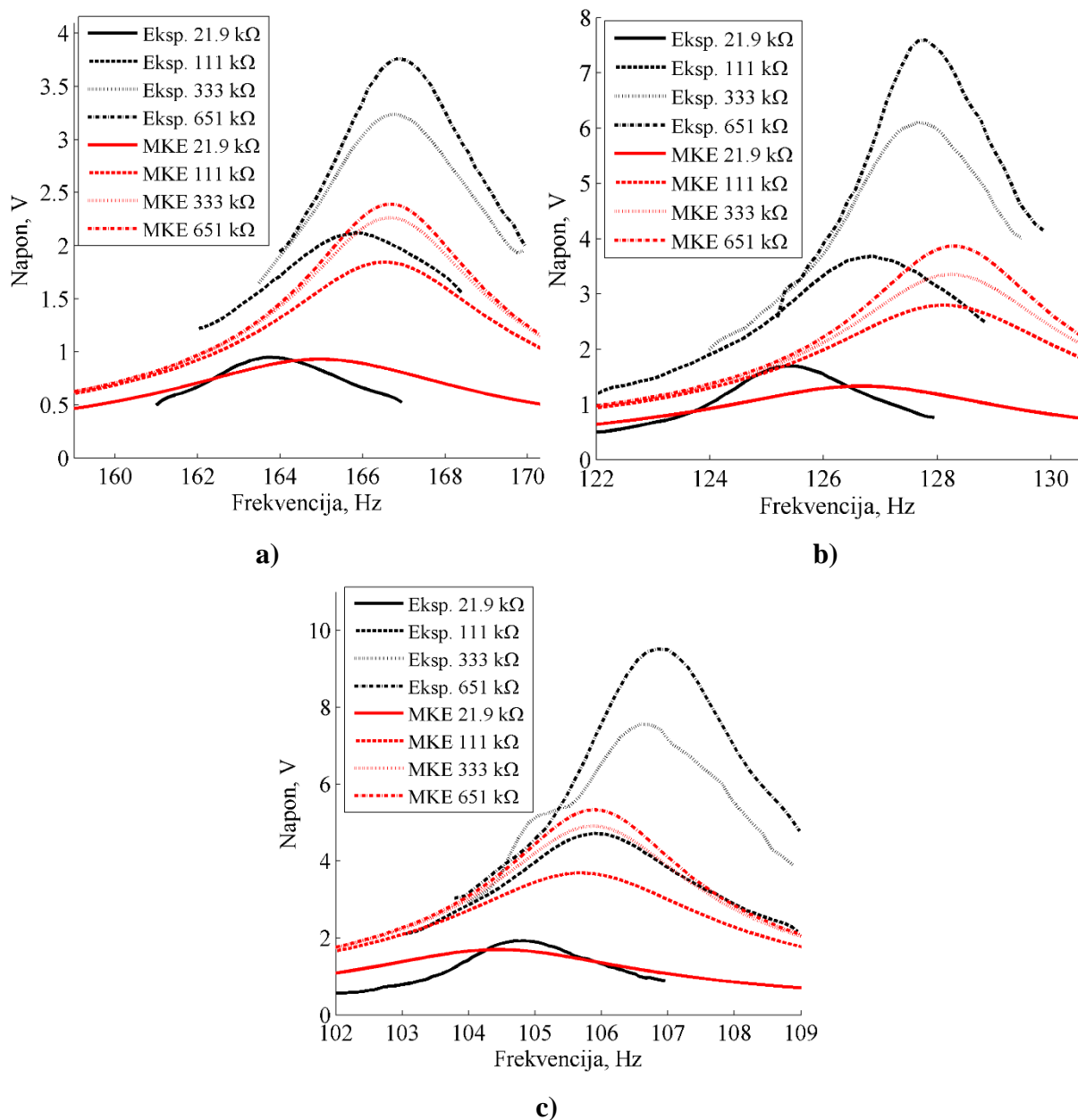


Slika 106. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva za konzolu V25W u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji

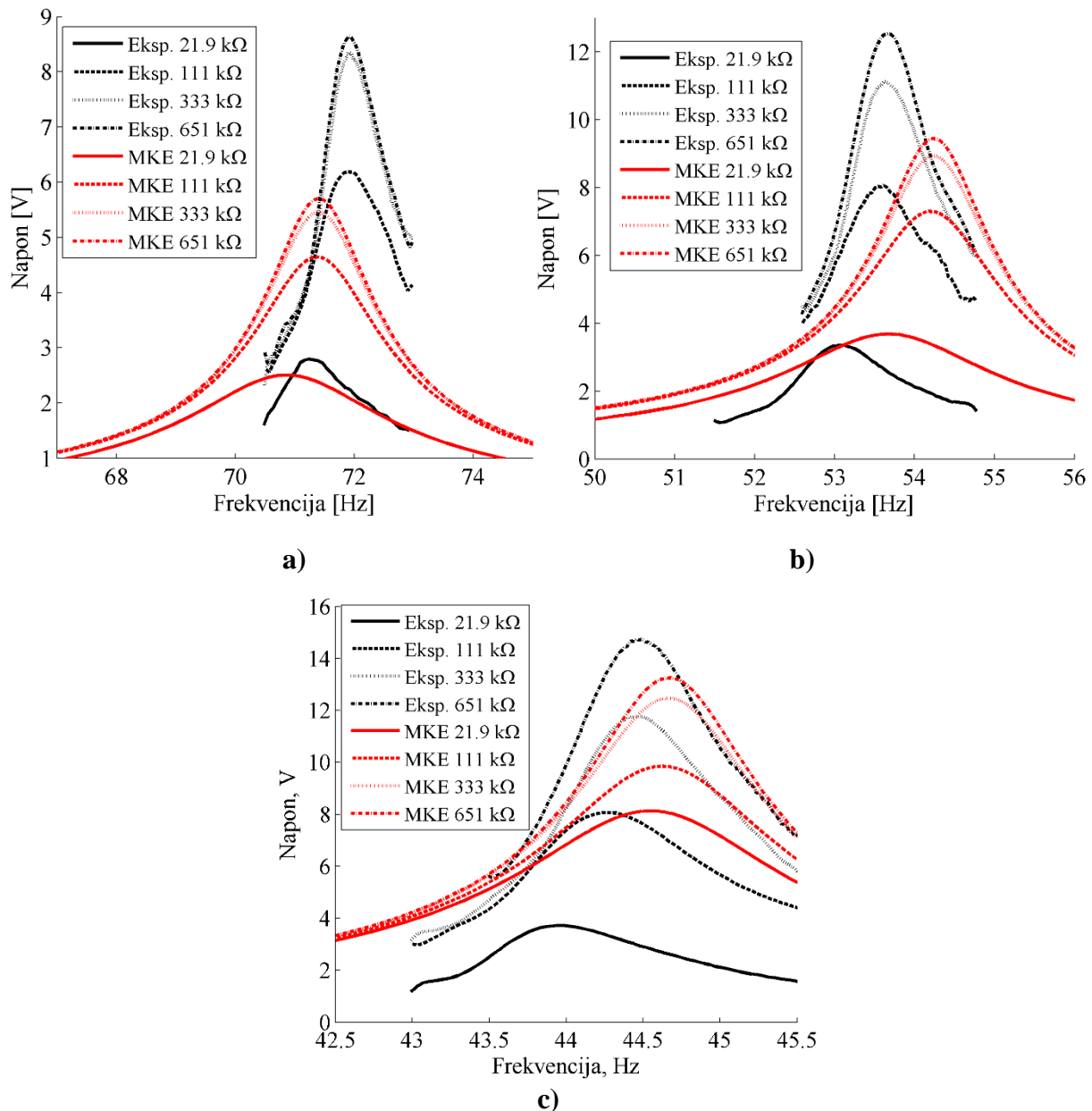


Slika 107. Usporedba analitičkih rezultata naponskog odziva za konzolu V25W u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji

U nastavku su pobliže analizirane razlike između eksperimentalnih rezultata i numeričkih modela za koje su odabrane četiri vrijednosti otpora R_1 radi bolje čitljivosti dijagrama: 21,9, 111, 333 i 651 k Ω (Slika 108 i Slika 109). Kao što je uočeno na prethodnim dijagramima pomoću kojih se promatrao trend razvoja napona u ovisnosti o uzbuđnoj frekvenciji, MKE rezultatima se zadovoljavajuće predviđjelo raspone vlastitih frekvencija dok su iznosi napona značajno odstupali. Numerički rezultati općenito pokazuju sporiju promjenu vlastite frekvencije u ovisnosti o otporu R_1 od eksperimentalnih rezultata, dok su najmanje razlike u iznosima napona vidljive pri otporu $R_1 = 21,9$ k Ω .



Slika 108. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva u ovisnosti o uzbuđnoj frekvenciji za konzolu V21B, 4 različite vrijednosti otpora R_1 te utege od: a) 2,4 g, b) 4,8 g i c) 7,2 g



Slika 109. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji za konzolu V25W, 4 različite vrijednosti otpora R_1 i uteg od:

a) 7,8 g, b) 15,6 g i c) 23,4 g

Procjene napona pomoću MKE provedene u ANSYS-u su zadovoljavajuće u slučaju usporedbi modela troslojnog bimorfa i analitičkih rezultata kao što je predstavljeno u poglavlju 4.4 te u dostupnoj literaturi [Yang i Tang, 2009.] uz otprije poznata ograničenja ANSYS-a pri simuliranju direktnog piezoelektričnog efekta. Međutim, ovdje je vidljivo kako u slučaju piezoelektrične konzole s više od tri sloja rezultati naponskog odziva nisu zadovoljavajući.

U nastavku su dane tablice usporedbi numeričkih i eksperimentalnih rezultata za obje konzole s proračunatim postotnim razlikama iznosa maksimalnog napona i vlastite frekvencije pri

otporu R_1 i korištenom utegu M_t . Tablica 16 prikazuje greške u procjeni ostvarenog maksimalnog napona koje se prosječno kreću oko $\approx 20,6\%$, dok Tablica 17 prikazuje puno bolje procjene vlastite frekvencije pri maksimalnom naponu, uz prosječnu grešku od $\approx 0,3\%$. Iz analize je zbog velikih odstupanja rezultata isključen posljednji eksperiment s konzolom V25W i utegom od 23,4 g.

Tablica 16. Razlike eksperimentalnih i numeričkih rezultata pri postignutom maksimalnom naponskom odzivu, %

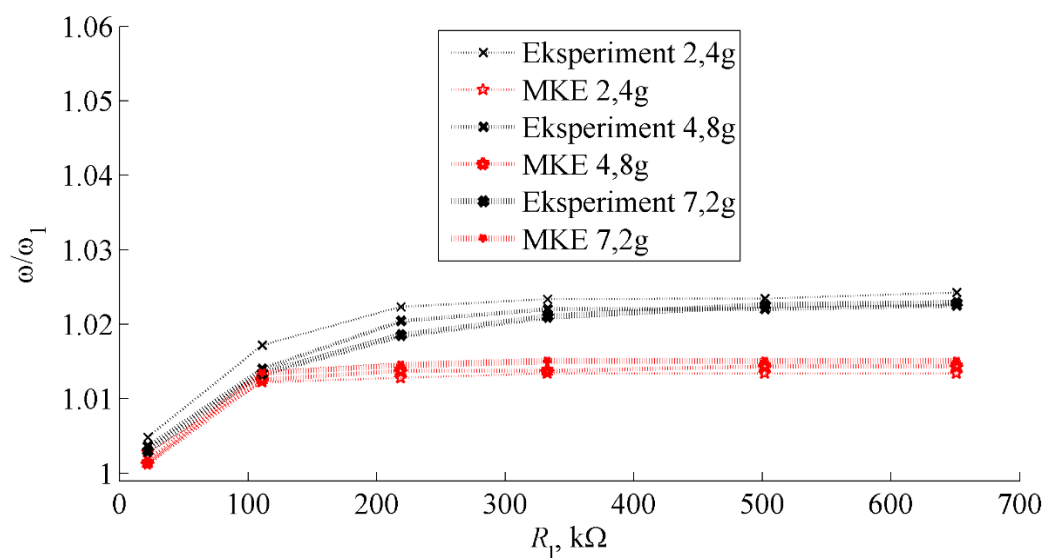
| | | V21B | | | V25W | | |
|--------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| R_1 , k Ω | MKE/EKSP. | 2,4 g | 4,8 g | 7,2 g | 7,8 g | 15,6 g | 23,4 g |
| 21,9 | Razlika % | 2,1 | 27,8 | 11,4 | 10,7 | -9,9 | - |
| 111 | Razlika % | 15,1 | 23,7 | 24,5 | 25,8 | 8,8 | - |
| 333 | Razlika % | 30,0 | 45,1 | 35,1 | 34,6 | 20,0 | - |
| 651 | Razlika % | 36,4 | 49,2 | 44,3 | 33,7 | 25,0 | - |

Tablica 17. Razlike eksperimentalnih i numeričkih rezultata u postignutoj vlastititoj frekvenciji pri maksimalnom odzivu napona, %

| | | V21B | | | V25W | | |
|--------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| R_1 , k Ω | MKE/EKSP. | 2,4 g | 4,8 g | 7,2 g | 7,8 g | 15,6 g | 23,4 g |
| 21,9 | Razlika % | -0,8 | -1,1 | 0,4 | 0,6 | -1,2 | - |
| 111 | Razlika % | -0,5 | -1,0 | 0,2 | 0,8 | -1,2 | - |
| 333 | Razlika % | 0,1 | -0,5 | 0,7 | 0,7 | -1,2 | - |
| 651 | Razlika % | 0,1 | -0,5 | 0,8 | 0,7 | -1,1 | - |

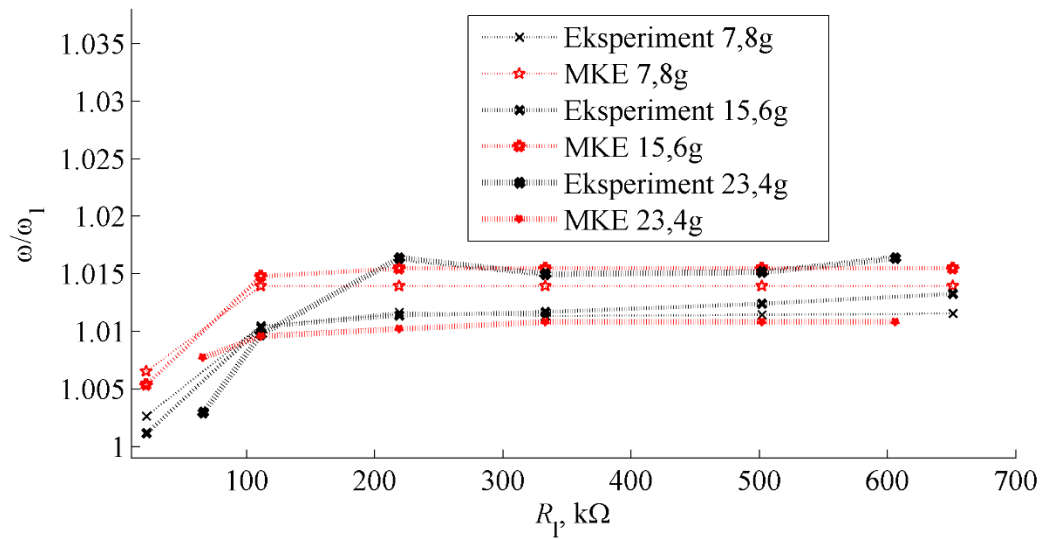
Radi boljeg uočavanja učinka ukrućivanja konzole pri porastu električnog otpora R_1 potrebno je poslužiti se prikazom ovisnosti promjene vlastite frekvencije sustava za pretvorbu kinetičke energije vibracija o električnom otporu za obje konzole. Kao što je primijećeno na slikama usporedbi naponskog odziva analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata (Slika 102 i Slika 103) analitički rezultati imaju izraženiji trend ukrućivanja (veći rast vlastitih frekvencija s povećanjem otpora). S druge strane, numerički i eksperimentalni rezultati prikazuju umjereniji trend što se može vidjeti u usporedbama numeričkih i eksperimentalnih rezultata za obje konzole i sva tri korištena utega: V21B (Slika 110) i V25W (Slika 111) Krivulje

eksperimentalnih i numeričkih rezultata za konzolu V25W nisu uniformne i jasno odijeljenje jedne od drugih kao i krivulje prikazane za manju konzolu V21B (krivulje za 7,8 g i 15,6 g su praktički istovjetne). Dok krivulje eksperimenata pokazuju kako s povećanjem utega pomak vlastite frekvencije opada, numerički rezultati pokazuju suprotan odziv: rast iznosa krajnje frekvencije s povećanjem mase, što je ujedno dobiveno i analitičkim analizama. Ovu pojavu je teško objasniti, ali svakako ne može biti fizikalno opravdana u srazu s ovdje prikazanim eksperimentalnim rezultatima. Porast frekvencije pri eksperimentalnim mjerenjima iznosi 2,3% za manju konzolu i u prosjeku 1,5% za veću konzolu, dok je porast frekvencije dobiven pomoću MKE niži i u prosjeku iznosi 1,3%, sve pri najvišoj vrijednosti otpora od 651 k Ω .



Slika 110. Prikaz učinka elektromehaničke sprege na povećanje vlastite frekvencije piezoelektrične konzole pri sukcesivnom povećavanju otpora za konzolu V21B.

Kod numeričkih i eksperimentalnih rezultata krivulje za različite korištene utege jasno su odvojene i ne pokazuju trend približavanja zajedničkoj asimptotskoj vrijednosti. Prema prikazanim rezultatima može se potvrditi da se krivulje ukrućenja blago mijenjaju (ili rastu ili spuštaju), a ujednačeni trend vidljiv je samo za konzolu V21B (Slika 110) dok rezultati za konzolu V25W nisu uniformni. Prema analitičkim i numeričkim pretpostavkama i rezultatima, iznos krajnje vlastite frekvencije pri najvišim otporima bi trebao rasti s povećanjem vrijednosti mase. Analitički ovu tvrdnju se može objasniti većim mogućnostima deformiranja pri većim iznosima utega, radi čega je struktura podatljivija pa do ukrućenja dolazi tek kasnije (pri višoj krajnoj frekvenciji) od konzole s manjom masom utega. Same razlike su jako male (< 1%) pa se može zaključiti da povećanje mase nema većeg utjecaja na učinak ukrućenja strukture.



Slika 111. Prikaz učinka elektromehaničke sprege na povećanje vlastite frekvencije piezoelektrične konzole pri sukcesivnom povećavanju otpora za konzolu V25W.

6. Primjena uređaja za pretvorbu niskorazinske energije vibracija iz okoliša – originalno rješenje sustava za bežično mjerenje tlaka u automobilskim pneumaticima

Nakon što je u prethodnim poglavljima pojašnjen koncept prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša s naglaskom na piezoelektrični koncept pretvorbe energije vibracija, i predstavljeni analitički i numerički modeli koji služe za predviđanje ponašanja takvih sustava, u ovom će se poglavlju stečena znanja i razvijene metode primijeniti na razvoj inovativnog rješenja bežičnog autonomnog senzora tlaka.

Mjerenje tlaka u gumama za cestovna vozila važno je radi održanja visokog stupnja sigurnosti vožnje. Pod direktnim mjerenjem smatra se očitavanje tlaka fizičkim senzorom u unutrašnjosti pneumatika, dok se pod indirektnim smatra mjerenje tlaka na temelju podataka iz ABS sustava automobila (odnos promjera kotača i prijednog puta) što se pokazalo pogrešnim. Pravilan tlak guma u nekim će slučajevima spasiti život putnicima, ali i znatno produžiti vijek trajanja guma. Doista, prenizak tlak u pneumaticima izaziva povećanje potrošnje goriva do 2% i skraćuje njihov vijek trajanja za čak 25% [Alvarez et al., 2008.]. Francusko udruženje za cestovnu sigurnost ustvrdilo je pak kako je čak 9% nesreća izazvano nepravilnim tlakom u gumama [URL: Securite Routiere; URL: TPMS].

Prema američkom TREAD zakonu iz 2001. godine svi osobni automobili moraju biti opremljeni sustavom za mjerenje tlaka u gumama [TREAD, 2000.], dok se u dokumentima EU IP/08/786, iz 2008. može pronaći jednak nalog svim europskim proizvođačima (na automobile odobrene od 2012. god. na dalje) [Alvarez et al., 2008.]. U SAD se proizvede 16 milijuna novih vozila godišnje pa je zbog TREAD zakona samo u USA potrebno u ove uređaje ugraditi 64 milijuna⁵⁸ baterija u jednoj godini [URL: NHTSA].

Sustavi bežičnog motrenja tlaka u automobilskim gumama (engl. *TPMS – tire pressure monitoring system*) nov su proizvod na tržištu. Većina takvih sustava napaja sa baterijama

⁵⁸ Proračun temeljen na okvirnoj pretpostavci o vozilima s 4 kotača: 4 baterije po vozilu, na 16 milijuna vozila.

kojima proizvođači prognoziraju vijek trajanja od 7-10 godina, iako je često taj vijek i mnogo kraći i iznosi od 3-5 godina (vijek vozila je s druge strane procijenjen na 13 godina). Na temelju ovih podataka može se zaključiti da će za vrijeme vijeka trajanja jednog automobila biti potrebno minimalno dva puta zamijeniti baterije u uređajima za mjerenje tlaka, pod uvjetom da uređaji nisu hermetički zatvoreni. Međutim, većina standardnih uređaja ne predviđa zamjenu baterije, već zamjenu kompletnog uređaja s potrošenom baterijom, pripadajućom elektronikom i kućištem (Slika 112).⁵⁹



Slika 112. Klasični TPMS uređaj ovdje prikazan sa standardnim automobilskim ventilom i kućištem sa mjernom elektronikom i baterijom [URL: SMP]

Na temelju prethodnih istraživanja i potrage za primjenom tehnologije prikupljanja niskorazinske energije vibracija iz okoliša obrađene u ovoj disertaciji, u Laboratoriju za precizno inženjerstvo Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci je 2011. godine na natječaj 'POC - Proof of concept' u organizaciji Poslovno-inovacijske agencije Republike Hrvatske (BICRO) uspješno prijavljen projekt radnog imena 'BAST – Bežični autonomni senzor tlaka'. Projekt je uključivao konstruiranje, izradu, ispitivanje i analizu rada konceptualnog prototipa bežičnog bezbaterijskog autonomnog senzora tlaka u gumama te je uspješno dovršen iste godine.

Osim atraktivnosti ovog projekta na temelju uvedenih pravnih akata, ideja za projekt je proizašla i iz istraživanja prof. dr. sc. Roundya koji je uređaj ovoga tipa obradio u znanstvenom članku, ali i u svojoj doktorskoj disertaciji. Međutim, postoji jedna temeljna razlika u predloženim rješenjima koja se očituje u konstrukciji uređaja. Roundyev je uređaj smješten unutar kotača, što otežava montažu, dok je ovdje predloženi sustav moguće smjestiti u malo

⁵⁹ U razgovoru sa serviserima dobiveni su neki od potrošenih uređaja i uistinu su bili hermetički zatvoreni (Slika 112). Pri rastavljanju uređaja dodatno je otkriveno kako je unutrašnjost uređaja zalivena polimernom smjesom tako da se baterija doslovno mora čupati van kućišta. Ovakva konstrukcija sugerira i nemogućnost bilo kakve reciklaže, te uređaji završavaju na smetlištima.

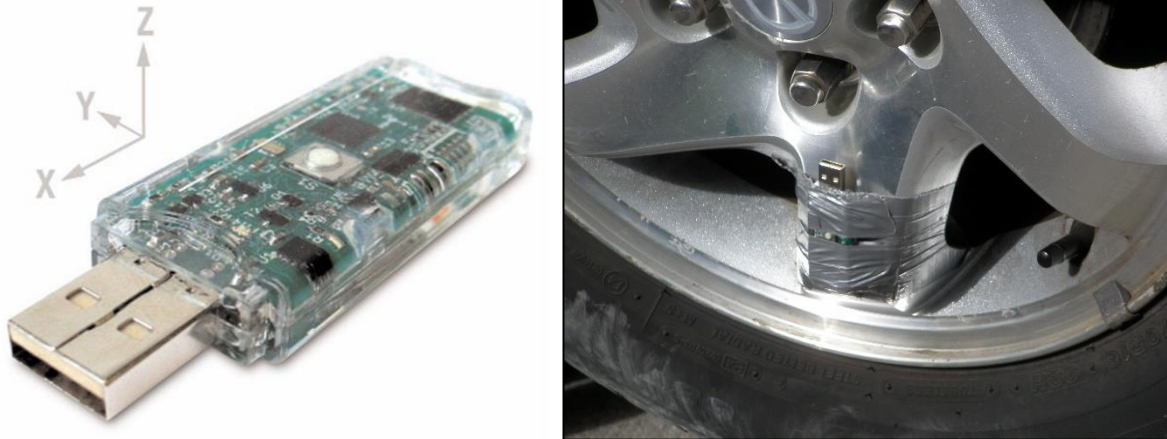
veću zaštitnu kapicu automobilskog ventila s vanjske strane kotača, što uvelike olakšava upotrebu sustava, međutim komplicira samo konstrukcijsko rješenje. [Roundy, 2003; Roundy, 2008.].

Ovo se poglavlje bavi razvojem navedenog prototipa, uključujući početno mjerenja vibracija na automobilskoj gumi pri vožnji, arhitekturu sustava, laboratorijska ispitivanja prototipa te cestovne eksperimente. U posljednjem je potpoglavlju opisan uređaj za autonomno održavanje tlaka u pneumaticima, proizašao iz rada na navedenom konceptu BAST, koji se trenutno nalazi u fazi patentnog ispitivanja za dobivanje potpune patentne zaštite.

6.1 Mjerenja i analiza vibracija u okolini automobilskog kotača

U okolini motornih vozila kao što su automobili, kamioni i motorkotači prisutna je velika količina vibracijske kinetičke energije, a veći dio tih vibracija nastaje kao rezultat interakcije kotača vozila i površinskih nepravilnosti na kolnicima. Kako će glavni pogonski mehanizam ovdje opisanog autonomnog senzora tlaka biti temeljen na piezoelektričnoj pretvorbi vibracija u električnu energiju, bitno je naglasiti da je, kako je gore široko elaborirano, većina takvih pretvarača projektirana za rad pri točno definiranim uzbudnim frekvencijama. Takvim načinom projektiranja pretvarača omogućuje se iskorištavanje rezonantnog fenomena pri prvoj vlastitoj savojnoj frekvenciji, a radi maksimalnog učinka pretvorbe, te je stoga prije projektiranja bilo potrebno istražiti karakter vibracija u okolini kotača.

Na početku provođenja projekta provedena je stoga serija eksperimenata kojima su se pokušale utvrditi frekvencije i amplitude vibracija na kotaču automobila i to u različitim uvjetima vožnje. Za provođenje mjerenja na rotirajućoj strukturi kao što je kotač, korišten je bežični troosni akcelerometar Slam Stick Vibration Recorder [URL: Midé] kojim su se bilježile vibracije – Slika 113. Uređaj ima mogućnost mjerenja ubrzanja do iznosa 16 G unutar frekvencijskih raspona od 10 Hz do 3,2 kHz. Pri najvišim postavkama frekvencije uzorkovanja uređaj ima mogućnost kontinuirano bilježiti vibracije na svim trima osima u trajanju od 3,6 minuta. Po završetku mjerenja uređaj se putem USB priključka spaja s računalom te se podaci preuzimaju i obrađuju u priloženom softveru.



Slika 113. Midé Slam Stick recorder – troosni akcelerometar s prikazom montaže na automobilskom kotaču [URL: Mide]

Eksperimentima su se pokušale utvrditi frekvencije i amplitude vibracija prisutne u okolini automobila i to u četiri različita radna uvjeta:

- a) parkirani automobil s upaljenim motorom,
- b) gradska vožnja pri brzinama od 30-40 km/h,
- c) vožnja na otvorenoj cesti pri brzinama od 70-80 km/h te
- d) vožnja autoputom pri brzinama od 120 km/h.

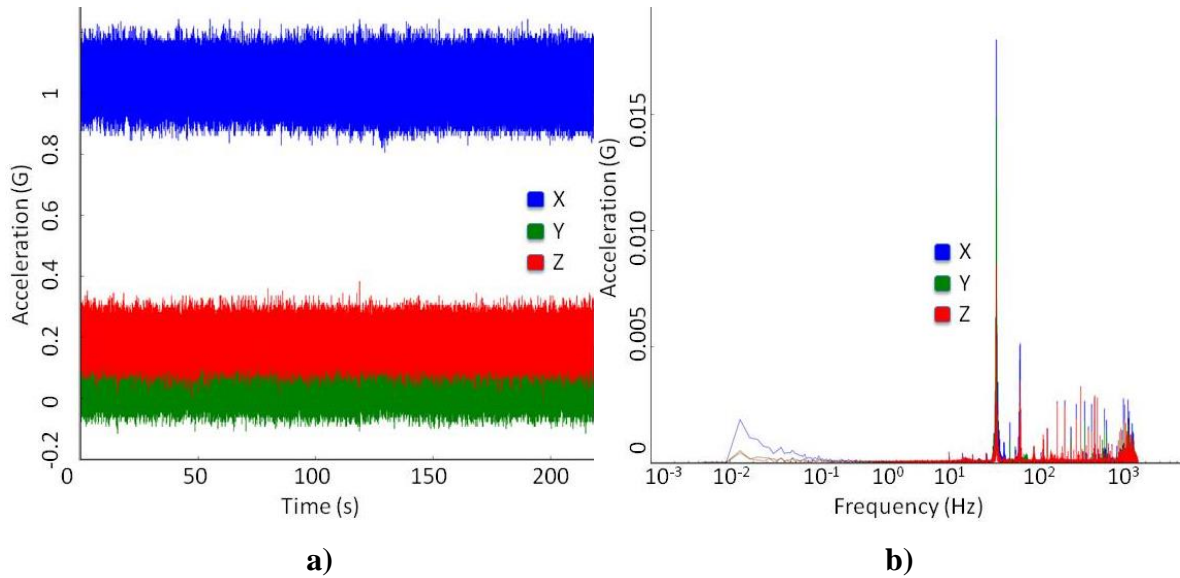
Za svaki od ovih uvjeta eksperimenti su ponovljeni barem tri puta i to u trajanju od gore navedenih 3,6 minuta.

Amplitude vibracija su očekivano niske dok automobil stoji, a najviši iznosi rezultat su gravitacijskog ubrzanja i vibracija motora pri frekvenciji od 30 Hz (Slika 114). Mjerenja u uvjetima gradske vožnje rezultirala su visokim amplitudama (ponekad i preko mjerne granice od 16 G na X osi) pri vrlo niskim frekvencijama (10^{-2} Hz) dok su oko frekvencije od 15 Hz i 45 Hz uočljive određene periodične vibracije niskih amplituda⁶⁰ (Slika 115). Ovi rezultati mogu se objasniti kretanjem automobila i udarcima kotača u neravnine na cestama.⁶¹ Dok je automobil zaustavljen na semaforu ili u stoji u koloni, amplitude naglo padnu na iznos od 0 G ili 1 G ovisno o trenutnoj orijentaciji uređaja za bilježenje vibracija (1 G je upravo rezultat gravitacijskog ubrzanja). Slični rezultati ostvareni su i u naknadna dva eksperimenta na

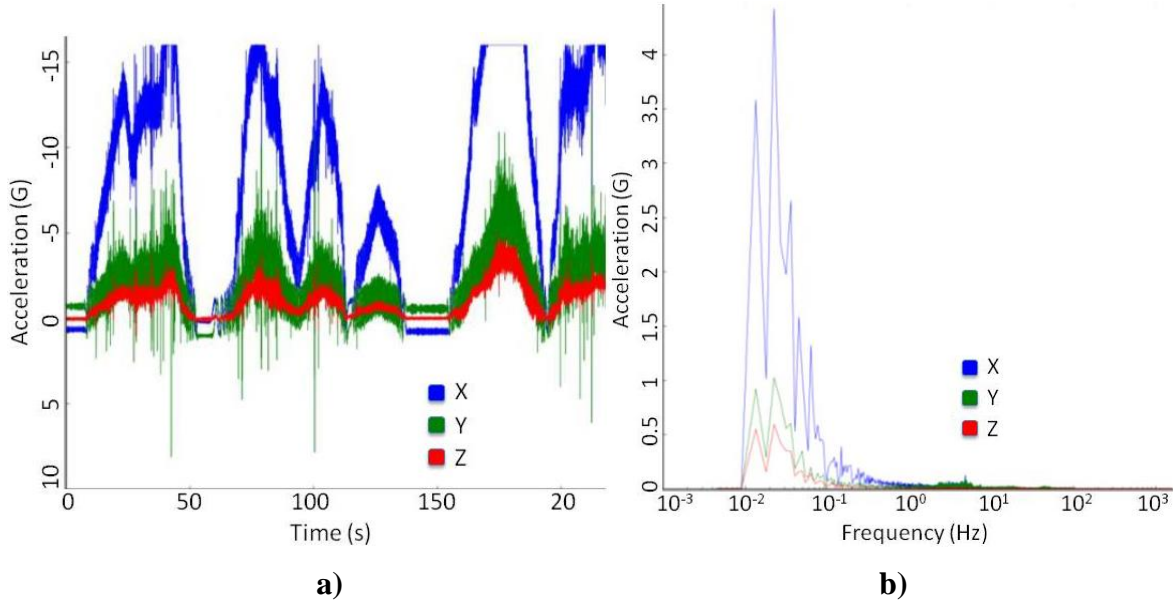
⁶⁰ Rotacija kotača i rad motora.

⁶¹ Mjerenja su provedena u gradu Rijeci i okolici, s izrazito neravnim, grbavim kolnicima s velikim brojem kanalizacijskih i vodovodnih šahti. Teško je, dakle, mogao biti pronađen bolji testni poligon za uređaj koji pretvara vibracije u električnu energiju.

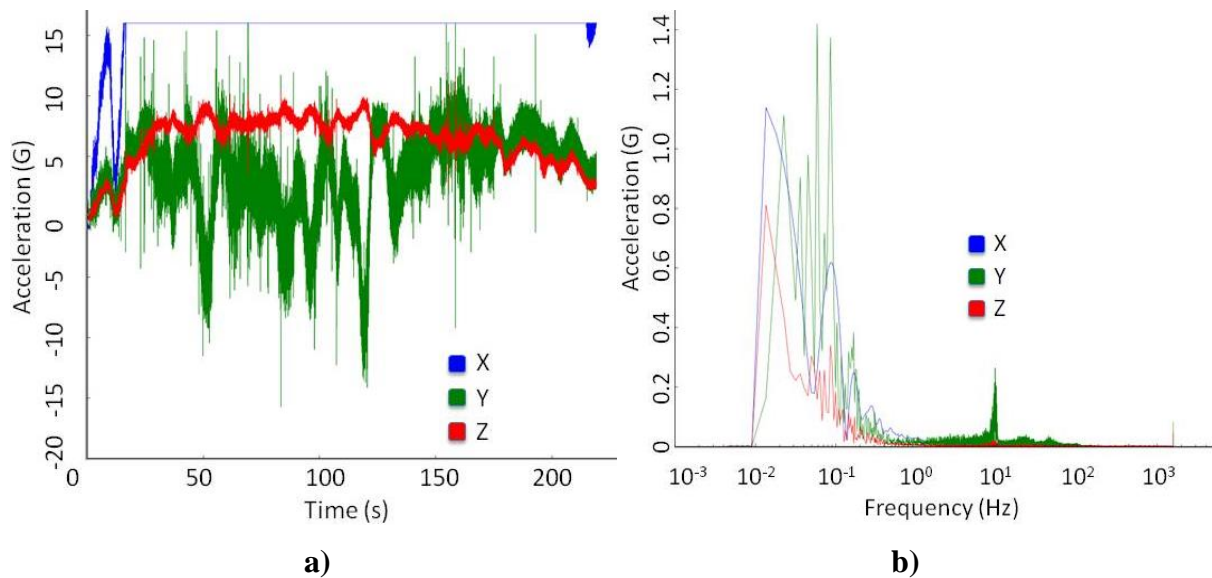
otvorenoj cesti (Slika 116) i na autoputu (Slika 117). Mjerenja su rezultirala još višim iznosima amplituda koje su u navedenim uvjetima učestalo više od mjerne granice uređaja za bilježenje vibracija (> 16 G).



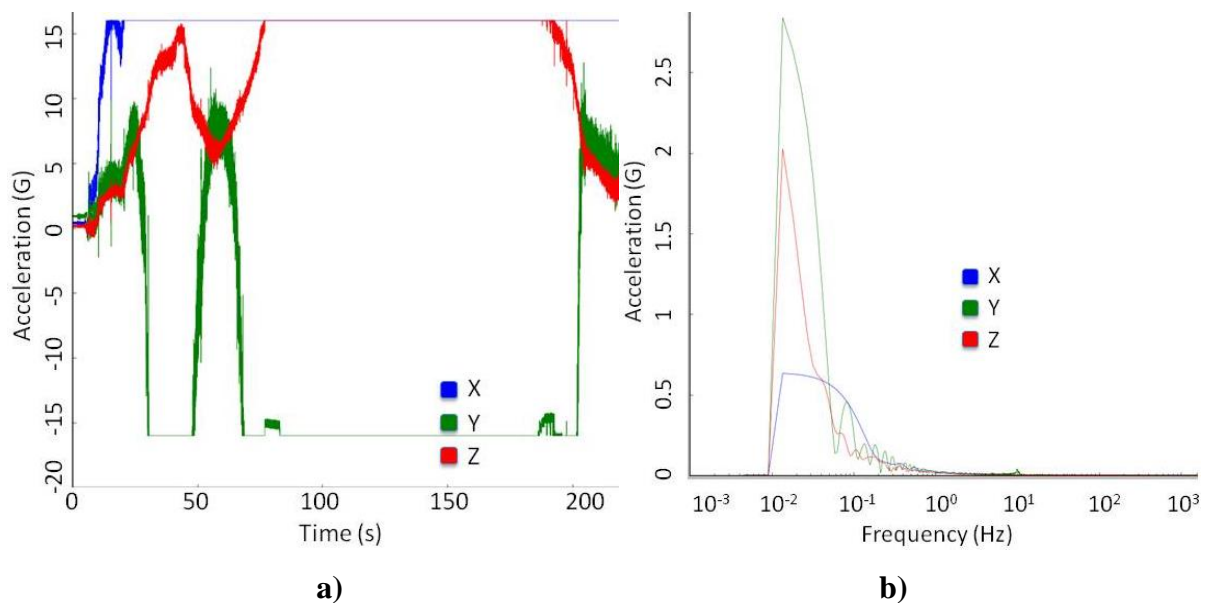
Slika 114. Graf amplituda vibracija za zaustavljeni automobil s upaljenim motorom: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji



Slika 115. Graf amplituda vibracija za automobil u uvjetima gradske vožnje pri brzinama od 30-40 km/h: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji



Slika 116. Graf amplituda vibracija za automobil u uvjetima vožnje na otvorenoj cesti pri brzinama od 70-80 km/h: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji

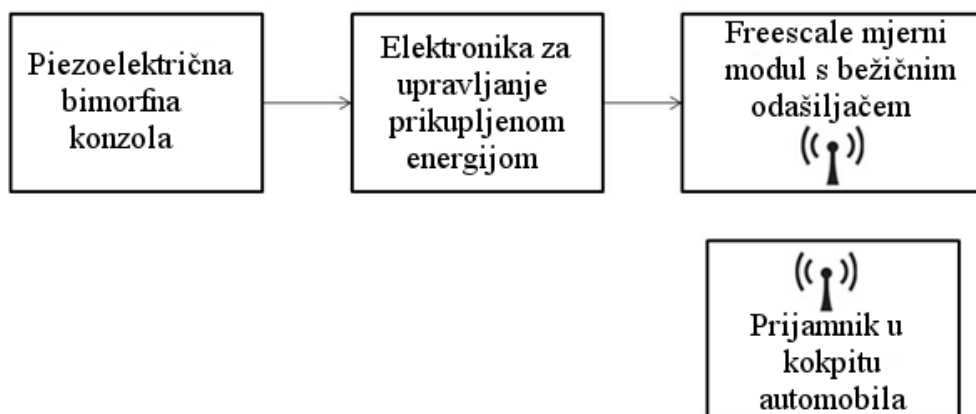


Slika 117. Graf amplituda vibracija za automobil u uvjetima vožnje na autoputu pri brzini od 120 km/h: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji

Mjerenjima su, dakle, potvrđene početne pretpostavke o vrlo visokim iznosima amplituda vibracija koje se pojavljuju aperiodično u okolini kotača (nasumični udari kotača u neravnine kolnika). Prema ovim saznanjima uređaj za pretvaranje vibracija ne mora biti projektiran za rad pri točno određenoj frekvenciji, već mora biti u mogućnosti iskoristiti aperiodične udare prisutne u okolini kotača.

6.2 Arhitektura sustava za bežično autonomno motrenje tlaka u automobilskim pneumaticima

Sustav se sastavljen od piezoelektrične bimorfne konzole, elektronike za upravljanje prikupljenom energijom, mjerne elektronike i odašiljača. Kako se automobil kreće po kolniku, nailazi na neravnine koje uzrokuju udarne vibracije kotača. Piezoelektrična bimorfna konzola s utegom smještena je na kotaču i pri savijanju izazvanim aperiodičnim udarima pretvara naboje nakupljene na piezoelektričnom materijalu u električni potencijal između elektroda uređaja. Ovako nastali izmjenični napon skladišti se na ulaznim kondenzatorima elektronike za upravljanje prikupljenom energijom. Kada je postignuta potrebna količina napona, elektronika počinje napajati mjernu elektroniku i bežični odašiljač predefiniranim iznosom istosmjernog napona. Izmjerena vrijednost tlaka/temperature/ubrzanja prenosi se bežičnim putem u kokpit vozila (Slika 118).



Slika 118. Glavne komponente sustava

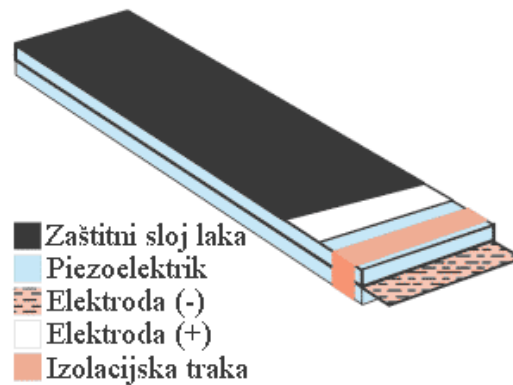
6.3 Piezoelektrični bimorfni pretvarač

Za napajanje mjerača tlaka, na bazi istraživanja opisanih u prethodnim poglavljima, predložen je mehanizam koji se temelji na inercijalnom sustavu piezoelektrične bimorfne konzole. Savijanjem konzole kinetička se energija vibracija pretvara u niskorazinsku izmjeničnu električnu energiju. Kao što je navedeno u 5. poglavlju, konvencionalni piezoelektrični bimorfi sastavljeni su od tri sloja: dva polarizirana piezoelektrična sloja i srednjeg sloja metalnog supstrata (ali i četiri elektrode koje se često zanemaruju u smislu posebnog sloja kao i slojevi epoksidnog ljepila). Međutim većina komercijalnih uređaja napravljena je od više od sedam navedenih konvencionalnih slojeva. Dodatno mogu biti uključeni npr.: zaštitni vanjski slojevi.

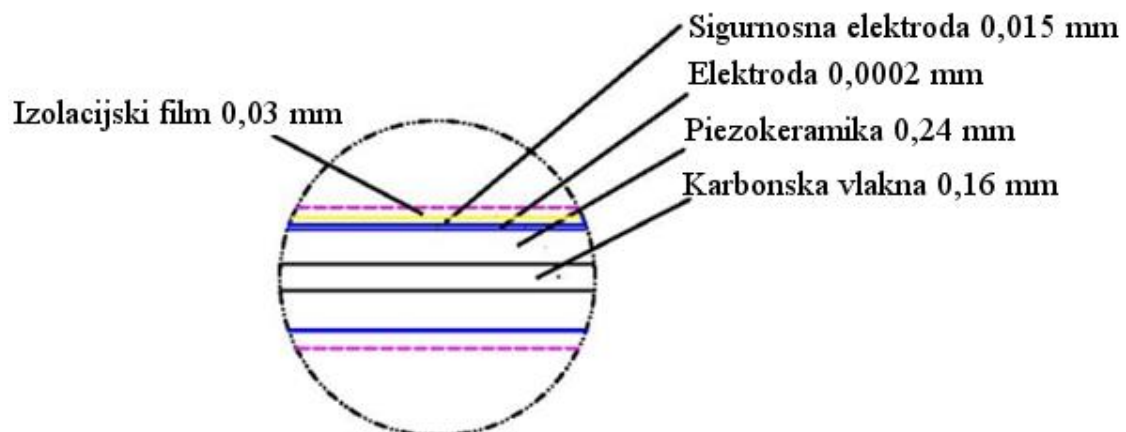
Slika 119 i Slika 120 prikazuju korišteni piezoelektrični bimorf proizvođača APC International Ltd., a dodatno je prikazana i tablica s tehničkim specifikacijama konzole (Tablica 18) [URL: APC]. Za opterećenje konzola na slobodnom kraju korišteni su jednaki utezi kao i za Midé konzole prilikom eksperimentalnih ispitivanja u poglavlju 5.

Tablica 18. Tehničke specifikacije korištenog piezoelektričnog bimorfa [URL: APC]

| Model | Duljina, mm | Širina, mm | Debljina, mm | Slobodna duljina, mm | Ukupni progib, mm | Zaustavna sila, N | Rezonantna frekvencija, Hz | Kapacitet, pF |
|---------|-------------|------------|--------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|---------------|
| 40-2020 | 40 | 20 | 0,70 | 30 | > 1,1 | > 0,60 | 170 | 120000 |



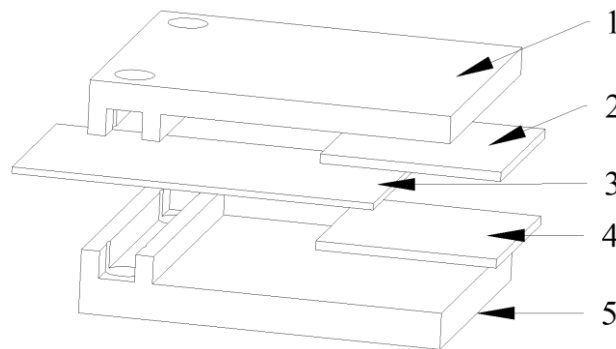
Slika 119. Piezoelektrični bimorf [URL: APC]



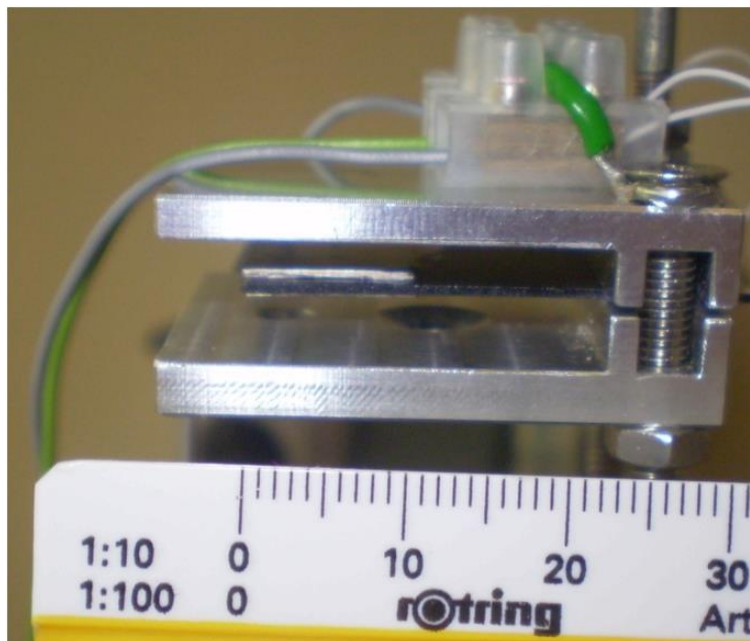
Slika 120. Detalj slojeva piezoelektričnog bimorfa korištenog na BAST sustavu [URL: APC]

6.4 Uklještenje konzole

Kako bi APC piezoelektrična konzola mogla biti korištena u savojnom načinu rada, bilo je potrebno konstruirati mehaničko uklještenje. Zbog specifičnosti montaže samog uređaja, blizine kolnika, kamenčića i raznih otpadaka koji bi pri velikim brzinama mogli oštetiti krhke i osjetljive piezoelektrične konzole, ali i zbog očekivano velikih aperiodičnih amplituda, osmišljeno je uklještenje koje s dodanim produženim dijelovima okružuje konzolu. Na kraju produljenih dijelova uklještenja nalaze se i gumeni odbijači koji bi, u slučaju velikih progiba, ublažili udarce konzole u dijelove uklještenja.



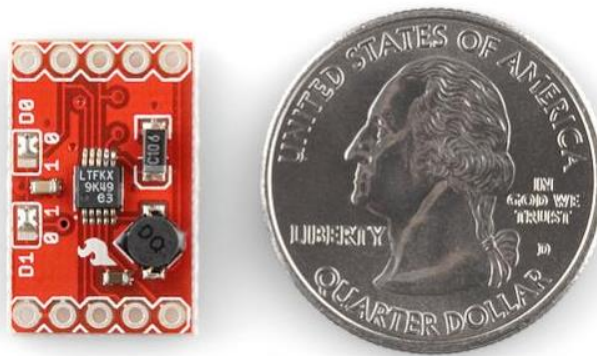
Slika 121. Prikaz prototipnog rješenja mehaničkog uklještenja: 1) gornji dio uklještenja, 2) gumena ploča, 3) piezoelektrična konzola, 4) gumena ploča, 5) donji dio uklještenja



Slika 122. Fotografija izrađenog mehaničkog uklještenja s uklještenom APC piezoelektričnom konzolom

6.5 Elektronika za upravljanje prikupljenom energijom

Zbog djelovanja kinetičke energije vibracija na piezoelektričnu konzolu dolazi do njenog savijanja pri čemu se generira izmjenični napon na izlaznim kontaktima konzole. Dobivena energija mora biti pravilno obrađena i pohranjena kako bi se mogla koristiti za napajanje istosmjernog električnog sustava kao što je uređaj za mjerenje tlaka. U tu svrhu upotrijebljen je mikroelektronički integrirani krug LTC3588-1 Linear Technology za upravljanje prikupljenom energijom [Linear Technology, 2010.].



Slika 123. LTC3588-1 integrirani krug na štampanoj pločici u usporednom prikazu s kovanicom od 25 američkih centi [Linear Technology, 2010.]

Ta niskopotrošna mikroelektronička komponenta s programabilnim ciklusima mirovanja i djelovanja projektirana je za napajanje niskopotrošne elektronike i mikroelektroničkih mjerača te je optimizirana za električne izvore s visokom izlaznom impedancijom kao što su piezoelektrične konzole (visoki iznosi napona, mali iznosi jakosti električne struje). Iznosi ulaznog napona za ovaj integrirani krug mogu se nalaziti u rasponu od $V_{IN} = 2,7$ do 20 V, dok su s druge strane piezoelektrične konzole u mogućnosti proizvesti i višestruko viši napon. U takvom se slučaju uključuje zaštitni sklop ugrađen u integrirani krug koji ne dozvoljava ulazne napone više od 20 V. Integrirani krug LTC3588-1 je namjenski izveden za direktnu interakciju s piezoelektričnim izvorom električne energije: ispravlja ulazni napon pomoću punovalnog ispravljača (Graetzov spoj), pohranjuje pretvorenu energiju na vanjski kondenzator i regulira razinu izlaznog napona pomoću uzlazno-silaznog pretvarača [Linear Technology, 2010.]. Trošilo se napaja električnom energijom u trenutku kada je napon na vanjskom ulaznom kondenzatoru viši od predefinirane granice napona. U konačnoj izvedbi prototipa korištena je zadana granica napona u iznosu od 3,3 V.

Električna energija na ulaznom kondenzatoru prenosi se na izlazni kondenzator u trenutku kada je njen iznos dovoljno visok za napajanje trošila. Ulazni i izlazni kondenzator optimizirani su u odnosu na tip trošila spojenog na uređaj za pretvaranje niskorazinske energije vibracija. U onim trenucima kada je sustav pod naponom, energija se skladišti na ulaznom kondenzatoru kojemu raste iznos napona. Na ulazu integriranog kruga pri procesu pohrane energije koriste se visoki naponi ($< 20\text{ V}$), dok je napon na trošilu ograničen na vrijednost proizašlu iz uzlazno-silaznog pretvarača (npr. $3,3\text{ V}$).

Za ovu izvdebu napajanja mjerne elektronike i odašiljača, potrebno je snabdijevati sustav s mnogo energije u kratkim vremenskim intervalima te je stoga i izlazni kondenzator optimiziran za omogućavanje viših iznosa struje u kratkim periodima rada. U dijelu 6.7.2 objašnjena je i optimizacijska procedura odabira spomenutih pasivnih elemenata.

6.6 Mjerni modul s odašiljačem

Za potrebe mjerenja i primopredaje podataka korišten je probni TPMS (engl. *tire pressure monitoring system*) uređaj tvrtke Freescale, MPXY8300 koji se sastoji od mjernog modula s bežičnim primopredajnikom i dodatnog primopredajnika kojim je omogućena komunikacija mjernog modula s računalom. U mjernom modulu uključeno je više različitih mjerača: termometar, dvoosni akcelerometar i kapacitivni mjerač tlaka [Freescale Semiconductor, 2008.]. Glavne karakteristike ovog TPMS testnog paketa predstavljene su u sljedećoj tablici (Tablica 19).

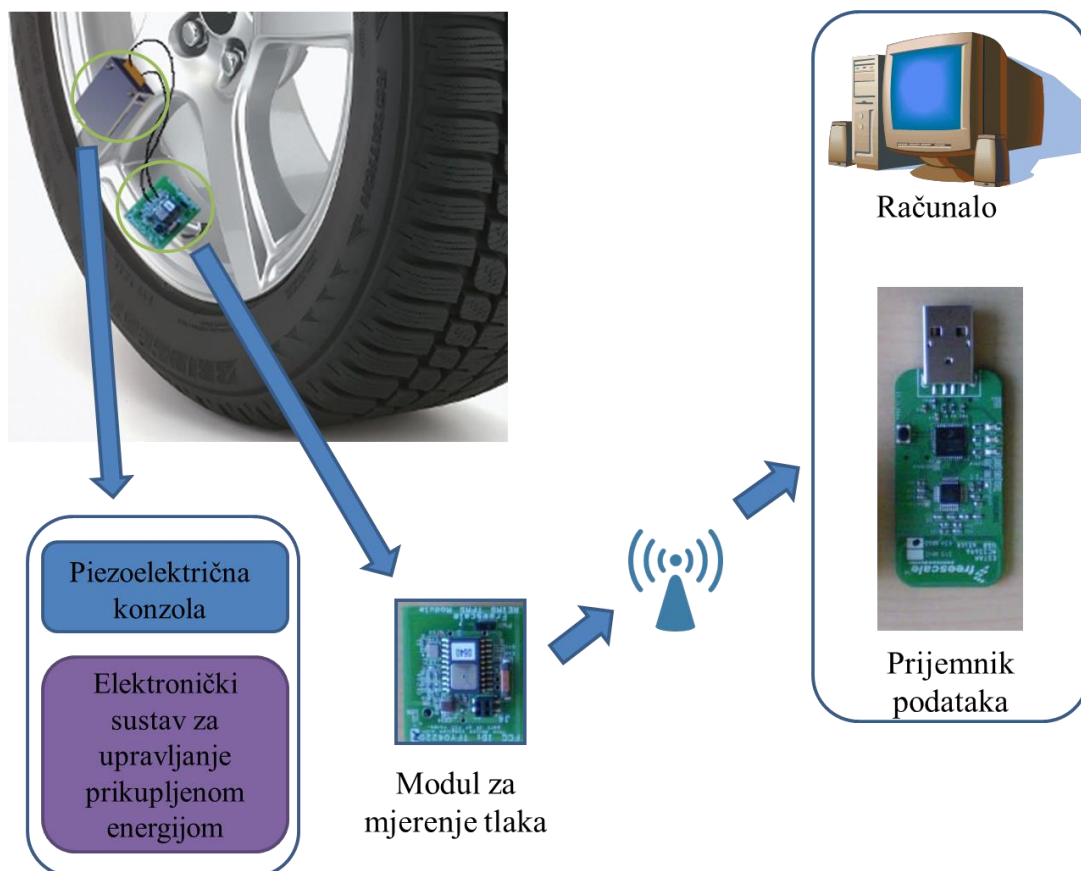
Tablica 19. Specifikacije Freescale MPXY8300 mjernog modula s bežičnim primopredajnikom [Freescale Semiconductor, 2008.]

| Mikrokontroler | Primopredajnik | Mjerači |
|--|------------------------------|---|
| 8-bit S08 MCU | 315/434 PLL-primopredajnik | X/Z akcelerometri |
| 16 kB flash | | Mjerači tlaka i temperature |
| 512B RAM | | $\pm 10\text{ kPa}$ točnost mjerača tlaka (u rasponu tlakova od $100 - 800\text{ kPa}$, $0-70\text{ }^{\circ}\text{C}$) |
| 2-kanalni, 16-bitni modulator vremena/širine pulsa | ASK i FSK modulacija signala | Filter dizajniran za zaštitu medija za pohranu podataka |
| 8-kanalni, 10-bitni AD konverter | | SOIC 20 kućište |
| Serijsko sučelje za komunikaciju | | Temperaturni raspon rada -40 do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ |



Slika 124. Freescale MPXY8300 mjerni modul: a) bežični primopredajnik i mjerač i b) USB sučelje s primopredajnikom [Petković, 2011.]

Slika 125 prikazuje cjelokupni eksperimentalni sustav BAST. Na slici je prikazan automobilski kotač opremljen BAST sustavom i shema funkcioniranja uređaja za mjerenje tlaka.



Slika 125. Eksperimentalni sustav BAST

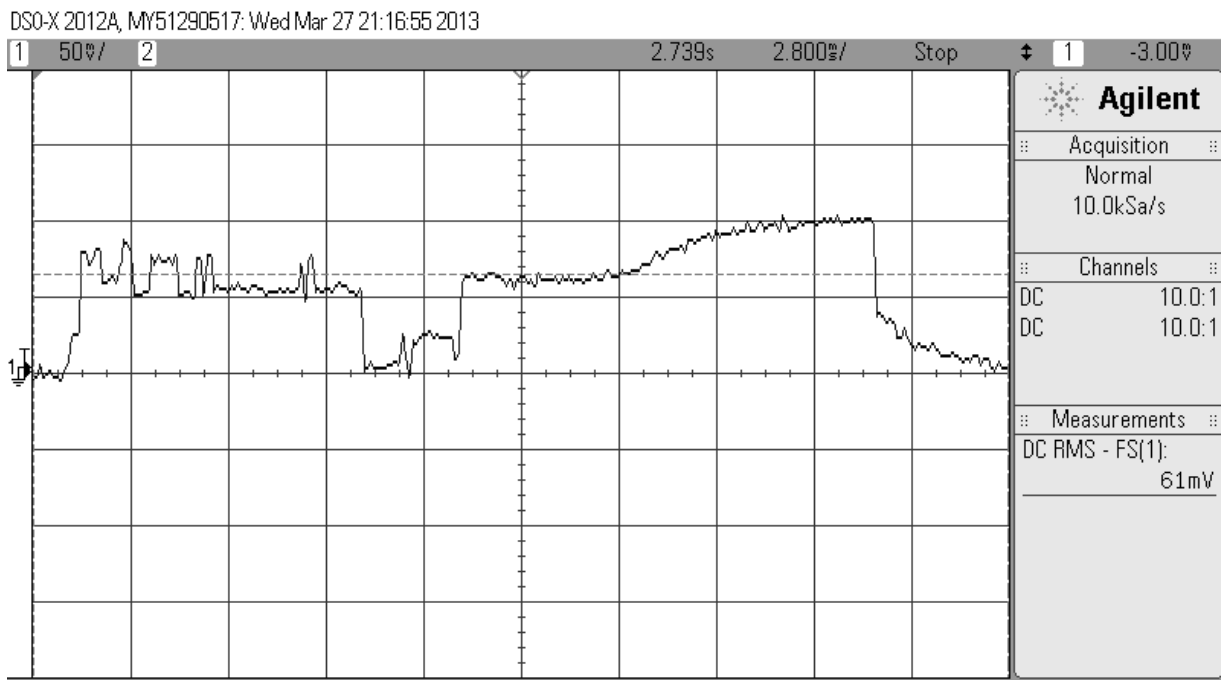
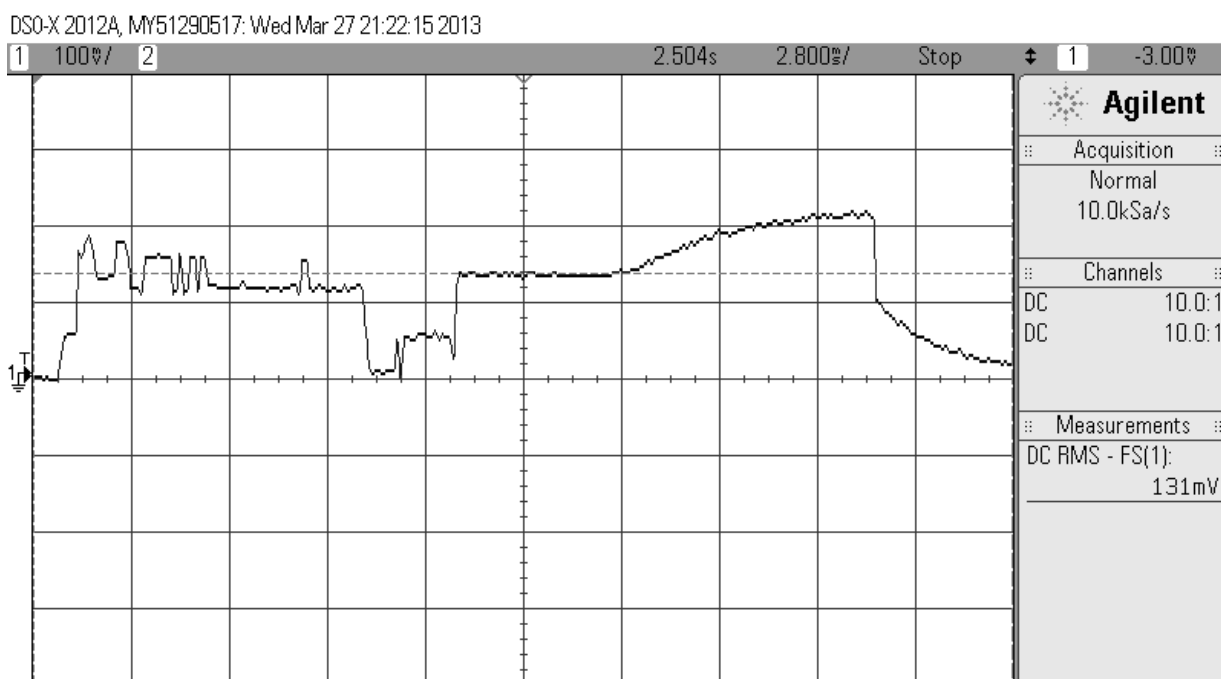
6.7 Laboratorijski eksperimenti

Prije negoli je sustav za mjerenje tlaka u pneumaticima, temeljen na upotrebi niskorazinske energije vibracija iz okoliša, testiran na automobilu u stvarnim radnim uvjetima, bilo je potrebno provesti laboratorijska ispitivanja, optimizirati izbor pasivnih elemenata za elektroniku koja upravlja prikupljenom energijom te izmjeriti električnu snagu koju je sustav u mogućnosti isporučiti.

6.7.1 Količina energije potrebna za napajanje sustava

Kako bi BAST sustav uspješno napajao mjernu elektroniku i bežični odašiljač, bilo je potrebno odabrati ulazne i izlazne kondenzatore u skladu sa zahtjevima trošila. Na ulaznom bi kondenzatoru trebalo biti moguće pohraniti dovoljno energije za napajanje trošila u određenom vremenu. Kako bi se optimizirao sustav za upravljanje prikupljenom energijom, potrebno je prvo provesti mjerenja potrošnje sustava. U tu svrhu je upotrijebljen laboratorijski istosmjerni izvor napajanja Uni-Trend UTP3704 [URL: Uni-Trend] za napajanje mjernog modula. Bežični odašiljač ugrađen u modul je ujedno i najveći potrošač, a cijeli modul se napaja naponom od 3,3 V putem elektronike za upravljanje prikupljenom energijom. Osciloskop Agilent InfiniiVision DXO-X 2012A [URL: Agilent] korišten je za mjerenje karakteristika potrošnje napajanog modula. Osciloskop se ne može koristiti za direktno mjerenje snage ili struje u sustavu pa je za mjerenje ovih veličina zapravo mjeren napon na otporniku poznatog iznosa otpora. Korišteni otpornik bio je spojen u seriju s izvorom napajanja i samim mjernim modulom. Kako bi se osigurao neometan rad sustava i smanjila disipacija električne energije na otpornicima, korišteni su vrlo mali iznosi otpora, i to dva različita iznosa kako bi bilo moguće naknadnom usporedbom verificirati mjerenja. Korišteni su otpori otpori od 10 i 22 Ω . Na sljedećim slikama (Slika 126 i Slika 127) preuzetim direktno iz osciliskopa, prikazani su RMS⁶² iznosi napona na otpornicima pri izmjerenom vremenskom periodu odašiljanja vrijednosti iz mjernog modula. Pritom je na ordinati prikazan napon na otporniku, a na apscisi vrijeme rada.

⁶² Ova prosječna vrijednost na dijagramima označena je crtkanom linijom.

Slika 126. Mjerenja RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 10 Ω Slika 127. Mjerenja RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 22 Ω

Struja I_{TPMS} prisutna u serijskom spoju otpornika za vrijeme odašiljanja t_{TPMS} može se odrediti uz pomoć Ohmovog zakona:

$$I_{TPMS} = \frac{V_{R_RMS}}{R} \quad (6.1)$$

U slučaju otpornika od 10Ω izmjeren je napon $V_{R_RMS} = 61 \text{ mV}$ (Slika 126), dok je u slučaju otpornika od 22Ω , $V_{R_RMS} = 131 \text{ mV}$ (Slika 127). Korištenjem izraza (6.1) moguće je tada izračunati jakost struje u oba slučaja:

$$I_{TPMS} = \frac{61 \text{ mV}}{10 \Omega} = 6,1 \text{ mA} \quad (6.2)$$

$$I_{TPMS} = \frac{131 \text{ mV}}{22 \Omega} = 5,95 \text{ mA} \quad (6.3)$$

Na temelju ovih jednostavnih mjerenja usvaja se prosječna vrijednost jakosti struje $I_{TPMS} = 6 \text{ mA}$. Prosječna vrijednost napona na trošilu približno je jednaka $V_{TPMS} = 3,3 \text{ V}$, uz zanemareni mali pad napona na otpornicima korištenim pri mjerenjima. Uzimajući u obzir navedene veličine moguće je izračunati električnu snagu kojom je pogonjen mjerni modul s odašiljačem u razmatranom vremenu odašiljanja t_{TPMS} kao:

$$P_{TPMS}(t_{TPMS}) = I_{TPMS}(t_{TPMS}) \cdot V_{TPMS} = 6 \text{ mA} \cdot 3,3 \text{ V} \approx 20 \text{ mW} \quad (6.4)$$

Ovdje valja napomenuti da proračunata snaga vrijedi samo za kratke vremenske periode i to one u kojima se odašilju podaci.

6.7.2 Izbor pasivnih elemenata za upravljačku elektroniku

S poznatim iznosom potrebne električne snage na trošilu (mjernom modulu s odašiljačem) pristupa se optimiziranju pasivnih elemenata sustava za upravljanje prikupljenom energijom (Slika 128). Vrijednost kapaciteta C_{IN} ulaznog kondenzatora može se odrediti korištenjem izraza za proračunavanje potrebne snage na trošilu P_{LOAD} u vremenskom intervalu t_{LOAD} [Linear Technology, 2010.]:

$$P_{LOAD} t_{LOAD} = \frac{1}{2} \eta \cdot C_{IN} \cdot (V_{IN}^2 - V_{UVLOFALLING}^2), \quad (6.5)$$

pa je C_{IN} jednako

$$C_{IN} = \frac{2 \cdot P_{LOAD} t_{LOAD}}{\eta \cdot (V_{IN}^2 - V_{UVLOFALLING}^2)}. \quad (6.6)$$

V_{IN} je pritom ispravljeni ulazni napon (izmjenični u istosmjerni) na prvom kondenzatoru dok je $V_{UVLOFALLING}$ granični iznos napona pri kojem se gasi uzlazno-silazni pretvarač (engl. *buck*

converter), s faktorom iskoristivosti η , koji snabdijeva izlazni kondenzator s reguliranim naponom. Ulazni napon V_{IN} ovisi o amplitudama vibracija konzole i ne može se egzaktno odrediti pa je potrebno odrediti prosječnu vrijednost koja će se koristiti u proračunu. Ako je $V_{INMIN} = 10$ V (eksperimentalno utvrđeno), a $V_{INMAX} = 20$ V (unutarnje ograničenje integriranog kruga LTC3588-1), tada je, pretpostavljajući harmonijski odziv, prosječna vrijednost $V_{IN} = 15$ V. Za slučaj da je izlazni napon odabran postavkama sklopa 3,3 V, vrijednost $V_{UVLOFALLING}$ će biti 3,67 V (također predefiniрана karakteristika integriranog kruga). Prosječna iskoristivost uzlazno-silaznog pretvarača funkcija je ulaznog napona V_{IN} , struje trošila I_{TPMS} i induktiviteta zavojnice L pa se iskoristivost procjenjuje na temelju podataka dostupnih u tehničkim specifikacijama integriranog kruga LTC3588-1 [Linear Technology, 2010.].

Iznos $P_{TPMS}(t_{TPMS})$ određuje se za vrijeme trajanja mjerenja i prijenosa podataka, odnosno za ono vrijeme u kojem je mjerni modul s odašiljačem uključen pa ga je stoga moguće izjednačiti s izrazom (6.4) odnosno energijom potrebnom za napajanje trošila $P_{LOAD} \cdot t_{LOAD}$:

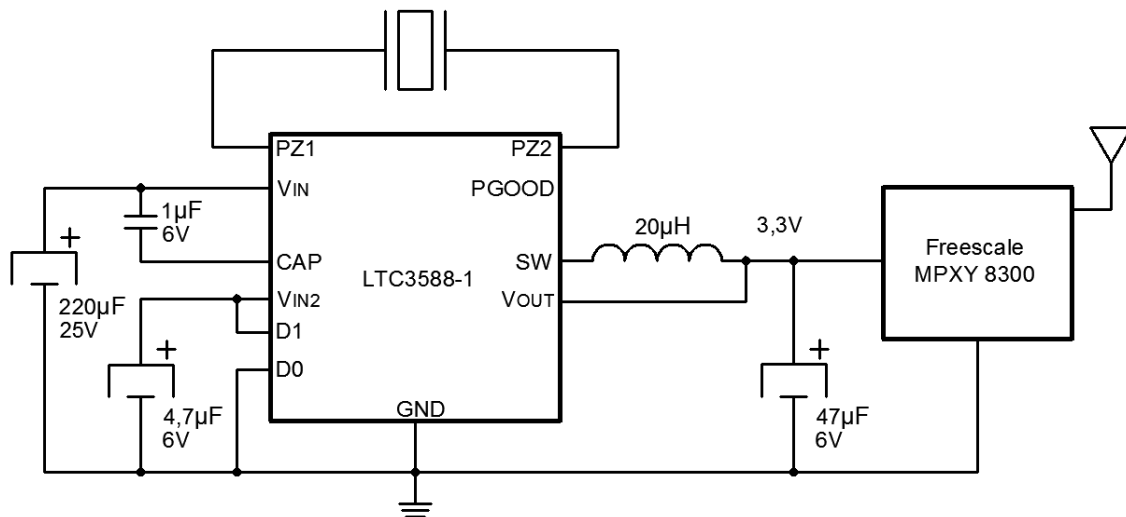
$$P_{TPMS}(t_{TPMS}) = P_{LOAD} \cdot t_{LOAD} \quad (6.7)$$

Optimalnu vrijednost ulaznog kondenzatora je tada moguće izračunati koristeći izraze (6.6) i (6.7):

$$C_{IN} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot (15^2 - 3,67^2)} = 2,36 \cdot 10^{-4} = 236 \mu\text{F}$$

Za ulazni kondenzator usvaja se najbliža standardna vrijednost kondenzatora $C_{IN} = 220 \mu\text{F}$ dok se iznos C_{OUT} određuje eksperimentalno. Ne preporučuju se kondenzatori s kapacitetom manjim od $10 \mu\text{F}$ jer bi moglo doći do nepoželjnog ‘mreškanja’ (engl. *rippling*) izlaznog napona, odnosno prevelike frekvencije punjenja i pražnjenja izlaznog kondenzatora što bi onemogućilo ispravno funkcioniranje trošila. Treba uzeti u obzir i to da se vrijeme mirovanja integriranog kruga smanjuje s povećanjem struje trošila, ali i sa smanjenjem izlaznog kapaciteta.

Za ovaj slučaj odabire se $C_{OUT} = 47 \mu\text{F}$. Uz to je potrebna upotrijebiti i kondenzatore preporučene u tehničkoj dokumentaciji integriranog kruga LTC 3588-1 [Linear Technology, 2010.], koji omogućavaju nesmetani rad uzlazno-silaznog pretvarača i to kondenzatori kapaciteta $1 \mu\text{F}$ (između V_{IN} i CAP kontakata kondenzatora uzlazno-silaznog pretvarača) i $4,7 \mu\text{F}$ (između V_{IN2} i GND kontakata odnosno uzemljenja). U tehničkoj dokumentaciji se preporučuje i korištenje zavojnice induktiviteta $L = 10 \mu\text{H}$, međutim u ovom slučaju, kako bi se donekle povećala učinkovitost uzlazno-silaznog pretvarača, odabrana je zavojnica induktiviteta $20 \mu\text{H}$.



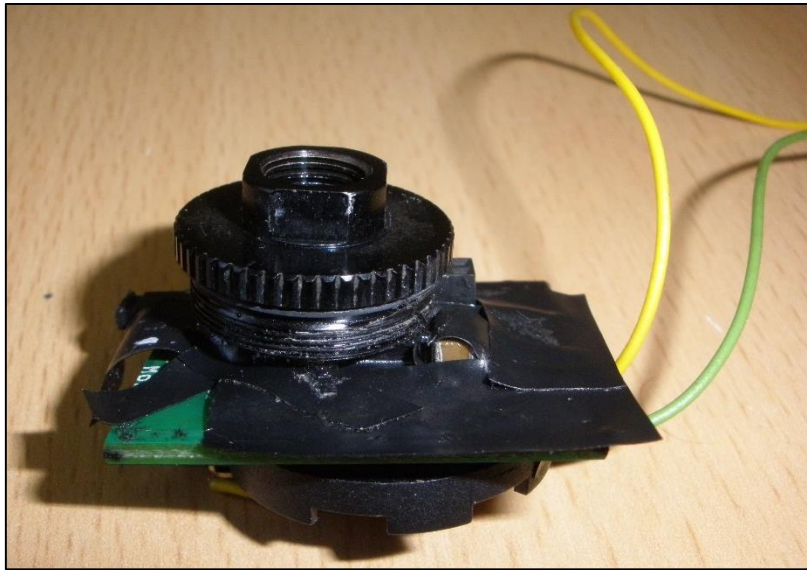
Slika 128. Arhitektura BAST sustava

6.7.3 Laboratorijski eksperimenti na konačnoj izvedbi sustava

Kako bi se procijenila učinkovitost razvijene arhitekture sustava za bežično autonomno motrenje tlaka u automobilskim gumama (Slika 128) temeljenog na prikupljanju niskorazinske energije vibracija iz okoliša, bilo ga je potrebno eksperimentalno testirati u laboratorijskim uvjetima. U tu svrhu korišten je eksperimentalni postav opisan u poglavlju 5.2.3.3 ove disertacije. Upravljačka jedinica vibracijskog uzбудnika dostupnog na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci omogućuje uzbudu nasumičnim vibracijama s kontrolom sile uzbude, pa je ta postavka uzбудnika korištena i u ovdje opisanim eksperimentima za simulaciju aperiodičnih udara koji su prisutni u okolini automobilske kotača (Slika 130). Kao testni pneumatik korišten je kotač brdskog bicikla, a mjerni modul je morao biti modificiran kako bi ga bilo moguće spojiti na automobilski Schrader ventil. U svrhu modifikacije upotrijebljen je dio kućišta komercijalnog baterijskog uređaja za direktno mjerenje tlaka u pneumaticima motornih vozila (dio s navojem i iglom za otvaranje ventila, Slika 129). Određeni dijelovi mjernog modula morali su biti izbrušeni brusnim papirom kako bi modul stao u kućište komercijalnog uređaja. Modul je na kraju zalijepljen dvokomponentnim ljepilom u kućište kako bi se osigurala njegova nepropusnost.

Eksperiment je provodjen zadavanjem uzbudne amplitude nasumičnih vibracija u upravljačkoj jedinici vibracijskog uzбудnika, nakon čega bi započela nasumična vibracijska uzbuda uklještene piezoelektrične konzole spojene na vibracijski uzбудnik. Ulazi i izlazi iz

upravljačke elektronike pritom su cijelo vrijeme praćeni na osciloskopu, a bežična transmisija podataka motrena je pomoću prijmnika spojenog na prijenosno računalo.



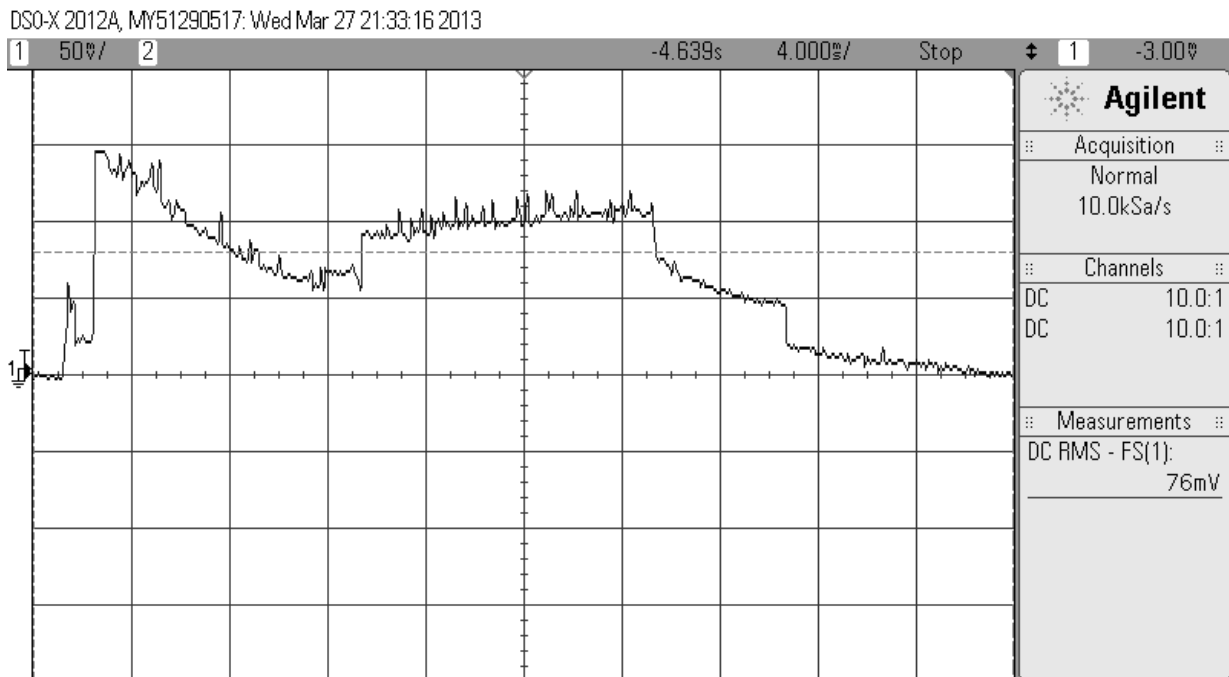
Slika 129. Mjerni modul s izvađenom baterijom i priključenim kontaktima za spajanje sa sustavom za upravljanje prikupljenom energijom.

U opisanoj optimiziranoj konfiguraciji BAST uređaja, eksperiment je rezultirao potpunom funkcionalnošću sustava. Mjerno-odašiljački modul je u prosjeku svakih 45 sekundi izvršavao svoju funkciju i odašiljao podatke tlaka/temperature/akceleracije na prijmnik spojen na računalo.

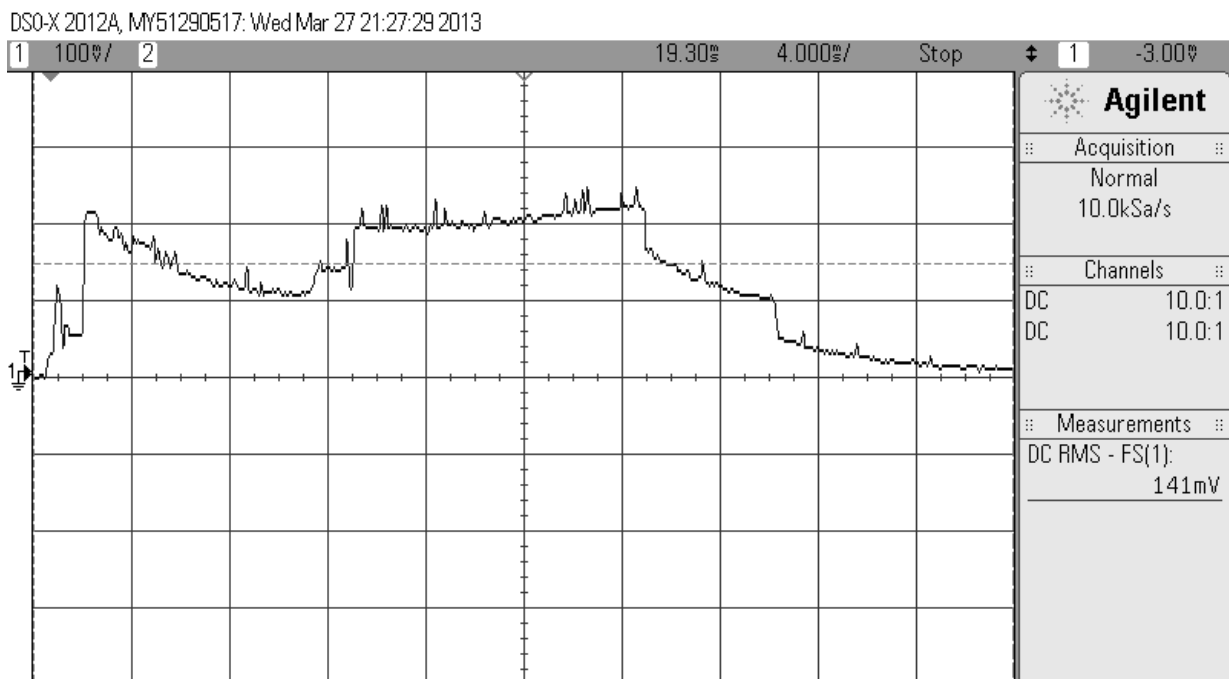


Slika 130. Eksperimentalni postav u Laboratoriju za precizno inženjerstvo

Provedeno je i mjerenje snage kojom je trošilo napajano prema metodologiji opisanoj u potpoglavlju 6.7.1 i to za ovdje predstavljenu konačnu izvedbu sustava s nasumično pobuđenom piezoelektričnom konzolom kao izvorom napona (umjesto u 6.7.1 korištenog laboratorijskog izvora napajanja):



Slika 131. Mjerenje RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 10 Ω



Slika 132. Mjerenje RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 22 Ω

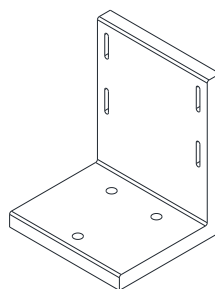
Uvrštavanjem izmjerenog napona (Slika 131, 76 mV i Slika 132, 141 mV) V_{R_RMS} u izraz (6.1) izračuna se prosječni iznos jakosti struje $I_{TPMS} = 7$ mA. Tada je moguće izračunati i snagu kojom se napaja trošilo u točno određenom vremenskom periodu rada mjerno-odašiljačkog modula $P_{TPMS} (t_{TPMS}) = 23$ mW. Piezoelektrični pretvarač u tom slučaju isporučuje gustoću energije od $2,68$ mW/cm³ ako se za volumen uređaja računa po gabaritnim dimenzijama uklještenja ($40 \times 20 \times 10,7$ mm). Ako se prikazani eksperimentalni rezultati usporede s preliminarnim rezultatima (Slika 126 i Slika 127), moguće je primijetiti da je pad napona na otpornicima viši u slučaju korištenja piezoelektrične konzole koja proizvodi visoke napone, zbog čega je prosječna snaga porasla dok se period transmisije povećao.

6.8 Eksperimenti u realnim uvjetima na prometnici

Za potrebe mjerenja u operativnim uvjetima na prometnici bilo je potrebno smjestiti izrađeni prototip uređaja na automobilski kotač i to u dvije konfiguracije (Slika 134.):

- a) konfiguracija u kojoj je rotacijska os kotača paralelna s uzdužnom osi konzole te
- b) konfiguracija u kojoj je uzdužna os konzole okomita na rotacijsku os kotača.

Prva konfiguracija osmišljena je na temelju dotadašnjih spoznaja o uzbuđeni piezoelektričnih konzola: vibracije okomite na os kotača utjecat će na savijanje konzole postavljene paralelno s osi kotača. Za ovu konfiguraciju osmišljen je i dodatni L nosač koji je omogućavao zahtijevanu konfiguraciju (Slika 133).



Slika 133. L nosač mehaničkog uklještenja za montažu na automobilski kotač paralelno s osi kotača

Na temelju neuspješnih eksperimenata s prvom konfiguracijom donosen je zaključak kako snažna centrifugalna sila (čiji utjecaj prvotno nije uzet u obzir), djeluje na uteg monitran na konzolu, uzrokuje kvazi-statički progib konzole i onemogućuje joj daljnje savijanje. Ova

konfiguracija je funkcionirala jedino na makadamskom terenu i to pri malim brzinama. U sljedećim pokušajima je stoga L nosač odstranjen i mehaničko uklještenje je priljubljeno donjom stranom na naplatak kotača. Već pri prvoj vožnji i prijeđenih udaljenosti od 100 m ceste u gradskim uvjetim vožnje, sustav je izvrsno funkcionirao i u kokpitu automobila je na prijenosnom računalu bilo moguće očitati stanje tlaka, temperature i akceleracije na kotaču.⁶³



a)

b)

Slika 134. Prikaz dviju različitih konfiguracija montaže uređaja na automobilski kotač: a) uzdužna os konzole paralelna s osi kotača i b) uzdužna os konzole okomita na os kotača

Ovdje je opisan konceptualni prototip predloženog uređaja, dok je u konačnim izvedbama zamišljeno smještanje cijelog uređaja unutar malo veće kapice automobilskog ventila (promjera 2 cm i visine 3 cm), ili unutar tijela standardnog uskočnog Schrader ventila. U odnosu na postojeća baterijska rješenja, predloženi uređaj u svakom slučaju omogućava znatnu tehnologijsku prednost zbog eliminacije baterije kao potrošnog izvora energije te produljenja vijeka trajanja bežičnih senzora i samih guma. Samim time u okolišu će se naći mnogo manje potrošenih baterija i guma ili senzora. U odnosu na postojeća bezbaterijska rješenja ovakav uređaj donosi, dakle, inovaciju u obliku mehanizma pretvorbe energije, ali i u jednostavnosti konstrukcije, zamjene i prijenosa uređaja s vozila na vozilo ili s jednog seta kotača na drugi (poglavito izvedba u kapici ventila). Dodatna vrijednost je i jednostavna instalacija na rabljena vozila.

⁶³ Dokumentarni video završne faze eksperimenata: <http://www.youtube.com/watch?v=mdJDRv4XAcY>.

6.9 Samoregulirajući autonomni ventil - SAV

U ovoj cjelini izložena je ideja proizašla iz rada na sustavu BAST. Za razliku od gore opisanog sustava, izum nazvan samoregulirajućim autonomnim ventilom rješava tehnološki izazov između dostupnih tehnologija za mjerenje tlaka u gumama, i tehnologije za konstantno održavanje ispravnog tlaka u gumama.

Izum je uspješno prijavljen na FIDES projekt (*From IP to Business - Developing Environment for Start-up Companies*) Poslovno-inovacijske agencije Republike Hrvatske (BICRO) te je predložen za predpatentno istraživanje i pisanje patentne prijave. Ovaj izum, iako bez prototipnog rješenja, prijavljen je u veljači 2013. godine Državnom zavodu za intelektualno vlasništvo (red. br. P20130370A) i trenutno je u procesu patentnog ispitivanja za ostvarivanje potpune patentne zaštite.

6.9.1 Kratki opis predložene tehnologije

Uređaj SAV razvijen u sklopu istraživanja opisanih u ovoj disertaciji, služi za direktno održavanje tlaka u pneumatiku (npr. automobilske gume) i odašiljanje vrijednosti tlaka bežičnim putem, za svaki pojedini elastični pneumatski spremnik u sustavu (na vozilu). Uređaj se ugrađuje direktno na ventil spremnika (automobilske pneumatike ili opečnito elastičnog pneumatskog spremnika⁶⁴) u obliku povećane kapice ventila ili je ugrađen u tijelo standardnog uskočnog ventila. U slučaju primjene kod automobila, vozač u kokpitu predefinira željeni tlak u gumama, a uređaj automatski mjeri tlak u svakoj pojedinoj gumi te reagira i na najmanje odstupanje od nominalne vrijednosti tlaka (uzrokovano, primjerice, promjenom temperature zraka unutar gume ili curenjem zraka kroz mikropukotine pneumatike), na način da pomoću ugrađene mikropumpe nadopunjava zrak u gumi ili ga pomoću mikro ventila ispušta iz gume. Za pogon uređaja ne koriste se baterije već mehanizmi pretvorbe niskorazinske kinetičke energije vibracija u električnu energiju pomoću piezoelektičnog pretvornika opisani u ovoj disertaciji.

⁶⁴ Pod pojmom elastičnog pneumatskog spremnika u predmetnom izumu se podrazumijevaju gume vozila, baloni, cijevi, jastuci, membrane, lopte za sport i ostali spremnici pod tlakom s mogućnošću elastične deformacije.

6.9.2 Stanje tehnike

Predložena su brojna rješenja izloženog tehničkog problema, međutim rijetka su ona sveobuhvatna i prilagođena postojećim vozilima i drugim konstrukcijama. Jedno od najrobusnijih dosad izvedenih rješenja potpune automatske regulacije tlaka, koje se najčešće koristi kod cestovnih vozila, je centralni sustav tlačenja zraka (engl. CTIS – *Central Tire Inflation System*, proizvođači: Dana Corporation & Nexter)[URL: Dana; URL: Nexter] iz centralne kompresorske jedinice s kompletnom razvodnom infrastrukturom, od kompresora do ventila na svakom kotaču. Zbog svoje težine i komplicirane instalacije ovaj je sustav pogodan samo za velika cestovna vozila te vozila za vojsku. Dosad su predložena i brojna rješenja regulacije tlaka koja predstavljaju decentraliziranu automatsku regulaciju i koja za razliku od CTIS sustava s centralnim kompresorom predviđaju ugradnju spremnika pod tlakom unutar svakog elastičnog pneumatskog spremnika čime se, naravno, unosi dodatna težina u cjelokupni sustav, a i nastaju dodatne komplikacije zbog nadopunjavanja spremnika (koji se nalazi unutar svakog elastičnog pneumatskog spremnika). Jedno od najnovijih predloženih rješenja je i peristaltički⁶⁵ sustav upuhivanja stlačenog zraka u elastični pneumatski spremnik, bez potrebe za izvorom energije (engl. AMT – *Air Maintenance Technology*) [URL: Goodyear]. Ovaj sustav, međutim, ne omogućava kontrolu tlaka, kao ni izbacivanje zraka iz gume u slučaju previsokog tlaka. Svi navedeni uređaji uključuju problem centralnog kompresora s razvodnicima ili spremnika pod tlakom unutar već postojećeg elastičnog pneumatskog spremnika. S predloženim se rješenjem, navedeni problemi u potpunosti eliminiraju.

Potrebno je uzeti u obzir i patente kojima je zaštićeno isključivo autonomno motrenje tlaka u automobilskim gumama: [Snyder et al. 1970., Dussinger et al. 2012.]

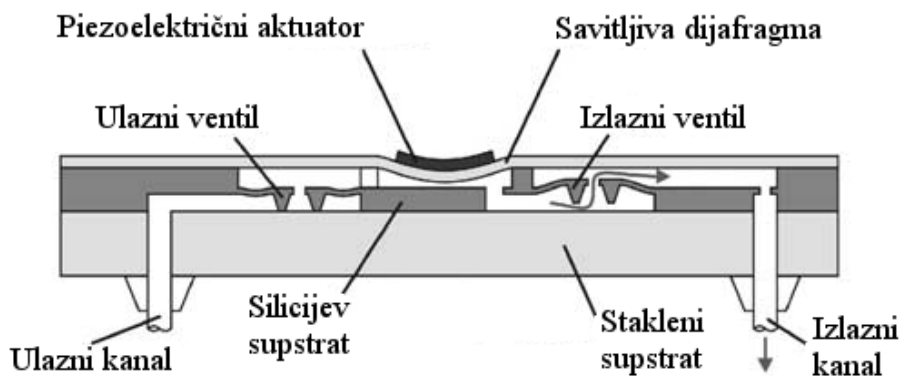
SAV inovacija omogućava održavanje konstantnog tlaka u automobilskim gumama i to s potpuno autonomnim rješenjem, neovisnom o baterijama.

6.9.3 Suština izuma

Primarni cilj predmetnog izuma je mehatronički sustav za motrenje i regulaciju tlaka zraka u elastičnim pneumatskim spremnicima kojemu, za razliku od spomenutih izvedbi, nije potreban spremnik zraka, već se potreban zrak dobavlja izravno iz atmosfere. S obzirom na to da predmetni izum ne sadrži spremnik zraka, ovakvo rješenje predstavlja veliko pojednostavljenje

⁶⁵ Peristaltičke pumpe oponašaju prirodne valne kontrakcije i relaksacije glatkih mišića probavnog trakta.

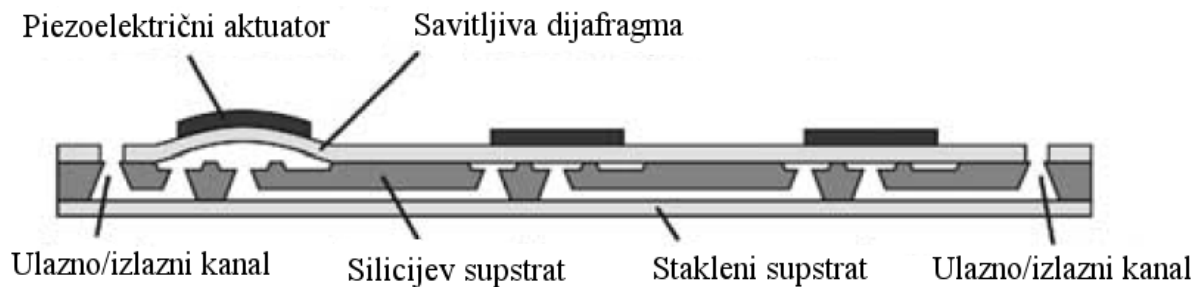
u odnosu na izume opisane u stanju tehnike. Naime, kod predmetnog izuma se ovisno o potrebi uključuje mikropumpa (Slika 135 i Slika 136) koja iz atmosfere dobavlja potreban zrak čime se eliminira potreba za ugradnjom dodatnog spremnika i instalacije. Ovakvim sustavom moguća je kompenzacija vrlo malih promjena tlaka koje se događaju čak i tijekom vremena kada je elastični pneumatski spremnik u stanju mirovanja, u ovisnosti o vanjskoj temperaturi koja direktno utječe na tlak u elastičnom pneumatskom spremniku zraka. Željeni tlak moguće je definirati putem kontrolnog uređaja. Tada je trenutni tlak u pojedinom elastičnom pneumatskom spremniku zraka dostupan na kontrolnom uređaju kao informacija korisniku.



Slika 135. Jednosmjerna mikropumpa s piezoelektričnim pokretačem [Woiias, 2005.]

Sustav samoregulirajućeg autonomnog ventila sadrži:

- kućište sustava samoregulirajućeg autonomnog ventila;
- mikropumpu s jednim ili više mikroventila;
- regulator tlaka;
- kanal za dobavu zraka iz atmosfere koji je direktno spojen s mikropumpom, s regulatorom za upravljanje mikropumpom i regulaciju protoka;
- mikroventil za reguliranje ispuštanja zraka u atmosferu;
- kanal za ispuštanje zraka u atmosferu izravno spojen s mikroventilom za ispuštanje zraka temeljem podataka iz regulatora tlaka;
- kanal za inicijalno punjenje elastičnog pneumatskog spremnika;
- mjerač tlaka;
- napajanje.



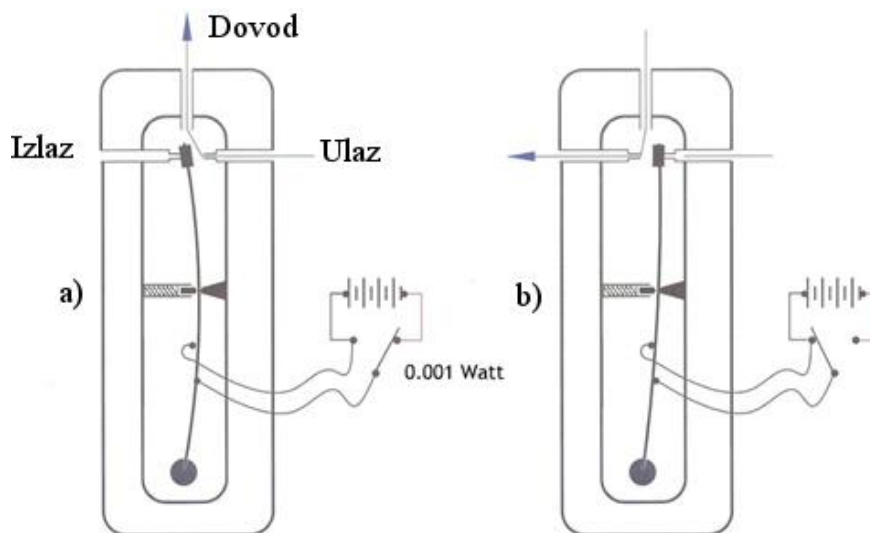
Slika 136. Peristaltička mikropumpa s mogućnošću dvosmjernog rada [Woiias, 2005.]

6.9.4 Razrada komponenata sustava

Mikropumpa je u predloženom izumu upravljana pomoću regulatora tlaka i postavljena je tako da ne priječi inicijalno punjenje elastičnog pneumatskog spremnika. Ova je komponenta već komercijalno dostupna u različitim izvedbama, međutim u dosadašnjoj literaturi nije još istražena mikropumpa koja radi pri tlakovima potrebnim za održavanje nazivnog tlaka u automobilskim gumama. Preliminarnim proračunima ustanovljeno je da bi trebalo serijski spojiti barem četiri trenutno dostupne mikropumpe za postizanje željenih tlakova. Prateći trendove rasta učinkovitosti mikrotehnologije (Slika 3.) u skoroj budućnosti će sigurno i ovaj problem biti riješen.

Mikropumpe su najčešće pokreću piezoelektrično ili elektrostatski, a proizvode se poznatim MEMS tehnikama ili mikropovršinskom obradom silicija. U jednoj izvedbi predmetnog izuma, mikropumpa je jednosmjerna te omogućuje samo dobavu zraka iz atmosfere u elastični pneumatski spremnik. U tom slučaju, piezoelektrični mikroventil (Slika 137) za reguliranje ispuštanja zraka u atmosferu se nalazi izvan mikropumpe i spojen je na kanal za ispuštanje zraka u atmosferu.

U drugoj izvedbi predmetnog izuma, mikropumpa je dvosmjerna te ima ugrađena najmanje dva mikroventila. Jedan od mikroventila u mikropumpi služi za regulaciju ispuštanja zraka u atmosferu. U tom slučaju, kanal za dobavu zraka iz atmosfere je istovremeno i kanal za ispuštanje zraka u atmosferu. Ovisno o izvedbi dvosmjerne mikropumpe, mikroventili mogu raditi odvojeno tako da jedan kontrolira dobavu zraka, odnosno tlačenje zraka iz atmosfere, a drugi kontrolira ispuštanje zraka u atmosferu. Moguća je i izvedba mikropumpe gdje dva ili više mikroventila rade istovremeno kontrolirajući i tlačenje i ispuštanje zraka.



Slika 137. Primjer funkcije piezoelektričnog mikroventila: a) ulaz fluida u sustav, b) ispušt fluida izvan sustava [URL: Piezovalve]

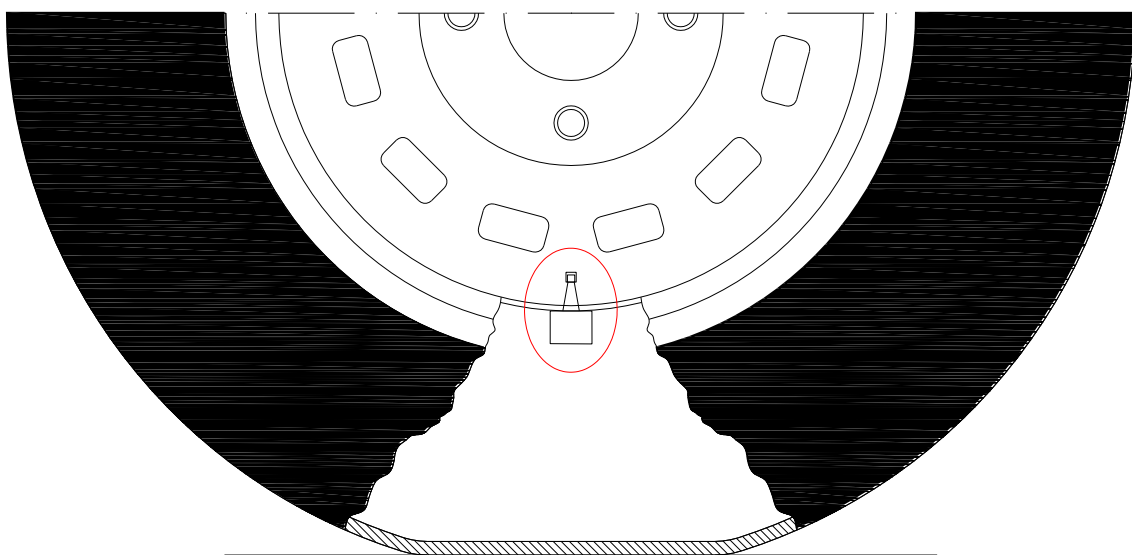
Druga važna komponenta sustava je mjerač tlaka koji služi kao povratna veza regulatoru tlaka, ali i kao informacija o trenutnom tlaku. Da bi se informacija o tlaku mogla proslijediti korisniku uređaja, odnosno da bi korisnik mogao zadati potreban tlak, poželjno je da predmetni izum sadrži primopredajnik vezan s kontrolnim uređajem koji se sastoji od numeričke tastature i digitalnog indikatora razine tlaka u svakom elastičnom spremniku sustava. Poželjno je da se za prijenos informacije o tlaku koristi niskopotrošni modul za bežičnu primopredaju informacije o tlaku.

Sljedeća komponenta sustava je napajanje. Kod pojednostavljene izvedbe u kojoj se koristi baterija, sustav ima autonomiju definiranu vijekom trajanja baterije. Prosječan vijek trajanja baterije kod nadzora tlaka u elastičnim pneumatskim spremnicima je oko sedam godina, dok je kod objedinjenog sustava motrenja i regulacije tlaka znatno kraći zbog veće potrošnje energije.

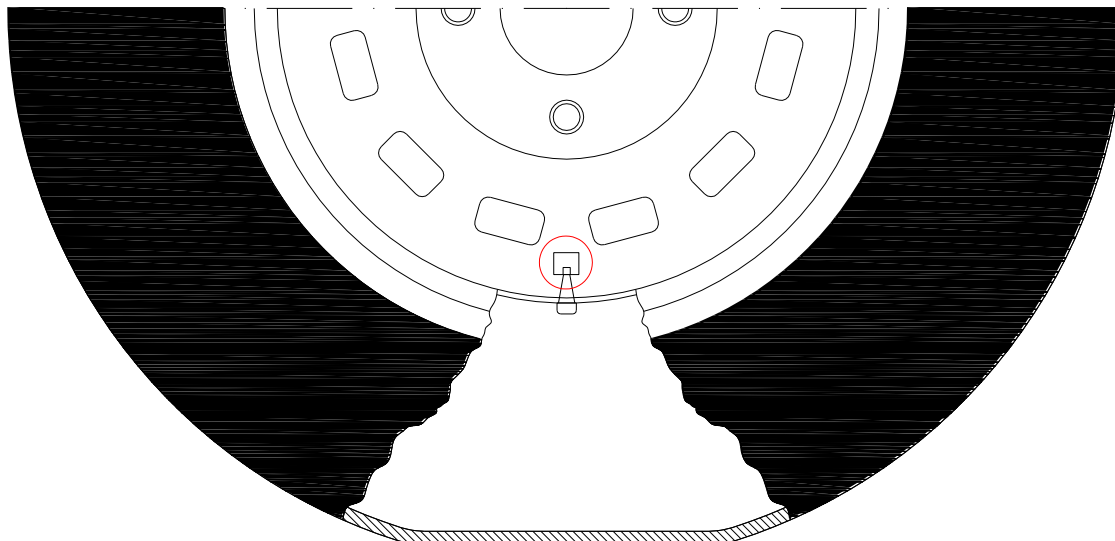
Kod izvedbe potpuno autonomnog rješenja, za napajanje se upotrebljava sustav za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju s pripadnim elektroničkim komponentama za upravljanje električnom energijom. Takva izvedba napajanja sustava je ona gdje se spremnik električne energije (baterija ili kondenzator velikog kapaciteta) nadopunjava na principu pretvaranja kinetičke energije u električnu energiju. Mogući principi pretvorbe su: a) piezoelektrična pretvorba, b) elektromagnetska pretvorba, c) elektrostatička pretvorba i d) princip temeljen na kombinaciji prethodnih triju pretvorbi. Piezoelektrični princip je opisan u ovoj disertaciji, a u slučaju primjene principa elektromagnetske indukcije, sustav za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju može, također, biti izveden konzolno, s tim da

konzola nije piezoelektrična, a utegna slobodnom kraju zamjenjuje magnet koji se slobodno kreće oko zavojnice. Druga varijanta sustava za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju temeljenog na elektromagnetskoj indukciji ne sadrži konzolu, već se magnet kreće unutar uležištenja oko kojeg se nalazi zavojnica. Kod elektrostatske pretvorbe iskorištava se energija odbojne sile između paralelnih ploča mikrokondenzatora (Slika 13) izvedenog u obliku ukrštenog češlja (engl. *comb drive*). Moguće je izgraditi sustav za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju, temeljen na kombinaciji predloženih metoda i to npr. koristeći konzolnu konstrukciju za pretvorbu pomoću elektromagnetske indukcije, s time da je konzola ujedno i piezoelektrična, što dovodi do multi-modalne pretvorbe kinetičke energije vibracija u električnu energiju. Svaki od navedenih principa mora sadržavati sustav upravljanja i skladištenja dobivene električne energije.

Poželjno je da se za kućište sustava samoregulirajućeg autonomnog ventila koristi sam ventil elastičnog pneumatskog spremnika. Na taj način ugradnja predmetnog izuma u elastični pneumatski spremnik postaje izuzetno jednostavna. Slika 138 prikazuje smještaj uređaja na kotaču, a Slika 140 prikazuje varijantu uređaja s dvosmjernom mikropumpom i sljedećim sastavnim dijelovima: 1) autonomno napajanje sustava, 2) sustav regulacije tlaka, 3) dvosmjerna mikro pumpa, 4) mikro kanal za dopunjavanje ili ispuštanje zraka u atmosferu, 5) tijelo ventila, 6) kanal za inicijalno punjenje pneumatika zrakom, 7) piezoelektrični senzor tlaka i 8) bežični primopredajnik.

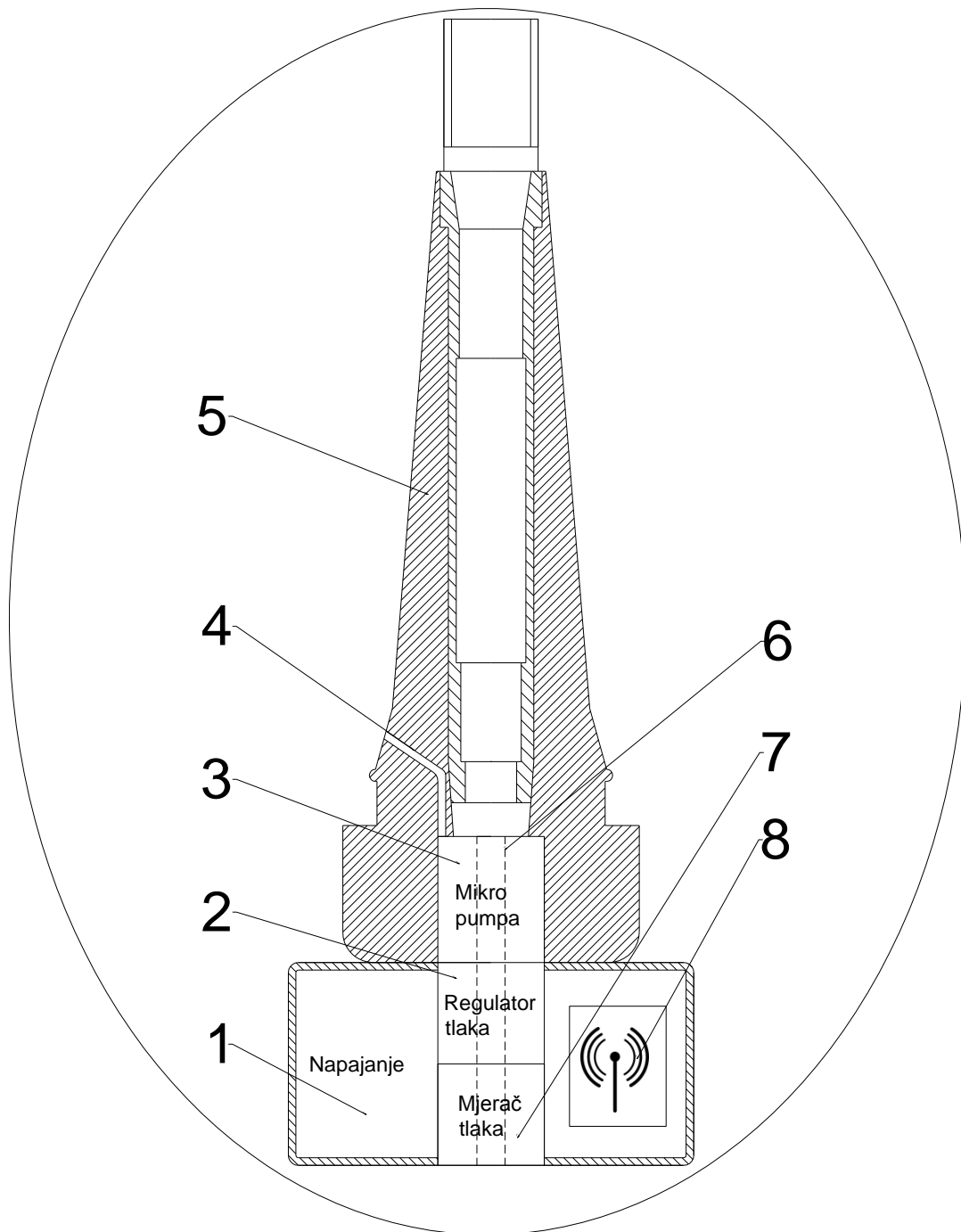


Slika 138. Varijanta SAV izuma: sustav je smješten unutar tijela uskočnog automobilskog ventila unutar kotača.

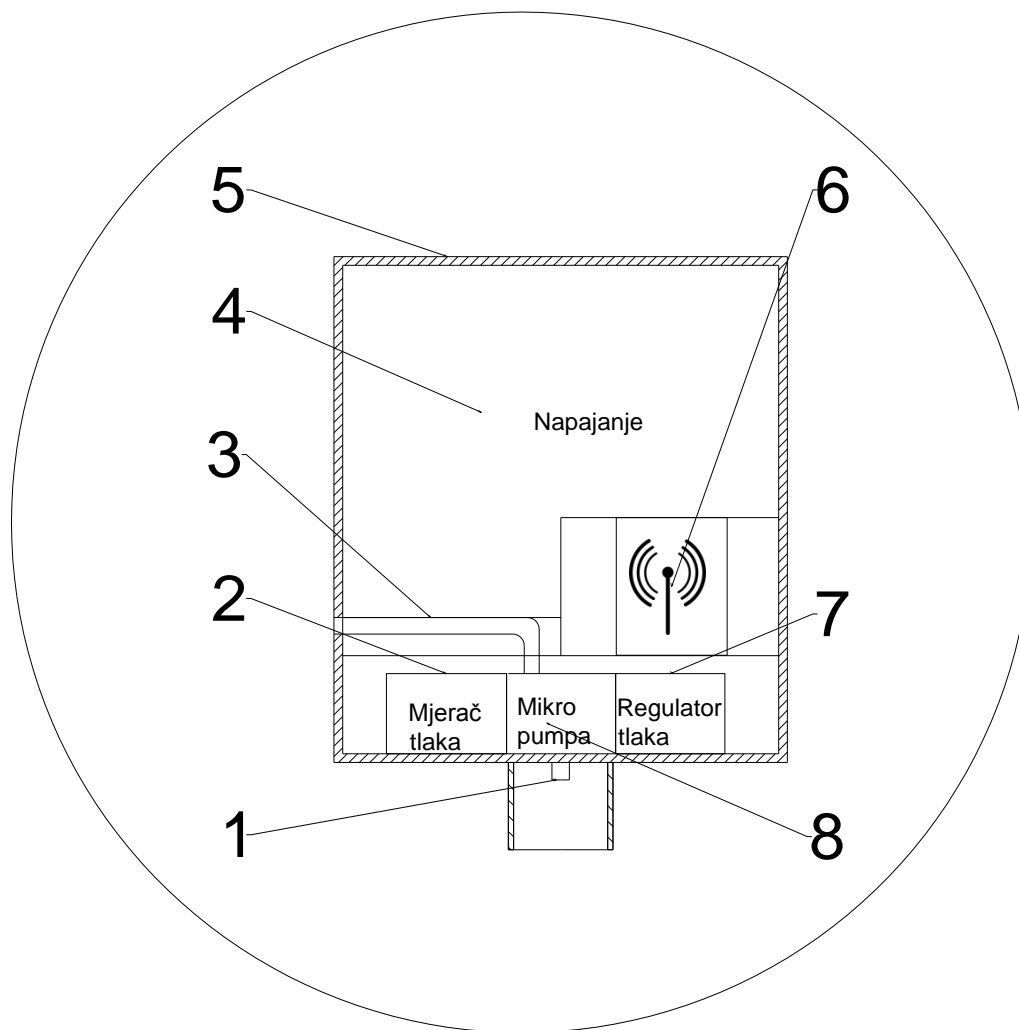


Slika 139. Druga varijanta SAV izuma: sustav je smješten unutar specijalne kapice automobilske ventila izvan kotača.

Na temelju postojećih komercijalnih sustava za motrenje tlaka u gumama, predložena je i druga izvedba kućišta sustava samoregulirajućeg autonomnog ventila i to u obliku specijalizirane kapice ventila. Slika 139 prikazuje poziciju uređaja na kotaču, a Slika 141 sastavne dijelove uređaja s dvosmjernom mikropumpom smještenog unutar kapice ventila: 1) izdanak za otvaranje automobilske ventila, 2) piezoelektrični senzor tlaka, 3) mikro kanal za dopunjavanje ili ispuštanje zraka u atmosferu, 4) autonomno napajanje sustava, 5) tijelo kapice ventila, 6) bežični primopredajnik, 7) sustav regulacije tlaka i 8) dvosmjerna mikro pumpa.. Pojam specijalizirana kapica ventila podrazumijeva izvedbu kapice prilagođenu ugradnji sustava samoregulirajućeg autonomnog ventila, gdje je kapica prilagođena i sustavu na koji se predmetni izum ugrađuje. Takva kapica se ugrađuje na ventil elastičnog pneumatskog spremnika pomoću navoja koji je izrađen u kapici ili nekim drugim načinom (npr. lijepljenjem), ovisno o izvedbi ventila. Princip rada ove izvedbe je potpuno isti kao i u slučaju smještanja sustava samoregulirajućeg autonomnog ventila u ventil elastičnog pneumatskog spremnika. Ipak, smještaj u specijaliziranu kapicu omogućuje jednostavniju montažu samog sustava na ventile elastičnih pneumatskih spremnika.



Slika 140. Shema varijante SAV-a smještena unutar tijela uskočnog automobilskeg ventila.

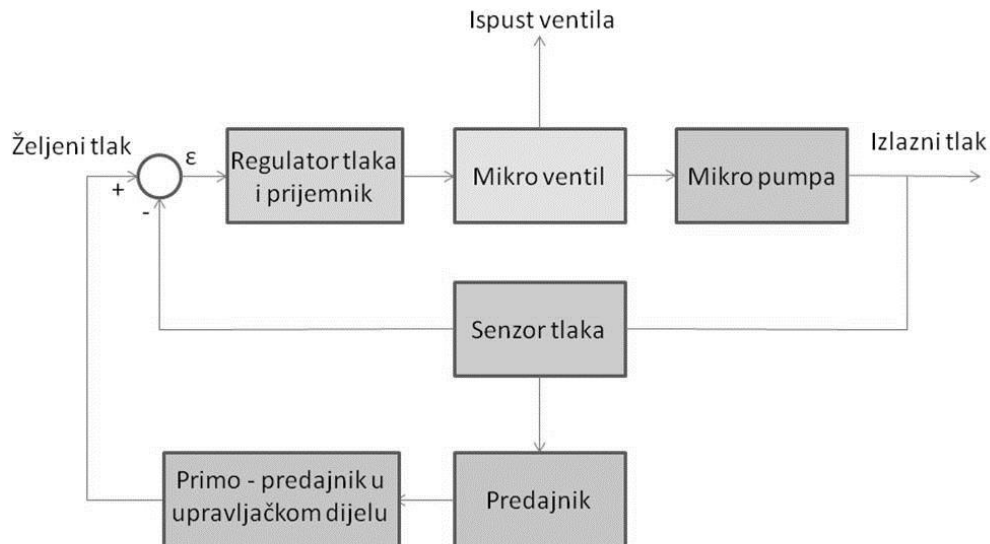


Slika 141. Shema varijante SAV-a smještena unutar tijela kapice automobilskeg ventila.

6.9.5 Opis rada sustava s jednosmjernom mikropumpom

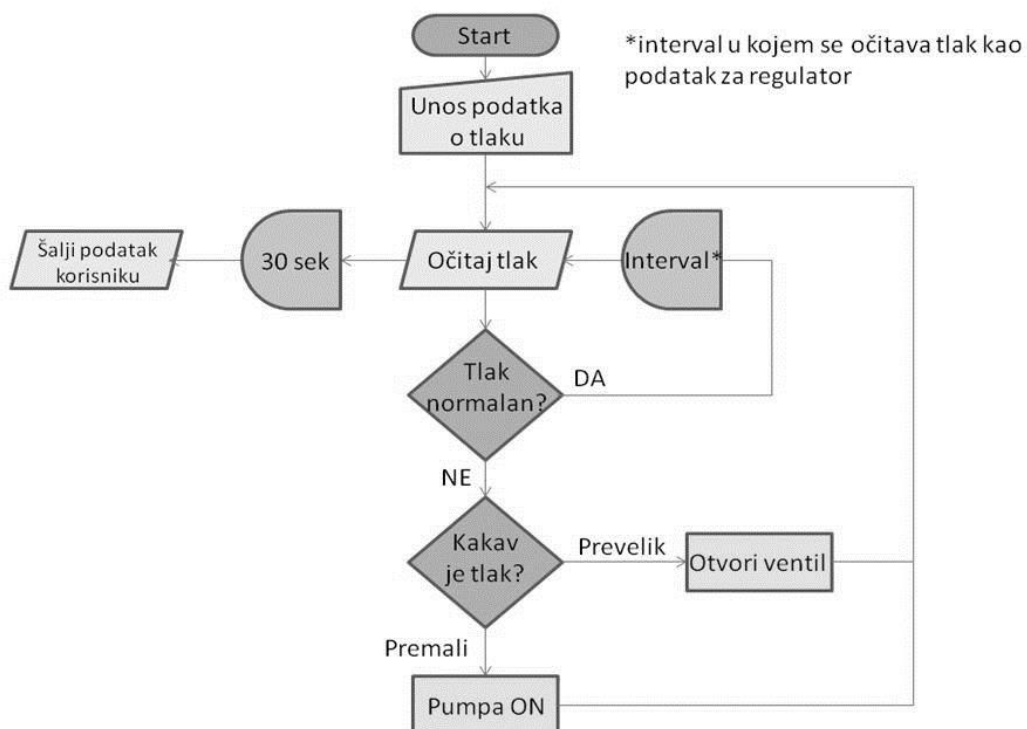
Rad uređaja odvija se u nekoliko faza prema blok dijagramu i dijagramu toka na slici (Slika 142 i Slika 143). Na kontrolnom uređaju koji se nalazi na nepomičnom dijelu konstrukcije (npr. kokpit automobila) zadaje se željeni tlak koji se putem integriranog primopredajnika u kontrolnom uređaju šalje regulatoru tlaka koji informaciju dobiva preko ugrađenog primopredajnika. Taj se podatak zadržava u sustavu sve dok ga korisnik ne promijeni. Podatak o željenom tlaku se u definiranim intervalima uspoređuje s podatkom koji daje mjerač tlaka te se po potrebi uključuje mikropumpa kojom se regulira tlak u automobilskej gumi. U slučaju ugradnje jednosmjerne mikropumpe se za ispuštanje zraka otvara specijalni mikroventil spojen na kanal za ispuštanje. U predloženom izumu, jednosmjerna mikropumpa i mikroventil su odvojeni moduli (mikropumpa i sama sadrži nepovratni ventil). Predviđeni su kanali za dobavu zraka iz atmosfere te kanal za ispuštanje zraka u atmosferu. Podatak o tlaku u gumi se u definiranim

vremenskim intervalima šalje kontrolnom uređaju i služi kao informacija korisniku. Na taj način korisnik ima stalan uvid u stanje tlaka u gumi čime se postiže još veća sigurnost osobito u slučaju naglog pada tlaka zbog bušenja gume.



- ϵ – razlika između željenog i trenutnog tlaka (greška, odnosno ulaz regulatora)
- Predajnik – nisko potrošni modul za bežično slanje podatka o tlaku
- Prijemnik i predajnik u upravljačkom dijelu – modul za prihvatanje i prikaz podatka o tlaku i za zadavanje željenog tlaka

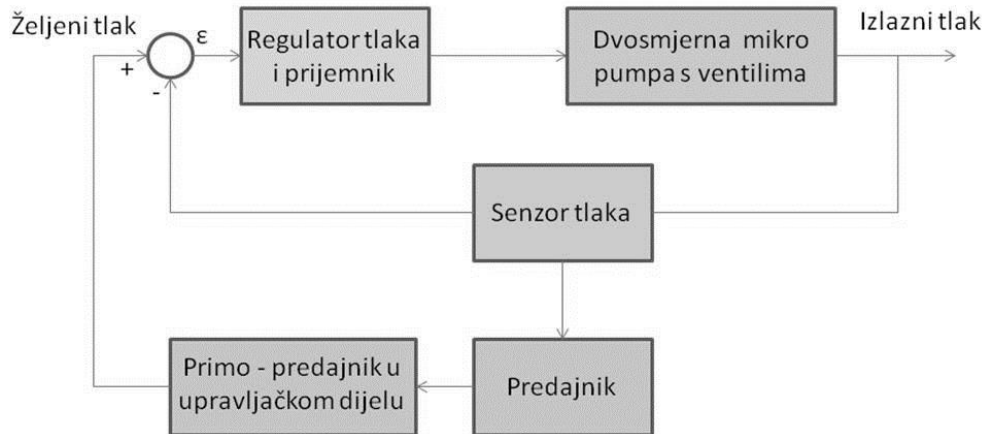
Slika 142. Blok dijagram sustava s jednosmjernom mikropumpom i zasebnim mikroventilom



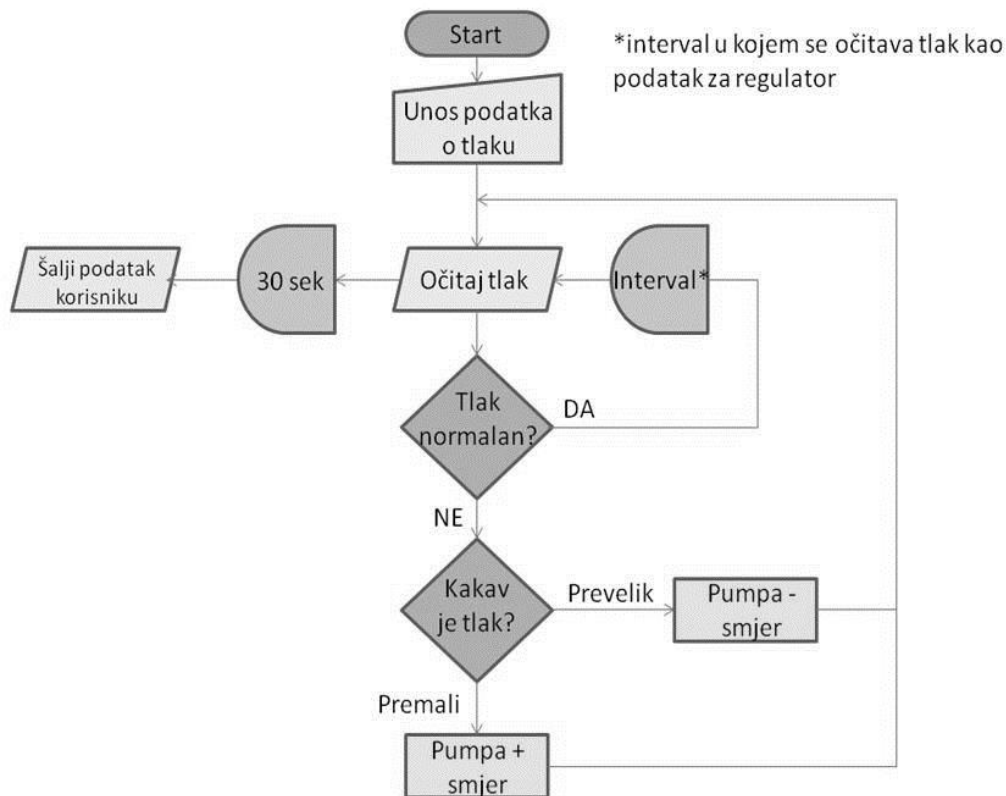
Slika 143. Dijagram toka sustava s jednosmjernom mikropumpom i zasebnim mikroventilom

6.9.6 Opis rada sustava s dvosmjernom mikropumpom

Rad ovakvog sustava odvija se u nekoliko faza prema priloženom blok dijagramu i dijagramu toka na slici (Slika 144 i Slika 145), a ne razlikuje se mnogo od prethodno predstavljenog uređaja s jednosmjernom mikropumpom. Na kontrolnom uređaju koji se nalazi na nepomičnom dijelu zadaje se željeni tlak koji se putem integriranog primopredajnika u kontrolnom uređaju potom šalje regulatoru tlaka koji informaciju dobiva preko primopredajnika.



Slika 144. Blok dijagram sustava s dvosmjernom mikropumpom



Slika 145. Dijagram toka sustava s dvosmjernom mikropumpom

Taj podatak se zadržava u sustavu do sljedeće promjene vrijednosti tlaka. Podatak o željenom tlaku se u definiranim intervalima uspoređuje s podatkom koji daje mjerač tlaka te se po potrebi uključuje mikropumpa kojom se regulira tlak u gumi. Mikropumpa je dvosmjerna i sadrži ugrađene aktivne mikroventile kojima se određuje smjer protoka zraka. Kod dvosmjerne mikropumpe postoji samo jedan kanal koji istovremeno služi za dobavu atmosferskog zraka i za ispuštanje zraka iz elastičnog pneumatskog spremnika.

U ovom dijelu predstavljen je koncept autonomnog mjerača tlaka za cestova vozila koji je i prototipiran u Laboratoriju za precizno inženjerstvo pri Tehničkom fakultetu u Rijeci, ali i koncept autonomnog regulatora tlaka koji se trenutno nalazi u fazi patentnog ispitivanja radi ostvarivanja potpune patentne zaštite u RH. Za oba koncepta odabran je piezoelektrični mehanizam pretvorbe energije vibracija u električnu energiju koji uređajima osigurava autonomnost dok je vozilo u pokretu. Prije svega istražena je priroda i razine amplituda prisutnih vibracija u okolini kotača i to za različite uvjete vožnje: gradsku, otvorenu cestu i autoput. Nakon mjerenja utvrđen je aperiodični karakter vibracija visokih amplituda ubrzanja ($> 16 G$). Autonomni mjerni uređaj ispitan je u laboratoriju, a na posljepku je funkcionalnost potvrđena i u stvarnim uvjetima na riječkim prometnicama.

7. Zaključak

U ovoj doktorskoj disertaciji nastojalo se analitički, numerički i eksperimentalno okarakterizirati uređaje za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju. Prije svega provedena je sveobuhvatna analiza stanja tehnike na polju prikupljanja niskorazinske energije (engl. *energy harvesting*) iz okoliša, i to akademskih saznanja u proteklih petnaest godina, otkako je započeo uzlet ovog istraživačkog polja, ali i analiza sve više prisutnih komercijalnih rješenja.

Poseban naglasak stavljen je na pretvorbu vibracija u električnu energiju posredstvom piezoelektričnog koncepta pretvorbe koji je izuzetno zanimljiv u istraživačkom smislu radi velike gustoće proizvedene električne energije po jedinici volumena uređaja, lakoj mogućnosti minijaturizacije i integracije s postojećim MEMS tehnologijama i proizvodnim procesima, ali i zbog jednostavnosti konstrukcije navedenih uređaja. Najčešći oblik korištenja ovog koncepta pretvorbe ogleda se u konstrukciji inercijalnog sustava ukliještene piezoelektrične konzole s montiranim utegom. Smjesti li se ovakva konstrukcija u vibrirajuće okružje, konzola započinje prisilno oscilirati i na temelju nametnutog naprezanja, naizmjenice na tlak odnosno vlak, u piezoelektričnim slojevima konzole dolazi do izmjeničnog stvaranja naboja različitih polariteta na stranicama piezoelektričnih slojeva. Prethodno je u literaturi pokazano kako ovakav tip uređaja najbolje radi ako je frekvencija vibracija iz okoline jednaka prvoj vlastitoj frekvenciji inercijalnog sustava, jer u tom slučaju nastupa rezonancija te efikasnost uređaja višestruko raste.

Nakon analize stanja tehnike pristupilo se razradi prihvaćenog analitičkog modela s distribuiranim parametrima i implementaciji istog u MATLAB-u. Model je preveden u računalni kôd i time je omogućeno izvođenje simulacija ponašanja piezoelektričnih pretvarača te, na temelju dobivenih rezultata, uočavanje povratne sprege piezoelektrične domene s mehaničkom domenom. Sustav ne pokazuje jednoznačan odziv već se odziv mijenja u ovisnosti o različitim parametrima, od čega valja istaknuti učinak asimptotskog ukrućenja konzole s porastom električnog otpora. Iako je ovaj model izuzetno točan u simulacijama piezoelektričnih bimorfa, tu upravo leži i ograničenje ovog modela. Naime model nije prilagođen za simuliranje multimorfa ili konzola koje oblikom odstupaju od jednostavnog pravokutnog profila.

Kako bi se u budućnosti mogle simulirati različite izvedbe piezoelektričnih pretvarača, posebice one za koje nije moguće izvesti analitičko rješenje, pristupilo se razradi numeričkog modela

metodom konačnih elemenata uz pomoć komercijalnog računalnog programa ANSYS. Iako je prethodno u literaturi utvrđeno da je ANSYS pogodniji za simuliranje indirektnog piezoelektričnog efekta, određene istraživačke skupine su ostvarile dobre rezultate i s ovakvim tipom simulacija, poglavito u vidu procjene maksimalne snage dostupne u sustavu, ali u slučaju korištenja piezoelektričnog unimorfa [Yang i Tang, 2009.]. U disertaciji je, temeljem takve metodologije, izveden model bimorfa te su izvršene harmonijske i nelinearne tranzijentne simulacije s uključenim utjecajem velikih deformacija. Rezultati pokazuju izuzetno dobru korespondenciju numeričkih i analitičkih rezultata, i to poglavito u procjeni vlastitih frekvencija i utjecaja povratne sprege piezoelektrika na rast vlastitih frekvencija, dok procjena naponskog odziva vrijedi za samo uski raspon primijenjenih otpora trošila.

Čest je slučaj u literaturi da se ispituju specijalne eksperimentalne konzole bimorfne izvedbe, a rjeđe one koje su slobodno dostupne na tržištu, poglavito jer konstrukcijama i višeslojnošću odstupaju od klasičnog bimorfnog standarda. Upravo je takav tip konzola, proizvođača Midé sastavljenih od sedam različitih slojeva, poslužio za obavljanje eksperimenata opisanih u 5. poglavlju. Ovim eksperimentima su se utvrdili mehanički čimbenici koji su nedostajali u literaturi, ali i utvrdile karakteristike dinamičkog elektromehaničkog odziva. Tako su razvijeni eksperimentalni postavi za utvrđivanje koeficijenata prigušenja, modula elastičnosti i dinamičkog odziva konzole. Zadnji spomenuti je poslužio i za usporedbu eksperimentalnih rezultata s rezultatima analitičkih i numeričkih simulacija.

Zbog neslaganja položaja utega u analitičkom modelu i položaja utega u eksperimentima, nije bilo moguće ostvariti preveliku podudarnost rezultata. S druge strane, numerički MKE model višeslojnog tipa piezoelektrične konzole izuzetno dobro procjenjuje frekvencijske raspone rezonancije eksperimentalnih konzola (Tablica 17) i s velikom točnošću predviđa utjecaje povratne elektromehaničke sprege, uz doduše lošiju procjenu naponskog odziva (Tablica 16). Može se zaključiti da modeli simulirani u ANSYS-u doista trenutno ne mogu poslužiti za egzaktno simuliranje ovakvih sustava, osim u ograničenom rasponu električnih otpora. U slučaju Midé konzola to doista i jest dovoljno dobro jer maksimalni iznosi snage proizlaze iz primjene manjih iznosa otpora trošila (Slika 98).

Na kraju, u radu je opisana izvedba prototipnog rješenja autonomnog mjerača tlaka u automobilskim gumama kojemu je potvrđena i funkcionalnost na riječkim cestama, a izlazna gustoća električne energije bila je viša od onih zabilježenih u literaturi (Tablica 4, Tablica 5, i Tablica 6), te je iznosila $2,68 \text{ mW/cm}^3$. Završno je osmišljen i koncept sustava za automatsku

autonomnu regulaciju tlaka u elastičnim pneumatskim spremnicima, koji je trenutno u fazi patentnog ispitivanja, iako je preliminarnim ispitivanjem već utvrđeno da se radi o jedinstvenoj inovaciji na svjetskoj razini.

Znanstveni doprinos disertacije ogleda se u razvoju programskog koda za implementaciju Erturkovog analitičkog modela koji je poslužio za detaljnu teorijsku analizu netrivialnih učinaka elektromehaničke sprege. Kao poseban doprinos valja istaknuti razvoj linearnog i nelinearnog numeričkog modela pomoću MKE uz pomoć ANSYS-a i to klasične bimorfne konzole, kao i konzole kompliciranijeg poprečnog presjeka što je slučaj koji do sada nije zabilježen u literaturi. U ovom dijelu posebno treba naglasiti nelinearni numerički MKE model s uključenim geometrijskim nelinearnostima i isprogramirani postupak tranzijentne analize pomoću koje će u budućnosti biti moguće detaljnije karakterizirati razmatrane uređaje i premostiti nedostatke analitičkih modela po pitanju predviđanja povratne elektromehaničke sprege kod višeslojnih piezoelektričnih pretvarača. Doprinos se također ogleda i u razvoju većeg broja eksperimentalnih postava za utvrđivanje mehaničkih čimbenika piezoelektričnih konzola, te naposljetku i u razvoju inovativnih konstrukcijskih rješenja predviđenih za ovdje razmatrani tip pretvorbe energije. Na temelju ovih rezultata moguće je provoditi daljnja istraživanja u više različitih smjerova od kojih valja istaknuti:

- u literaturi predloženo korištenje SPICE softwera za simuliranje električne domene sustava u sprezi s ovdje predloženim nelinearnim ANSYS modelom,
- istraživanje utjecaja epoksidnog ljepila između slojeva piezoelektričnih pretvarača i
- zamorno ponašanje piezoelektričnih konzola čije je trenutno trajanje procijenjeno na > 10 godina.

Spregom SPICE softwera i nelinearne tranzijentne analize otvorila bi se mogućnost usporedbe s nelinearnim analitičkim modelima bimorfni konzola, te shodno tome i približavanje eksperimentalnim rezultatima na temelju čega bi se moglo pristupiti razvoju novih klasa optimiziranih piezoelektričnih uređaja za pretvorbu kinetičke energije vibracija u električnu energiju.

Literatura

- [1] Ajitsaria J. et al., Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation. *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, 447–454, 2007.
- [2] Alippi C. et al., Energy Management in Wireless Sensor Networks with Energy-hungry Sensors, *Instrumentation and Measurement Magazine* Vol. 12, N. 2, 16-23, 2009.
- [3] Alvarez E. et al., Type approval requirements for the general safety of motor vehicles - Study, IP/A/IMCO/ST/2008-18, European Parliament, 2008.
- [4] Ansys Inc.¹, 'Ansys Help', 2010.
- [5] Ansys Inc.², 'Ansys theory', 1994.
- [6] APC International Ltd., [Piezoelectric ceramics – Principles and applications], Mackeyville, 2011.
- [7] Ashwell D. G., The anticlastic curvature of rectangular beams and plates, *Journal of Royal Aeronautical Society*, 54-780, 1950
- [8] Beards C., [Structural Vibration: Analysis and Damping], Halsted Press, New York, 1996.
- [9] Beeby S. et al., Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement science and technology*, Vol. 17, 175-195, 2006.
- [10] Benasciutti D. et al., Vibration energy scavenging via piezoelectric bimorphs of optimized shapes, *Microsystem technologies*, Vol. 16, 657-668, 2010.
- [11] Brusa E. et al., Analytical characterization and experimental validation of performances of piezoelectric vibration energy scavengers, *Proceedings of SPIE* Vol 7362, 2009.
- [12] Caliò R. et al., Piezoelectric Energy Harvesting Solutions, *Sensors* 2014, Vol. 14, 4755-4790, 2014.
- [13] Challa V. et al., Resonant frequency tunable vibration energy harvesting device, *The 6th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford University, 2007.
- [14] CTS Electronic Components, Inc. - PZT5A & 5H Materials Technical Data
- [15] Dagdeviren C. et al., Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm, *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 111, No. 5, 1927–1932, 2013.

- [16] Dussinger A. et al., *Tire module and tires equipped therewith*, Američki patent, US2012085160A1, 2012.
- [17] duToit N. et al., Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters. *Journal of Integrated Ferroelectrics*, Vol. 71, 121–160, 2005.
- [18] Đerek V., Piezoelektrični efekt - seminar iz Opće fizike III, vdjerek.net, 2002.
- [19] Elvin, E. i Elvin, A., A coupled finite element – circuit simulation model for analyzing piezoelectric energy generators, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 20, 587-595, 2009.
- [20] Erturk A. i Inman D., [Piezoelectric energy harvesting], John Wiley & Sons, 2011.
- [21] Erturk A. i Inman D., An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitation, *Smart Materials & Structures*, Vol. 18, 025009, 2009.
- [22] Erturk A. i Inman D., Issues in mathematical modelling of piezoelectric energy harvesters, *Smart Materials & Structures*, Vol. 17, 065016, 2008.
- [23] Erturk A. i Inman D., On Mechanical Modelling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters, *Journal of Intelligent Materials and System Structures*, Vol. 19, 1311-1325, 2008.
- [24] Erturk A., 'Electromechanical modeling of piezoelectric energy harvesters', doktorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [25] Frantz G., Giving Technology 2020 Vision, prezentacija, Texas Instruments Developer Conference, Seoul, 2008.
- [26] Freescale Semiconductor, MPXY8300 Design Reference Manual, Freescale Semiconductor, Document Number: MPXY8300RM, Rev. 2, 12/2008.
- [27] Genta, G., [Vibration of structures and machines - III ed.], Springer, New York, 1998.
- [28] Georgiadis A., Autonomous Wireless Sensors and RFID's: Energy harvesting Material and Circuit Challenges, prezentacija, Barcelona, 2012.
- [29] Hausler E. i Stein L., Implantable Physiological Power Supply with PVDF Film, *Ferroelectrics*, Vol. 60, 277–282, 1984.
- [30] Kazmierski T. & Beeby S., (ed), [Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications], Springer, 2011.
- [31] Khan Q. i Bang S., Energy Harvesting for Self Powered Wearable Health Monitoring System, stručni rad, San Francisco, 2009.

- [32] Kim S. et al., Wireless power transfer to a cardiac implant, *Applied Physics Letters*, Vol. 101, 073701, 2012.
- [33] Kimura M., *Piezoelectric Generation Device*, Američki patent, Nr. 5,801,475, 1998.
- [34] Krpan M. et al., [Dinamika – teorija i primjena], Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2001.
- [35] Kymissis J. et al., Parasitic Power Harvesting in Shoes, *Proc. 2nd IEEE Int. Symposium on Wearable Computers*, PA, USA, 132–139., 1998.
- [36] Linear Technology, LTC3588-1 Piezoelectric energy harvesting power supply, rev. A, 2010.
- [37] Marzencki M. et al., Design, Fabrication and characterization of a piezoelectric microgenerator including a power management circuit, *Proceedings of DTIP*, Stresa, Italy, 2007.
- [38] Mateu L. i Moll F., Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics, *Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium*, 359-373, 2005.
- [39] Meirowitch, L., [Fundamentals of Vibrations], McGraw Hill, Boston, 2001.
- [40] Midé Technology Corporation - Vulture Products Spec Sheet & Material Properties, 2009.
- [41] Midé Technology Corporation² – Vulture Piezoelectric Energy Harvesters, 2009.
- [42] Nash D., Transient Analysis, predavanje, Sveučilište Strathclyde, Glasgow, UK.
- [43] Nippon Steel Chemical Co., Ltd, ESPANEX SPC Series, katalog
- [44] Ong A. et al., Energy Harvesting from Human Power, *Energy Harvesting Network*, EPSRC, 2011.
- [45] Petković D., Projektni zadatak iz kolegija Precizne konstrukcije i tehnologija mikro sustava, Tehnički fakultet u Rijeci, 2011.
- [46] Priya S. i Inman D., (ed.), [Energy Harvesting Technologies], Springer, New York, 2009.
- [47] Ražnjević K., [Krautov strojarski priručnik], Axiom, Zagreb, 1997.
- [48] Roundy S. et al., A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer Communications*, Vol. 26, 1131–1144, 2002.
- [49] Roundy S. et al., Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers, *IEEE Pervasive Computing*, 28-36, 2005.
- [50] Roundy S. i Wright P., A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics *Smart Materials & Structures*, Vol. 13, 1131-1142, 2004.

- [51] Roundy S., Energy harvesting for tire pressure monitoring systems: design considerations, Proceedings of PowerMEMS 2008+ microEMS 2008, Sendai, Japan, 2008.
- [52] Roundy² S., Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, doktorat, University of California, Berkeley, 2003.
- [53] Schenck N. i Paradiso J., Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics, *Micro*, IEEE, Vol.21, No.3, 30-42, 2001.
- [54] Shahruz S., Design of mechanical band-pass filters with large frequency bands for energy scavenging, *Mechatronics*, Vol. 16, 523–531, 2006.
- [55] Sheng X. et al., Printing-based assembly of quadruple-junction four-terminal microscale solar cells and their use in high-efficiency modules, *Nature Materials*, Vol. 13, 593–598, 2014.
- [56] Siegel G. et al. 2014, Robust longitudinal spin-Seebeck effect in Bi-YIG thin films, *Scientific Reports* 4, Article number: 4429, 2013.
- [57] Snyder D. et al., *Tire condition sensing apparatus*, Canadian patent, CA1106028A1, 1970.
- [58] Sodano H. et al., Electric Power Generation from Piezoelectric Materials, Proceedings of the 13th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Potsdam/Berlin, Germany, 2002.
- [59] Sorić J., [Metoda konačnih elemenata], Golden marketing, 2004.
- [60] Starner T. i Paradiso J., Human Generated Power for Mobile Electronics, [Low Power Electronics Design], 1-35, CRC Press, 2004.
- [61] Starner T., Human-Powered Wearable Computing, *IBM Systems Journal* Vol. 35, No. 3–4, 618–628, 1996.
- [62] Staworko M. & Uhl T., Modeling and simulation of piezoelectric elements – comparison of available methods and tool, *Mechanics*, Vol. 27, No. 4, 2008.
- [63] Steingart D. et al., Micropower Materials Development for Wireless Sensor Networks, *MRS Bulletin*, Vol. 33, No. 4, 408 - 409, 2008.
- [64] Stiglat K. i Wippel H., [Platten], W. Ernst, Berlin, 1973.
- [65] Timothy E., Analytical Models to Predict Power Harvesting with Piezoelectric Materials, magisterij, Virginia Polytechnic Institute, USA, 2003.
- [66] Torah R. et al., Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting, *Measurement Science and Technolgy*, Vol. 19, 125202, 2008.

- [67] TREAD - Transportation Recall Enhancement, Accountability and Documentation Act, United States federal law, 2000.
- [68] URL: ABB, www.abb.com, posljednji pristup 10.6.2014.
- [69] URL: AdaptivEnergy, <http://adaptiveenergy.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [70] URL: Advanced Ceramterics, <http://www.advancedcerametrics.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [71] URL: Agilent, <http://www.home.agilent.com/en/pc-1940892/infiniivision-2000-x-series-oscilloscope?&cc=HR&lc=eng>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [72] URL: Ambiosystems, <http://www.ambiosystems.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [73] URL: APC, <http://www.americanpiezo.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [74] URL: B&K 1047,
http://www.testequipmentconnection.com/specs/Bruel_Kjaer_1047.PDF, posljednji pristup 13.7.2014.
- [75] URL: B&K 2635,
<http://www.bksv.com/products/transducers/conditioning/charge/2635>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [76] URL: B&K 4375,
<http://www.bksv.com/products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4375>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [77] URL: Civa, <http://english.civa.no/home.aspx?docid=153>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [78] URL: Curie, http://en.wikipedia.org/wiki/Curie_point, posljednji pristup 10.6.2014.
- [79] URL: Dana, <http://www.dana.com/wps/wcm/connect/dext2/Dana/Home>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [80] URL: Ecofriend, <http://www.ecofriend.com/eco-tech-semitransparent-solar-cells-to-begin-a-new-era-of-solar-electronics.html>; posljednji pristup 10.6.2014.
- [81] URL: Enocean, <http://www.enocean.com/en/home/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [82] URL: Goodyear,
http://www.goodyear.com/cfmx/web/corporate/media/news/story.cfm?a_id=903, posljednji pristup 13.7.2014.
- [83] URL: Google glass, <http://www.google.com/glass/start/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [84] URL: Head, <http://www.head.com/ski/technologies/skis/?region=us&id=312>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [85] URL: Intel, <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/moores-law-technology.html>, zadnji pristup 10.6.2014.

- [86] URL: KAIST, <http://ndl.kaist.ac.kr/research5.html>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [87] URL: Levant, <http://www.levantpower.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [88] URL: Logimesh, <http://logimesh.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [89] URL: MB Dynamics, <http://www.mbdynamics.com/PDF/PM-SERIES.pdf>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [90] URL: Metrolaser, <http://www.metrolaserinc.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [91] URL: Micropelt, <http://micropelt.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [92] URL: Microstrain, <http://www.microstrain.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [93] URL; Micro-Epsilon Messtechnik, <http://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man--optoNCDT-1607--en.pdf>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [94] URL: Midé, <http://www.mide.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [95] URL: Nexter, <http://www.nexter-group.fr/en/syegonr/presentation-syegon>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [96] URL: NI PXI-1042, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hr/nid/13909>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [97] URL: NI PXI-8196, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hr/nid/201607>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [98] URL: NHTSA, <http://www.nhtsa.gov/cars/rules/rulings/tirepresfinal/costs.html>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [99] URL: Nokia, <http://www.eetimes.com/electronics-news/4195530/Nokia-working-on-energy-harvesting-handset>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [100] URL: N-type http://en.wikipedia.org/wiki/N-type_semiconductor, posljednji pristup 10.6.2014.
- [101] URL: PEG – Personal energy generator, <http://www.npowerpeg.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [102] URL: Perpetuum, <http://www.perpetuum.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [103] URL: Pervoskit, http://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite_%28structure%29, posljednji pristup 10.6.2014.
- [104] URL: Piezo systems, <http://www.piezo.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [105] URL: Piezovalve, <http://piezovalve.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [106] URL: Precenglab, <http://precenglab.riteh.uniri.hr/?cat=1>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [107] URL: P-type, http://en.wikipedia.org/wiki/P-type_semiconductor, posljednji pristup 10.6.2014.

- [108] URL: PVDF, http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinylidene_fluoride, posljednji pristup 10.6.2014.
- [109] URL: RFID, <http://hr.wikipedia.org/wiki/RFID>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [110] URL: RFID2, <http://www.solacelabs.com.mx/site/rfid.html>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [111] URL: Schenk AS-020, http://www.schenck.es/admin/productos/archivos_productos/AS.pdf, posljednji pristup 13.7.2014.
- [112] URL: Uni-Trend, <http://www.uni-trend.com/UTP3704.html>, posljednji pristup 13.7.2014.
- [113] URL: Vibrotest 41, http://www.schenck.es/admin/productos/archivos_productos/Catalogo%20S40%20e.pdf, posljednji pristup 13.7.2014.
- [114] URL: Securite Routiere, <http://www.securite-routiere.gouv.fr/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [115] URL: SMP, <http://www.smpcorp.com/en/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [116] URL: Solchip, <http://www.sol-chip.com/>, posljednji pristup 10.6.2014.
- [117] URL: SPIE, <http://spie.org/x47832.xml>, posljednji pristup 10.06.2014.
- [118] URL: TL072, <http://www.ti.com/product/tl072>, posljednji pristup 10.06.2014.
- [119] URL: TPMS, http://en.wikipedia.org/wiki/Tire-pressure_monitoring_system, posljednji pristup 10.6.2014.
- [120] Vining C., An Inconvenient Truth About Thermoelectrics, *Nature Materials*, Vol. 8, 83-85, 2009.
- [121] Williams C. i Yates R., Analysis of a Micro-Electric Generator for Microsystems, *Sensors and Actuators*, Vol. 52, No. 1–3, 8–11, 1996.
- [122] Woias P., Micropumps—past, progress and future prospects, *Sensors and Actuators B*, Vol. 105, 28-38, 2005.
- [123] Yang Y. i Tang L., Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 20, 2223, 2009.
- [124] Zelenika S. i Blažević D., Issues in validation of performances of piezoelectric vibration-based energy harvesters, *Smart Sensors, Actuators, and MEMS V*. Edited by Schmid, Ulrich; Sánchez-Rojas, José Luis; Leester-Schaedel, Monika. *Proceedings of the SPIE*, Vol. 8066, 806615, 2011.

-
- [125] Zhang L., 'Analytical modeling and design optimization of piezoelectric bimorph energy harvester', doktorat, University of Alabama, 2010.
- [126] Zhou D. i Cheung Y., The free vibration of a type of tapered beams, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 188, 203-216, 2000.
- [127] Zhu D. et al., Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review, *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, 022001, 2010.
- [128] Zhu, D. et al., A bimorph multi-layer piezoelectric vibration energy harvester, *PowerMEMS 2010*, Leuven, Belgium, 2010.
- [129] Zhu, M. et al., Analyses of power output of piezoelectric energy harvesting devices directly connected to a resistive load using a coupled piezoelectric-circuit finite element method, *IEEE transactions of ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, Vol. 56, No. 7, 1309-1317, 2009.

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1. Prikaz najčešćih izvora energije i koncepata pretvorbe korištenih pri pretvorbi niskorazinske energije iz okoliša. Slika prilagođena prema: [Caliò et al., 2014.] | 11 |
| Slika 2. Mooreov zakon [URL: Intel] | 12 |
| Slika 3. Geneov zakon [Frantz, 2008.], MMACS – (engl. <i>Million Multiply Accumulate Cycles per Second</i>), označava broj računskih ciklusa koje procesor može izvesti u jednoj sekundi .. | 12 |
| Slika 4. Energija ljudskog tijela koju je moguće iskoristiti bez prevelikog opterećenja na organizam. Slika prilagođena prema: [Starner i Paradiso, 2004., Khan i Bang 2009.] | 14 |
| Slika 5. Tipični ciklus rada čvora mreže bežičnih senzora [Steingart et al., 2008.] | 16 |
| Slika 6. Fleksibilna tanka solarna ćelija [URL: Ecofriend] | 17 |
| Slika 7. Bežični senzori s integriranim solarnim ćelijama veličine poštanske marke. [URL: Solchip] | 18 |
| Slika 8. Minijaturna solarna ćelija s dvostrukim sustavom fokusiranja svjetlosti površine 2 cm x 2 cm [Sheng et al., 2014.]..... | 19 |
| Slika 9. Seiko Thermic ručni sat i princip rada [Priya i Inman, 2009.]..... | 20 |
| Slika 10. Termoelektrična narukvica [URL: KAIST]..... | 21 |
| Slika 11. Micropelt termoelektrični generator [URL: Micropelt]..... | 22 |
| Slika 12. Uvećan RFID uređaj: zavojnica, antena i mikročip [URL: RFID2]..... | 23 |
| Slika 13. Mikroelektrostatički pretvarači s pločama kondenzatora u konfiguraciji 'češlja': a) s promjenom duljine preklopa i b) s promjenom širine preklopa [Roundy, 2003.]..... | 27 |
| Slika 14. 3D mikroelektrostatički pretvarač energije vibracija s radnom frekvencijom ispod 150 Hz [URL: SPIE] | 27 |
| Slika 15. Model linearnog generatora s jednim stupnjem slobode gibanja [Beeby et al., 2006] | 28 |
| Slika 16. Model i prototip elektromagnetskog konzolnog pretvarača kinetičke energije vibracija. [Beeby et al, 2006.] | 29 |
| Slika 17. Komercijalno dostupan uređaj za bežično motrenje stanja industrijskih postrojenja, cjevovoda i sl. [URL: Perpetuum]..... | 29 |
| Slika 18. Projekt elektromagnetskog uređaja za pretvorbu energije vibracija izveden u Laboratoriju za precizno inženjerstvo: a) izvedeni prototip, b) struktura uređaja. [Petković, 2011.]..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Slika 19. PZT kristalna rešetka : a) prije polariziranja – kubična rešetka i simetrični aranžman pozitivnih i negativnih naboja, b) nakon polariziranja – kristal s tetragonalnom rešetkom i električnim dipolom [APC International Ltd., 2011.]..... | 32 |
| Slika 20. Polariziranje piezoelektrične keramike: a) nasumična orijentacija dipola, b) polariziranje pomoću DC električnog polja, c) zaostala polarizacija nakon prestanka djelovanja električnog polja [APC International Ltd., 2011.]..... | 33 |
| Slika 21. Piezoelektrične osi s označenim indeksima i najčešćim smjerom polarizacije [APC International Ltd., 2011.]..... | 34 |
| Slika 22. Različite konfiguracije uređaja za žetvu energije: a) konzolni sustav [Roundy, 2003.] b) podatljiva piezoelektrična struktura [Priya i Inman, 2009.] c) bi-stabilna konfiguracija [Beeby et al., 2006.], d) aksijalno prednapregnuta konstrukcija [Roundy et al., 2005.], e) sustav s više masa [Roundy et al., 2005.], f) konzolni sustav s magnetskom ugodom frekvencije osciliranja [Challa et al., 2007.], g) udarni sustav [Beeby et al., 2006.] i h) dvostruki prednapregnuti sustavi [Schenck i Paradiso 2001.]..... | 38 |
| Slika 23. Komercijalno dostupni uređaji za pretvaranje kinetičke energije vibracija u električnu energiju temeljeni na piezoelektričnom efektu: Midé Volture (kombinacija sa solarnom žetvom energije), Advanced Cerametrics, Microstrain i AdaptivEnergy [URL: Advanced Cerametrics, URL: Mide, URL: AdaptivEnergy, URL: Microstrain] | 39 |
| Slika 24. Piezoelektrične konzole za razvoj uređaja za prikupljanje niskorazinske energije vibracija: Advanced Cerametrics i Piezo Systems [URL: Piezo systems, URL: Advanced Cerametrics] | 39 |
| Slika 25. Piezoelektrična membrana za pretvaranje niskorazinske energije unutarnjih ljudskih organa u električnu energiju [Dagdeviren et al, 2013.]..... | 40 |
| Slika 26. a) Gređa pri vibracijskom savijanju i b) izdvojeni infinitesimalni segment gređe diskretne širine dx s momentima i poprečnim silama [Meirovitch, 2001.]..... | 49 |
| Slika 27. Piezoelektrična bimorfna konzola: a) serijski spoj, b) paralelni spoj [Erturk, 2009.] | 57 |
| Slika 28. Poprečni presjek uniformnog bimorfa [Erturk, 2009] | 59 |
| Slika 29. a) Savijena bimorfna konzola i b) ekvivalentni električni krug [Erturk, 2009.]..... | 64 |
| Slika 30. Električni krug koji predstavlja serijski spoj dvaju piezokeramičkih slojeva [Erturk, 2009.]..... | 68 |
| Slika 31. Piezoelektrični bimorf korišten u Matlab simulacijama | 73 |
| Slika 32. Bimorf sastavljen od dvaju različitih materijala | 75 |
| Slika 33. Bimorf sastavljen od jednog materijala s modificiranim širinama slojeva A i C | 76 |

| | |
|---|----|
| Slika 34. Prva četiri oblika savijanja piezoelektrične bimorfne konzole bez utega..... | 77 |
| Slika 35. Prva četiri oblika savijanja piezoelektrične bimorfne konzole s utegom..... | 78 |
| Slika 36. Naponski odziv bimorfne piezoelektrične konzole bez utega za frekvencijski raspon od 45-80 Hz i radno trošilo otpora 100 k Ω | 79 |
| Slika 37. Naponski odziv bimorfne piezoelektrične konzole s utegom za frekvencijski raspon od 45-80 Hz i radno trošilo otpora 100 k Ω | 79 |
| Slika 38. Funkcije frekvencijskog odziva napona pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu bez utega..... | 80 |
| Slika 39 Funkcije frekvencijskog odziva napona pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu s utegom | 81 |
| Slika 40. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu bez utega..... | 82 |
| Slika 41. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 12 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu s utegom | 83 |
| Slika 42. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 200 vrijednosti otpora radnog trošila u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu bez utega..... | 84 |
| Slika 43. Funkcije frekvencijskog odziva prosječne snage pri promjeni uzbudne frekvencije i 200 vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu s utegom ... | 84 |
| Slika 44. Vrijednosti maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu bez utega..... | 85 |
| Slika 45. Vrijednosti maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω u odnosu na rezonantnu frekvenciju za konzolu bez utega..... | 86 |
| Slika 46. Trend maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω za konzolu s utegom..... | 86 |
| Slika 47. Trend maksimalne prosječne snage u rezonanciji pri promjeni vrijednosti otpora radnog trošila R_1 u rasponu od 10 Ω do 2 M Ω u odnosu na rezonantnu frekvenciju za konzolu s utegom | 87 |
| Slika 48. Porast krutosti konzole bez utega pri porastu električnog otpora R_1 | 88 |
| Slika 49 Porast krutosti konzole s utegom pri porastu električnog otpora R_1 | 88 |
| Slika 50. 3D prikaz međuovisnosti otpora, uzbudne frekvencije i snage | 89 |
| Slika 51. 3D prikaz međuovisnosti otpora, uzbudne frekvencije i snage, drugi kut gledanja ... | 89 |
| Slika 52. a) Prizmatični SOLID226 i b) tetraedarski SOLID227 3D konačni elementi [Ansys Inc. ² , 1994.]..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| Slika 53. a) Prizmatični SOLID186 i b) tetraedarski SOLID187 3D konačni elementi [Ansys Inc. ² , 1994.]..... | 96 |
| Slika 54. CIRC94 Konačni element [Ansys Inc. ² , 1994.]..... | 97 |
| Slika 55. Definirani i međusobno još uvijek odvojeni volumeni budućeg čvrstog tijela. Prikazan je model piezoelektrične konzole s utegom od volframa mase 1g i koordinatne osi: X – uzdužni smjer konzole, Y – poprečni smjer i Z – smjer po debljini konzole..... | 99 |
| Slika 56. Prikaz modela piezoelektrične bimorfne konzole i tri različite gustoće mreže sastavljene od prizmatičnih elemenata: a) G_1 , b) G_2 i c) G_3 | 100 |
| Slika 57. Prikaz modela piezoelektrične bimorfne konzole i tri različite gustoće mreže sastavljene od tetraedarskih elemenata: a) G_1 , b) G_2 i c) G_3 | 100 |
| Slika 58. Prikaz međusobno povezanih čvorova elektroda na stranicama piezoelektričnih slojeva..... | 101 |
| Slika 59. Grafički prikaz 1. oblika savijanja dobivenog modalnom analizom | 102 |
| Slika 60. Prvih osam vlastitih oblika vibracija konzole s utegom, na vrhu lijevo je prvi savojni oblik..... | 104 |
| Slika 61. Prikaz utjecaja gustoće mreže konačnih elemenata na rezultat harmonijske analize naponskog odziva za konzolu bez utega: a) prizmatični elementi, b) tetraedarski elementi . | 106 |
| Slika 62. Prikaz utjecaja gustoće mreže konačnih elemenata na rezultat harmonijske analize naponskog odziva za konzolu s utegom: a) prizmatični elementi, b) tetraedarski elementi .. | 107 |
| Slika 63. Prosječna snaga na otporniku za konzolu s utegom: usporedba temeljena na prizmatičnoj G_1 mreži konačnih elemenata | 110 |
| Slika 64. Porast vlastitih frekvencija konzole pri sukcesivnom povećavanju 12 vrijednosti električnog otpora ($10 \Omega - 2 M\Omega$) | 110 |
| Slika 65. Usporedba analitičkog i MKE modela za 7 različitih vrijednosti otpora R_i | 111 |
| Slika 66. Profil uzbude uklještenja pri ubrzanju od 1 m/s^2 za frekvencijski raspon od: a) 63 do 64,5 Hz i b) 57,5 do 59 Hz | 114 |
| Slika 67. Rezultati tranzijentne analize: a) za konzolu bez utega i b) za konzolu s utegom (donji dijagram)..... | 116 |
| Slika 68. Volture piezoelektrične konzole: V21B i V25W [URL: Mide]..... | 119 |
| Slika 69. Dimenzije konzole Midé Volture V21B u milimetrima. Kote 14,2 mm i 33,8 mm označavaju dimenzije aktivnog piezoelektričnog sloja [URL: Mide]..... | 119 |
| Slika 70. Dimenzije konzole Midé Volture V25W u milimetrima. Kota 33,3 mm označava širinu aktivnog piezoelektričnog sloja. [URL: Mide] | 120 |

| | |
|---|-----|
| Slika 71. Veza elektroda na piezoelektričnim slojevima s izlaznim pinovima konektora i prikaz serijskog spoja [URL: Mide]..... | 120 |
| Slika 72. Midé konzola pod optičkim stereomikroskopom Olympus SZX16. | 121 |
| Slika 73. Struktura Midé Volture konzole bez prikazanih bakrenih elektroda [URL: Mide] | 122 |
| Slika 74. Grafički opis supstratnog sloja ESPANEX označenog na mikroskopskoj snimci s '4' [URL: Mide]..... | 123 |
| Slika 75. Vertikalno u težištu opterećena ploča jednostavno oslonjena na suprotnim krajevima (pune linije), sa slobodnim, neoslonjenim stranicama (iscrtkane linije). [Stiglat i Wippel, 1973.]..... | 124 |
| Slika 76. Interpolacijski dijagram za faktor k_w na temelju tabličnih podataka | 125 |
| Slika 77. VEB Thüringer Industrierwerk Rauenstein mehanička kidalica: a) mjerач opterećenja, b) specijalni nosač konzole (ovdje vidljiv s boka), c) mjerач progiba i d) pomični dio kidalice | 126 |
| Slika 78. Detalj opreme za provođenje eksperimenta | 127 |
| Slika 79. Izmjereni odnos sile i progiba za piezoelektričnu Midé konzolu V21B..... | 128 |
| Slika 80. Izmjereni odnos sile i progiba za piezoelektričnu Midé konzolu V25W..... | 128 |
| Slika 81. Poprečni presjek piezoelektričnih konzola Midé: V21B i V25W..... | 129 |
| Slika 82. Ekvivalentni presjek bakrene konzole: A) modificirani FR4 sloj, B) sloj bakrene elektrode, C) modificirani piezoelektrični sloj i D) modificirani ESPANEX sloj..... | 130 |
| Slika 83. Optički stol Newport i sustav za prikupljanje podataka NI PXI..... | 132 |
| Slika 84. Mehaničko uklještenje konzole..... | 133 |
| Slika 85. Funkcijski blokovi u LabVIEW virtualnom instrumentu za prikupljanje i obradu podataka naponskog signala, i signala brzine progiba slobodnog kraja konzole..... | 134 |
| Slika 86. Prikaz kontinuiranog mjerenja naponskog odziva pri udarnom testiranju. | 135 |
| Slika 87. Karakter naponskog odziva konzole nakon direktnog udarnog testa | 136 |
| Slika 88. Karakter naponskog odziva konzole nakon udarnog testa na uklještenju | 136 |
| Slika 89. Detalj odziva s prikazanim prigušenim amplitudama i vremenom perioda T_d | 137 |
| Slika 90. Uklještena piezoelektrična konzola s utegom na slobodnom kraju postavljena na elektromagnetski vibracijski uzбудnik MB Dynamics PM25A | 141 |
| Slika 91. a) Dio eksperimentalnog postava i b) potenciometri korišćeni za promjenu otpora R_1 | 141 |
| Slika 92. Eksperimentalni postav: a) vibracijski uzбудnik MB Dynamics PM25A, b) akcelerometar Bruel & Kjaer 4375, c) uklještenje, d) piezoelektrična konzola Midé V21B, i e) laserski vibrometar Micro-Epsilon Messtechnik optoNCDT 1605..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| Slika 93. Eksperimentalni postav: a) vibracijski uzбудnik MB Dynamics PM25A, b) akcelerometar Bruel & Kjaer 4375, c) uklještenje, d) piezoelektrična konzola Midé V25W, i e) laserski vibrometar Micro-Epsilon Messtechnik optoNCDT 1605 | 142 |
| Slika 94. Eksperimentalni postav u Laboratoriju za precizno inženjerstvo: a) vibracijski uzбудnik Schenk AG Vibroexciter 41, b) uklještenje konzole, c) akcelerometar Schenk AS-020, d) laserski vibrometar MetroLaser VibroMet 500V, e) upravljačka jedinica vibrometra, f) upravljačka jedinica akcelerometra, g) potenciometri, h) upravljačka jedinica vibracijskog uzбудnika, i) osciloskop..... | 144 |
| Slika 95. Detalj eksperimentalnog postava u Laboratoriju za precizno inženjerstvo: 1) vibracijski uzбудnik, 2) uklještenje, 3) piezoelektrična konzola, 4) akcelerometar, 5) vibrometar | 145 |
| Slika 96. Promjena napona s vremenom tijekom jednog eksperimenta te uvećani detalj sinusoidalnog odziva | 147 |
| Slika 97. Konstantna amplituda ubrzanja od $0,633 \text{ ms}^{-2}$ | 148 |
| Slika 98. Snaga u ovisnosti o električnom otporu za različite mase utega i oba tipa konzoli | 149 |
| Slika 99. ANSYS model Midé konzole V21B s tri različita utega: a) 2,4 g, b) 4,8 g, c) 7,2 g i d) uvećani isječak presjeka konzole s jasno vidljivim slojevima: 1. FR4 sloj (zeleno), 2. bakreni sloj (tirkizno), 3. piezoelektrični sloj (plavo) i 4. ESPANEX sloj (žuto). | 150 |
| Slika 100. Prikaz dvaju različitih pristupa modeliranja uklještenja: a) uklješteni samo čvorovi na krajnjim plohama i b) uklješteni krajnji čvorovi svih slojeva konzole. | 151 |
| Slika 101. Primjer umrežene konzole Midé V21B s utegom mase 2,4 g..... | 152 |
| Slika 102. Usporedba analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva ovisno o uzbuđnoj frekvenciji s konzolom V21B i utegom od: a) 2,4 g, b) 4,8 g i c) 7,2 g.. | 153 |
| Slika 103. Usporedba analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva ovisno o uzbuđnoj frekvenciji s konzolom V25W i utegom od: a) 7,8 g, b) 15,6 g i c) 23,4 g | 154 |
| Slika 104. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva za konzolu V21B u ovisnosti o uzbuđnoj frekvenciji..... | 155 |
| Slika 105. Usporedba analitičkih rezultata naponskog odziva za konzolu V21B u ovisnosti o uzbuđnoj frekvenciji..... | 156 |
| Slika 106. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva za konzolu V25W u ovisnosti o uzbuđnoj frekvenciji..... | 157 |
| Slika 107. Usporedba analitičkih rezultata naponskog odziva za konzolu V25W u ovisnosti o uzbuđnoj frekvenciji..... | 157 |

| | |
|---|-----|
| Slika 108. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji za konzolu V21B, 4 različite vrijednosti otpora R_1 te utege od: a) 2,4 g, b) 4,8 g i c) 7,2 g | 158 |
| Slika 109. Usporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata naponskog odziva u ovisnosti o uzbudnoj frekvenciji za konzolu V25W, 4 različite vrijednosti otpora R_1 i uteg od: a) 7,8 g, b) 15,6 g i c) 23,4 g | 159 |
| Slika 110. Prikaz učinka elektromehaničke sprege na povećanje vlastite frekvencije piezoelektrične konzole pri sukcesivnom povećavanju otpora za konzolu V21B. | 161 |
| Slika 111. Prikaz učinka elektromehaničke sprege na povećanje vlastite frekvencije piezoelektrične konzole pri sukcesivnom povećavanju otpora za konzolu V25W. | 162 |
| Slika 112. Klasični TPMS uređaj ovdje prikazan sa standardnim automobilskim ventilom i kućištem sa mjernom elektronikom i baterijom [URL: SMP] | 164 |
| Slika 113. Midé Slam Stick recorder – troosni akcelerometar s prikazom montaže na automobilskom kotaču [URL: Mide] | 166 |
| Slika 114. Graf amplituda vibracija za zaustavljeni automobil s upaljenim motorom: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji | 167 |
| Slika 115. Graf amplituda vibracija za automobil u uvjetima gradske vožnje pri brzinama od 30-40 km/h: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji | 167 |
| Slika 116. Graf amplituda vibracija za automobil u uvjetima vožnje na otvorenoj cesti pri brzinama od 70-80 km/h: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji | 168 |
| Slika 117. Graf amplituda vibracija za automobil u uvjetima vožnje na autoputu pri brzini od 120 km/h: a) ovisno o vremenu i b) ovisno o frekvenciji | 168 |
| Slika 118. Glavne komponente sustava..... | 169 |
| Slika 119. Piezoelektrični bimorf [URL: APC] | 170 |
| Slika 120. Detalj slojeva piezoelektričnog bimorfa korištenog na BAST sustavu [URL: APC] | 170 |
| Slika 121. Prikaz prototipnog rješenja mehaničkog uklještenja: 1) gornji dio uklještenja, 2) gumena ploča, 3) piezoelektrična konzola, 4) gumena ploča, 5) donji dio uklještenja | 171 |
| Slika 122. Fotografija izrađenog mehaničkog uklještenja s uklještenom APC piezoelektričnom konzolom | 171 |
| Slika 123. LTC3588-1 integrirani krug na štampanoj pločici u usporednom prikazu s kovanicom od 25 američkih centi [Linear Technology, 2010.] | 172 |
| Slika 124. Freescale MPXY8300 mjerni modul: a) bežični primopredajnik i mjerač i b) USB sučelje s primopredajnikom [Petković, 2011.]..... | 174 |

| | |
|---|-----|
| Slika 125. Eksperimentalni sustav BAST | 174 |
| Slika 126. Mjerenja RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 10 Ω | 176 |
| Slika 127. Mjerenja RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 22 Ω | 176 |
| Slika 128. Arhitektura BAST sustava | 179 |
| Slika 129. Mjerni modul s izvađenom baterijom i priključenim kontaktima za spajanje sa sustavom za upravljanje prikupljenom energijom. | 180 |
| Slika 130. Eksperimentalni postav u Laboratoriju za precizno inženjerstvo | 180 |
| Slika 131. Mjerenje RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 10 Ω | 181 |
| Slika 132. Mjerenje RMS napona (isprekidana linija) na otporniku od 22 Ω | 181 |
| Slika 133. L nosač mehaničkog uklještenja za montažu na automobilski kotač paralelno s osi kotača | 182 |
| Slika 134. Prikaz dviju različitih konfiguracija montaže uređaja na automobilski kotač: a) uzdužna os konzole paralelna s osi kotača i b) uzdužna os konzole okomita na os kotača ... | 183 |
| Slika 135. Jednosmjerna mikropumpa s piezoelektričnim pokretačem [Woias, 2005.] | 186 |
| Slika 136. Peristaltička mikropumpa s mogućnošću dvosmjernog rada [Woias, 2005.] | 187 |
| Slika 137. Primjer funkcije piezoelektričnog mikroventila: a) ulaz fluida u sustav, b) ispuš fluida izvan sustava [URL: Piezovalve]..... | 188 |
| Slika 138. Varijanta SAV izuma: sustav je smješten unutar tijela uskočnog automobilskog ventila unutar kotača. | 189 |
| Slika 139. Druga varijanta SAV izuma: sustav je smješten unutar specijalne kapice automobilskog ventila izvan kotača. | 190 |
| Slika 140. Shema varijante SAV-a smještena unutar tijela uskočnog automobilskog ventila. | 191 |
| Slika 141. Shema varijante SAV-a smještena unutar tijela kapice automobilskog ventila.... | 192 |
| Slika 142. Blok dijagram sustava s jednosmjernom mikropumpom i zasebnim mikroventilom | 193 |
| Slika 143. Dijagram toka sustava s jednosmjernom mikropumpom i zasebnim mikroventilom | 193 |
| Slika 144. Blok dijagram sustava s dvosmjernom mikropumpom..... | 194 |
| Slika 145. Dijagram toka sustava s dvosmjernom mikropumpom..... | 194 |

Popis tablica

| | |
|---|-----|
| Tablica 1. Usporedba gustoće energije pri iskorištavanju dostupnih obnovljivih izvora iz okoline i potrošnih spremnika energije [Roundy ² , 2003.] | 13 |
| Tablica 2. Gustoća energije solarnih ćelija pri različitim uvjetima [Roundy ² , 2003.]..... | 18 |
| Tablica 3. Popis različitih izvora vibracija u ljudskom okruženju s najvišim iznosima ubrzanja i pripadajućim frekvencijama [Roundy ² , 2003.] | 25 |
| Tablica 4. Usporedba snage i volumena uređaja [Steingart et al., 2008.] | 26 |
| Tablica 5. Usporedba teorijske i praktično ostvarive gustoće snage [Roundy ² , 2003.]..... | 26 |
| Tablica 6. Dimenzije piezoelektričnog bimorfa | 74 |
| Tablica 7. Svojstva materijala | 74 |
| Tablica 8. Usporedba vlastite frekvencije konzole: MKE vs. analitički model | 103 |
| Tablica 9. Usporedba 1. vlastite frekvencije elektromehanički spregnute konzole: MKE vs. analitički model | 108 |
| Tablica 10. Usporedba maksimalnog napona normaliziranog s translacijskim ubrzanjem uklještenja elektromehanički spregnute konzole: MKE vs. analitički model | 108 |
| Tablica 11. Rezultati tranzijentne analize i razlike između analitičkog modela te linearne/nelinearne MKE | 115 |
| Tablica 12. Dimenzije MIDE Volture konzola | 119 |
| Tablica 13. Debljine slojeva Midé konzola V21B i V25W s pripadajućim modulima elastičnosti | 129 |
| Tablica 14. Dizajn dinamičkog eksperimenta i korištene veličine..... | 143 |
| Tablica 15. Svojstva materijala Midé konzola | 149 |
| Tablica 16. Razlike eksperimentalnih i numeričkih rezultata pri postignutom maksimalnom naponskom odzivu, % | 160 |
| Tablica 17. Razlike eksperimentalnih i numeričkih rezultata u postignutoj vlastititoj frekvenciji pri maksimalnom odzivu napona, % | 160 |
| Tablica 18. Tehničke specifikacije korištenog piezoelektričnog bimorfa [URL: APC] | 170 |
| Tablica 19. Specifikacije Freescale MPXY8300 mjernog mlodula s bežičnim primopredajnikom [Freescale Semiconductor, 2008.] | 173 |

Prilozi

A. MATLAB implementacija analitičkog modela opisanog u 3. poglavlju

```

% Program za proračun odziva (FRF) bimorfnog scavengera (cantilever-type)
% prema matematičkom modelu: Erturk A. & Inman D. J.: "An experimentally validated bimorph
% cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base
% excitations", Smart Materials and Structures, vol. 18, 2009, 025009.
% Pretpostavlja se serijski spoj piezoelektrika.

clc
clear all
close all

% FRF voltage output - to- base acceleration
j=sqrt(-1); %imaginary unit

d31=-190*10^(-12) ; % piezoelectric constant PZT 5H [m/V] (thesis p.285)
sE11= 16.2*10^(-12) % elastic compliance at constant electric field [m2/N] (formula thesis
p.282) 1/cE11
%cE11= 1/sE11; % GPa elastic stiffness (Young's modulus) of piezoceramic layer at constant
electric field [Pa=N/m2] (thesis p.116) 60.6e9
cE11= 6.7E10; %vrijednost iz mide tablice
e31=d31/sE11 % piezoelectric constant [N/(Vm)] (formula thesis p.282)

h_mide = 0.8e-3;
b=16.6e-3; % width of cantilever [m]
L=33e-3;

hp=0.225E-3; %thickness on account of new hes value
hfr=0.120E-3 %from .xcl based on the new hp thickness from mide ctalog and new hss value
hes=0.025E-3; %tanji espanex sloj
hss=0.035E-3; %COPPER thickness
hs=hfr*2+hss+hss*2; %substructure thickness- all layes, hes actually the middle layer
hpc=hes/2+hp/2
ro_s=8940; % density of substructure [kg/m3] (thesis p.116) 9000, 2640
ro_p=7800;% density of piezoceramic [kg/m3] (thesis p.116) 7500ro_w=19250;
ro_w=19250;
m=1430*b*hes+1920*2*b*hfr+8940*2*b*hss+7800*2*b*hp; %cantilever mass
Mt=2.4E-3; % tip mass x 1;2;3, number of MIDE weights used [kg] (thesis p.116)
a=(Mt/19250)^(1/3); %side of ideal cube tip mass

HM=0.000635*1
WM=b
LM=Mt/(ro_w*HM*WM)

It=(1/12)*Mt*(LM^2+HM^2)+Mt*(hs/2+hp+HM/2)^2;
Es=110e9; % Young's modulus of substrate material COPPER (thesis p.116)
Ees=4.5E9; % Young's modulus of ESPANEX
Efr=23.4E9;% Young's modulus of FR4
E_mide_v21B=40.6E9; %Measured Young's modulud for V21B

%%%%%%%%% moment presjeka za multimorf

%Equivalent, copper width reduced by 15%
% Ia=((Efr/Es)*b*(hfr^3)/12)+(Efr/Es)*b*hfr*(hes/2 + hp + hss + hfr/2)^2;
% Ib=(b*0.85*(hss^3)/12)+b*0.85*hss*(hes/2 + hp + hss/2)^2;
% Ic=((cE11/Es)*b*(hp^3)/12)+(cE11/Es)*b*hp*(hes/2 + hp/2)^2;
% Id=(Ees/Es)*b*(hes^3)/12;
% Ix_mide=2*Ia+2*Ib+2*Ic+Id;
% EI_mide=Ix_mide*Es;

%Equivalent, complete width
Ia=((Efr/Es)*b*(hfr^3)/12)+(Efr/Es)*b*hfr*(hes/2 + hp + hss + hfr/2)^2;
Ib=(b*(hss^3)/12)+b*hss*(hes/2 + hp + hss/2)^2;
Ic=((cE11/Es)*b*(hp^3)/12)+(cE11/Es)*b*hp*(hes/2 + hp/2)^2;
Id=(Ees/Es)*b*(hes^3)/12;
Ix_mide=2*Ia+2*Ib+2*Ic+Id;
EI_mide=Ix_mide*Es;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Real EI, E from experiments
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% copper width reduced by 15%
% Ia=(b*(hfr^3)/12)+b*hfr*(hes/2 + hp + hss + hfr/2)^2;
% Ib=(b*0.85*(hss^3)/12)+b*0.85*hss*(hes/2 + hp + hss/2)^2;
% Ic=(b*(hp^3)/12)+b*hp*(hes/2 + hp/2)^2;
% Id=b*(hes^3)/12;
% Ix_mide_real=2*Ia+2*Ib+2*Ic+Id;
% EI_mide_real=Ix_mide_real*E_mide_v21B;

% complete width
Ia=(b*(hfr^3)/12)+b*hfr*(hes/2 + hp + hss + hfr/2)^2;
Ib=(b*(hss^3)/12)+b*hss*(hes/2 + hp + hss/2)^2;
Ic=(b*(hp^3)/12)+b*hp*(hes/2 + hp/2)^2;
Id=b*(hes^3)/12;
Ix_mide_real=2*Ia+2*Ib+2*Ic+Id;
EI_mide_real=Ix_mide_real*E_mide_v21B;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%EI in case of 3 layers
% b_mod=(cE11/Es)*b %modified piezo thickness
% Ix=(b*hs^3)/12 + 2*(b_mod*hp^3)/12+b_mod*hp*(hs+hp)/2)^2
% EI=Es*Ix

EI=EI_mide;

% pause

n=1; % number of 0s of the transcendent equation
n_points = 2000; %number of points for discretization of x axis (eigenmode calculation,
numerical integration...)
Lambda=zeros(1,n); % array of values of eigenfrequency parameter Lambda that satisfy the
equation
w_n=zeros(1,n); % array of values of eigenfrequency omega
k=1 % counter of 0s
x=linspace(0,L,n_points); %an array of x values from point 0 to the end of the beam (beam
length)

%FRF data
Rl=0.1e3;
f_l = 135; %lower frequency limit of the sweep interval [Hz] %prvo od 120
f_u = 190; %upper frequency limit of the sweep interval [Hz] %prvo od 160
t_s = 1; %start time of the sweep
t_f = 15; %finish time of the sweep
t = linspace(t_s,t_f,n_points); %timeline array
w_r = linspace(f_l*2*pi, f_u*2*pi, n_points); %rotational frequency sweep interval (in thesis
marked with just w(...or omega))
f=linspace(f_l, f_u, length(t));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CALCULATION OF EIGENVALUES & CORRESPONDING EIGENFREQUENCIES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for x=1:50
    z(x)=fzero(@(Lambda)
(1+cos(Lambda)*cosh(Lambda)+Lambda*Mt/(m*L)*(cos(Lambda)*sinh(Lambda)-...
sin(Lambda)*cosh(Lambda))-Lambda^3*It/(m*L^3)*(cosh(Lambda)*sin(Lambda)...
+sinh(Lambda)*cos(Lambda))+Lambda^4*Mt*It/(m^2*L^4)*(1-cos(Lambda))*...
cosh(Lambda)), x); % solution of transcendent equation 3.20 (thesis p.51) in the
vicinity of point x

end

x=1;
Lambda(k)=z(x);

for x=(x+1):50
    if z(x)>Lambda(k)*1.1 && k<n %check if the next eigenvalue from the z array is bigger than
the one previously placed in the Lambda array

```



```

        k=k+1;
        Lambda(k)=z(x); %filling up the eigenvalue array with single occurrences of eigenvalues
    end
end

w_n=(Lambda.^2).*sqrt(EI/(m*L^4)); %eigenfrequencies in [rev/s] from equation 3.19 (thesis
p.51)

freq=w_n/(2*pi); %%eigenfrequencies in [Hz]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CALCULATION OF EIGENMODES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Sigma=(sin(Lambda)-sinh(Lambda)+Lambda.*(Mt/(m*L)).*(cos(Lambda)-cosh(Lambda)))./...
(cos(Lambda)+cosh(Lambda)-Lambda.*(Mt/(m*L)).*(sin(Lambda)-sinh(Lambda))); % parameter for
the calculation of eigenfunction Fi_r (eq 3.16, thesis p.51)

Cr=1; % modal amplitude constant

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ORTHOGONALITY CONDITIONS - CALCULATION OF THE Cr CONSTANT
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%FIRST CONDITION
i=1;
k=1; %row counter for integral matrix values
x=linspace(0,L,n_points); %an array of x values from point 0 to the end of the beam (beam
length)

while k<=n %a loop which calculates discrete function values at each point x for the first
part of the ortho. condition (the loop is necessary for integral to be claculated for each
eigenmode)
    for i=1:n_points
        y_orthol_pt1(k,i) = (cos((Lambda(k)/L)*x(i))-
cosh((Lambda(k)/L)*x(i))+Sigma(k)*(sin((Lambda(k)/L)*x(i))-sinh((Lambda(k)/L)*x(i))))^2;
    end
    orthol_pt1(k)=m*trapz(x,y_orthol_pt1(k,:)); %calculate the integral in the first ortho.
condition for n_points
    k=k+1;
end

orthol_pt2=Mt.*(cos(Lambda)-cosh(Lambda)+Sigma.*(sin(Lambda)-sinh(Lambda))).^2; %2nd part of
first orthogonality condition (eq. 3.18, p51, see report Erturk Inmam - Orthogonality
conditions constant calculation
orthol_pt3=(It*((Lambda/L).^2)).*(-sin(Lambda)-sinh(Lambda)+Sigma.*(cos(Lambda)-
cosh(Lambda))).^2; % %3rd part of first orthogonality condition (eq. 3.18, p51, see
reportErturk Inmam - Orthogonality conditions constant calculation

Cr1=sqrt(1./(orthol_pt1+orthol_pt2+orthol_pt3))

%SECOND CONDITION

i=1;
k=1; %row counter for integral matrix values
x=linspace(0,L,n_points); %an array of x values from point 0 to the end of the beam (beam
length)

while k<=n %a loop which calculates discrete function values at each point x for the first
part of the ortho. condition (the loop is necessary for integral to be claculated for each
eigenmode)
    for i=1:n_points
        y_ortho2_pt1(k,i) = ((Lambda(k)/L)^4)*(cos((Lambda(k)/L)*x(i))-
cosh((Lambda(k)/L)*x(i))+Sigma(k)*(sin((Lambda(k)/L)*x(i))-sinh((Lambda(k)/L)*x(i))))^2;
    end
    ortho2_pt1(k)=trapz(x,y_ortho2_pt1(k,:)); %calculate the integral in the first ortho.
condition for n_points
    k=k+1;
end

```

```

ortho2_pt2=((Lambda/L).^3).* (cos(Lambda)-cosh(Lambda)+Sigma.*(sin(Lambda)-
sinh(Lambda))).*(sin(Lambda)-sinh(Lambda)+Sigma.*(-cos(Lambda)-cosh(Lambda))); %2nd part of
first orthogonality condition (eq. 3.18, p51, see report Erturk Inmam - Orthogonality
conditions constant calculation
ortho2_pt3=((Lambda/L).^3).* (-sin(Lambda)-sinh(Lambda)+Sigma.*(cos(Lambda)-cosh(Lambda))).*
(-cos(Lambda)-cosh(Lambda)+Sigma.*(-sin(Lambda)-sinh(Lambda))); % %3rd part of first
orthogonality condition (eq. 3.18, p51, see report Erturk Inmam - Orthogonality conditions
constant calculation
%

Cr2 = w_n .* sqrt(1./(EI.*(ortho2_pt1 - ortho2_pt2 + ortho2_pt3)))

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Eigenshape plots
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% hold on
% figure(1)
%
% k=1; %row counter for eigenmodes matrix values
% while k<=n %a loop which calculates eigenmode values for each calculated mode
%     for i=1:n_points
%         Fi_r(k,i)=Cr.*(cos(Lambda(k)*x(i)/L)-cosh(Lambda(k)*x(i)/L)+...
%             Sigma(k)*(sin(Lambda(k)*x(i)/L)-sinh(Lambda(k)*x(i)/L))); % eigenfunction Fi_r
(f.3.16 thesis p.51)
%     end
%     plot(x/L,Fi_r(k,1:end))
%     k=k+1;
% end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Multi mode electromechanical FRF's - equation components
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Fi_r_der_xL=Cr1.*Lambda./L.* (-sin(Lambda)-sinh(Lambda)+Sigma.*(cos(Lambda)-cosh(Lambda))); %
derivative of eigenfunction Fi_r @ x=L

Kappa_r=-e31*hpc*b*(Fi_r_der_xL); % modal coupling term in the electrical coupling equation
(thesis eq. 3.27, p.54 & eq.3.88, p.68)

%integrating loop (results to be used in eq. 3.58, thesis p.64)
i=1;
k=1; %row counter for integral matrix values
x=linspace(0,L,n_points); %an array of x values from point 0 to the end of the beam (beam
length)

while k<=n %a loop which calculates discrete function values and integrates Fi_r at each point
x (to be used in eq. 3.58, thesis p.64)
    for i=1:n_points
        Fi_r(k,i) = Cr1(k)*(cos((Lambda(k)/L)*x(i))-
cosh((Lambda(k)/L)*x(i))+Sigma(k)*(sin((Lambda(k)/L)*x(i))-sinh((Lambda(k)/L)*x(i))));
    end
    Fi_r_int_0L(k)=trapz(x,Fi_r(k,:)); %calculate the integral (to be used in eq. 3.58, thesis
p.64)
    k=k+1;
end

Fi_r_xL=Cr1.*(cos(Lambda)-cosh(Lambda)+Sigma.*(sin(Lambda)-sinh(Lambda))); % eigenfunction
Fi_r @ x=L (to be used in eq. 3.58 & 3.59, thesis p.64)

% % !!
Sigma_r=-m*Fi_r_int_0L-Mt*Fi_r_xL; % eq. 3.58,p.64 parameter of the complex modal forcing
amplitude (found in thesis eq.3.36,p.58)
% % !!

k=1;
while k<=n %a loop which calculates discrete function values and integrates x*Fi_r at each
point x (to be used in eq. 3.59, thesis p.64)
    for i=1:n_points

```

```

    x_Fi_r(k,i) = x(i)*Cr1(k)*(cos((Lambda(k)/L)*x(i)) -
    cosh((Lambda(k)/L)*x(i))+Sigma(k)*(sin((Lambda(k)/L)*x(i))-sinh((Lambda(k)/L)*x(i))));
    end
    x_Fi_r_int_0L(k)=trapz(x,x_Fi_r(k,:)); %calculate the integral (to be used in eq. 3.59,
thesis p.64)
    k=k+1;
end

% % !!
Tau_r=-m*x_Fi_r_int_0L-Mt*L*Fi_r_xL; % eq. 3.59,p.64 parameter of the complex modal forcing
amplitude (found in thesis eq.3.36,p.58)
% % !!

eps0= 8.854*10^(-12); %permittivity del vuoto (F/m)
%Epsilon_T33=830*eps0
Epsilon_S33=830*eps0; % permittivity component at constant strain with the plane stress
assumption [F/m] (thesis p.116)

% !!
Cp=26e-9; % internal capacitance (MIDE experimental measurement for dynamic excitation at 120
Hz)

Zeta=0.006; % thesis p.118(top), modal mechanical damping ration (includes combined effect of
strain rate and air damping) - measured!!

%ALPHAD & BETAD - Ansys damping coefficients
f1_damp = f_l;
f2_damp = f_u;
D = [1/(4*pi*f1_damp) pi*f1_damp; 1/(4*pi*f2_damp) pi*f2_damp];
Da = [Zeta pi*f1_damp; Zeta pi*f2_damp];
Db = [1/(4*pi*f1_damp) Zeta; 1/(4*pi*f2_damp) Zeta];
ALPHAD = det(Da)/det(D)
BETAD = det(Db)/det(D)

%za f1=120 i fu=160, ALPHAD = 4.3084 BETAD = 5.6841e-006

Theta_s=e31*b/(2*hp)*(hs^2/4-(hp+hs/2)^2); %piezoelectric coupling for series piezoelectric
connection (thesis eq.3.8,p.49)

% !!
Chi_r_s=Theta_s*Fi_r_der_xL; % modal electromechanical coupling (thesis p.56, eq. 3.31)
% !!

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of FRF which relates the voltage output to translational base
%acceleration (thesis p.64, eq. 3.61)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Rl=0.1;
% f_l = 100; %lower frequency limit of the sweep interval [Hz]
% f_u = 3000; %upper frequency limit of the sweep interval [Hz]
% t_s = 1; %start time of the sweep
% t_f = 6; %finish time of the sweep
% t = linspace(t_s,t_f,n_points); %timeline array
% w_r = linspace(f_l*2*pi, f_u*2*pi, n_points); %rotational frequency sweep interval (in
thesis marked with just w(...or omega))
alfa_w_r_num = zeros(n,length(t));
alfa_w_r_den = zeros(n,length(t));

%numerator part of eq.3.61, each column to be summed up
k=1;
while k<=n
    for i=1:length(t)
        alfa_w_r_num(k,i)=(j*w_r(i)*Kappa_r(k)*Sigma_r(k))/(w_n(k)^2 - w_r(i)^2
+j*2*Zeta*w_n(k)*w_r(i));
    end
    k=k+1;
end

%denominator part of eq.3.61, each column to be summed up
k=1;
while k<=n
    for i=1:length(t)
        alfa_w_r_den(k,i)=(j*w_r(i)*Kappa_r(k)*Chi_r_s(k))/(w_n(k)^2 - w_r(i)^2
+j*2*Zeta*w_n(k)*w_r(i));
    end
end

```

```
end
k=k+1;
end

%final FRF expression which relates the voltage output to translational
%base acceleration
alfa_w_r=(sum(alfa_w_r_num,1))./(1/Rl + j.*w_r.*Cp/2 + (sum(alfa_w_r_den,1))); %final
expression for FRF values
```

B. ANSYS APDL kod korišten u 4. poglavlju

B.1 Harmonijska analiza

! Kod baziran na rješenju Yanga i Tanga, modificiran i korišten s dopuštenjem

! Yang Y. i Tang L., Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters, Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 20, 2223, 2009.

```

/CLEAR
/PREP7
/UIS,MSGPOP,0
!-----!
!Geometry Dimensions          !
!-----!
! Beam
BeamL = 0.1
BeamW = 0.02
BeamH = 0.0005
!Piezoelement
PiezoL = 0.1
PiezoW = 0.02
PiezoH = 0.0004
!Epoxy (not used in this harvester configuration)
EpoxyL = 0.028
EpoxyW = 0.014
EpoxyH = 0.0001
!Tungsten tip mass - CUBIC
Tungsten = 0.00371
!TungstenW = 0.04
!TungstenH = 0.01
a = 0.003731 !ideal side of a cubic mass

!-----!
!Element Types                !
!-----!
! Beam Element
ET,1,SOLID186
!Piezoelectric Element
ET,2,solid 226,1001
!Epoxy Element
ET,3,SOLID186
!Tungsten Element
ET,4,SOLID186
!Resistor Element
ET,5,CIRCU94,0
!Inductor Element
ET,6,CIRCU94,1
!Capacitor Element
ET,7,CIRCU94,2
!Wire Element
ET,8,200
!Mass Element
ET,9,MASS21,,,3 ! 2-D mass with rotary inertia,

!-----!
!Material Properties          !
!-----!
! Beam Material Properties
MP,DENS,1,7850
MP,EX,1,20.6e10 !100e9 aluminum, 20.6e10 steel
MP,PRXY,1,0.0

!Piezoelectric Material Properties
MP,DENS,2,7800
MP,EX,2,61e9
MP,PRXY,2,0.0
MP,PERx,2,1730

```

```

MP,PERY,2,1700
MP,PERZ,2,1730
TB,PIEZ,2,,0 !unos 'e' koeficijenata
TBMODIF,1,3,-10.4 !e31=-10.4 according to ERTURK, -12.54 Tangov unknown material

!Epoxy Material Properties
MP,DENS,3,2200
MP,EX,3,100000000
MP,PRXY,3,0.38

!Tungsten Material Properties
MP,EX,4,411e9
MP,PRXY,4,0.28
MP,DENS,4,19250

!Point Mass Properties
Izzmass = a*a*a*a/12
Mt = 0.1 !tip mass
R,9, Mt, Izzmass ! MASS, IZZ

!-----!
!Reserved Nodes for Circuit      !
!-----!
!circuit dimension
cirdim = 0.02
n,6,-4*cirdim,0,3*cirdim
n,7,-4*cirdim,0,cirdim

!-----!
!FEM Domain Geometries          !
!-----!
!Create Beam, Epoxy and Piezoelement
BLOCK,OffsetX,(OffsetX+PiezoL),-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0,0,PiezoH,
BLOCK,0,BeamL,-BeamW/2.0,BeamW/2.0,PiezoH,PiezoH+BeamH,
BLOCK,OffsetX,(OffsetX+PiezoL),-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0,(PiezoH+BeamH),(BeamH+2*PiezoH),
BLOCK,(PiezoL-Tungsten/2),(PiezoL+Tungsten/2),Tungsten/2,-Tungsten/2,(BeamH+2*PiezoH),(Tungsten+BeamH+2*PiezoH),

!-----!
!Mesh                            !
!-----!
!attribute for volume

!Piezoelectric
vsel,s,loc,x,OffsetX,OffsetX+PiezoL
vsel,r,loc,z,0,PiezoH
vatt, 2,,2,

vsel,s,loc,x,OffsetX,OffsetX+PiezoL
vsel,r,loc,z,(PiezoH+BeamH),(BeamH+2*PiezoH)
vatt, 2,,2,

!Aluminum Beam
vsel,s,loc,x,0,BeamL
vsel,r,loc,z,PiezoH,PiezoH+BeamH
vatt, 1,,1,

!Tungsten tip mass
vsel,s,loc,x,(PiezoL-Tungsten/2),(PiezoL+Tungsten/2)
vsel,r,loc,z,(BeamH+2*PiezoH),(Tungsten+BeamH+2*PiezoH)
vatt, 4,,4,

!Seeding
LSEL,S,LENGTH,,BeamL
LESIZE,all, , ,60, , , , ,1
alls

LSEL,S,LENGTH,,BeamW
LESIZE,all, , ,12, , , , ,1
alls

LSEL,S,LENGTH,,BeamH
LESIZE,all, , ,4, , , , ,1
alls

```

```

LSEL,S,LENGTH,,PiezoH
LESIZE,all,,4,,,,,1
alls

!vsel,s,loc,0,BeamL
vsweep,all
alls

!Attributing a mass21 element to a node
!TYPE,9
!REAL,9
!nset,s,loc,x,PiezoL
!nset,r,loc,y,0
!nset,r,loc,z,(BeamH+2*PiezoH)
!*get,n_tip,node,0,num,min
!E,n_tip

!-----!
!Merge Nodes On the Interfaces of Beam, Epoxy & Piezo  !
!-----!
nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,PiezoH
NUMMRG,NODE,, , ,HIGH
alls

nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,PiezoH+BeamH
NUMMRG,NODE,, , ,HIGH
alls

!MERGE PIEZO & TIP MASS
nset,s,loc,x,PiezoL-Tungsten/2,PiezoL
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,PiezoH*2+BeamH
NUMMRG,NODE,, , ,HIGH
alls

!-----!
!Voltage Coupling: Setup Electrodes on Piezo  !
!-----!
nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,0
!*get,n_top1,node,0,num,min
cp,n_top1,volt,all
alls

nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,PiezoH
!*get,n_bot1,node,0,num,min
cp,n_bot1,volt,all
alls

nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,(PiezoH+BeamH)
!*get,n_bot2,node,0,num,min
cp,n_bot2,volt,all

nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,(2*PiezoH+BeamH)
!*get,n_top2,node,0,num,min
cp,n_top2,volt,all

ALLSELL,ALL,ALL

!-----!
!-----!

```

```

!----- Open-Circuit Modal Analysis -----!
!-----!
!-----!
/SOLU
antyp,modal
nmodes = 1
MODOPT,LANB,nmodes,50,100
MXPAND,nmodes

!-----!
!Load & Boundary Conditions      !
!-----!
!Structural BCs
nsel,s,loc,x,0
d,all,ux,0
d,all,uy,0
d,all,uz,0
alls
!Open-circuit configuration
d,n_bot1,volt,0
d,n_bot2,volt,0

solve
finish

*dim,NF_OC,array,1,nmodes

*do,i,1,nmodes
*get,NF_OC(1,i),mode,i,freq
*enddo

*CFOPEN,'open-circuit-resonance-frequencies', 'txt'
*do,i,1,nmodes
*VWRITE,i,NF_OC(1,i)
(f4.0,' ',f8.3)
*enddo
*CFCLOS

!-----!
!-----!
!----- Short-Circuit Modal Analysis -----!
!-----!
!-----!
/SOLU
!-----!
!Load & Boundary Conditions      !
!-----!
!Short-circuit configuration
d,n_top1,volt,0
d,n_top2,volt,0

solve
finish

*dim,NF_SC,array,1,nmodes

*do,i,1,nmodes
*get,NF_SC(1,i),mode,i,freq
*enddo

*CFOPEN,'short-circuit-resonance-frequencies', 'txt'
*do,i,1,nmodes
*VWRITE,i,NF_SC(1,i)
(f4.0,' ',f8.3)
*enddo
*CFCLOS

!-----!
!-----!
!----- Harmonic Analysis with resistor -----!
!-----!
!-----!

/PREP7
ddelete,n_top1,volt

```



```

ddele,n_bot1,volt
ddele,n_top2,volt
ddele,n_bot2,volt
CPDELE,n_top1,n_bot1,,ANY
CPDELE,n_top2,n_bot2,,ANY
alls

!Create resistor & connect directly to piezo electrodes
!Default resistor parameter
*SET, Resistance, 100000
r,5, Resistance
type,5 $ real, 5
e,7,6

nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,PiezoH
nset,a,loc,z,BeamH+PiezoH
nset,a,node,,7
CP,7,VOLT,all
alls

nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,BeamH+2*PiezoH
nset,a,loc,z,0
nset,a,node,,6
CP,6,VOLT,all
alls

nset,s,loc,x,(OffsetX+PiezoL/2.0)
nset,r,loc,y,0.0
nset,r,loc,z,BeamH+2*PiezoH
*get,topc_pt,node,0,num,min
alls

nset,s,loc,x,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,0.0
nset,r,loc,z,PiezoH+BeamH
*get,free_end_pt,node,0,num,min
alls

!-----!
!Load & Boundary Conditions      !
!-----!
!Bot Electrode BC
d,7,volt,0
!Base Vibration Acceleration
accelx=0.0
accely=0.0
accelz=-1.0
ACEL,accelx,accely,accelz

/SOLU
antyp,harm
ALPHAD,2.9950, %Matlab
BETAD,2.1221e-005,
DMPRAT,0,
alls

NF_previous=0
NF_next=0
!-----!
!Load Steps
!-----!
substep_sparse_zone=15
substep_cluster_zone=30

*do,i,1,nmodes
*IF, i, EQ, nmodes, THEN
NF_next=NF_SC(1,nmodes)*1.4
*ELSE
NF_next=NF_SC(1,i+1)
*ENDIF

```

```

harfrq,(NF_previous+(NF_SC(1,i)-NF_previous)*0.8),(NF_previous+(NF_SC(1,i)-NF_previous)*0.9)
nsubst,substep_sparse_zone
KBC,1
HROPT,FULL
HROUT,OFF
LUMPM,0
OUTPR,ALL,ALL,
LSWRITE,(i-1)*5+1,

harfrq,(NF_previous+(NF_SC(1,i)-NF_previous)*0.9),(NF_previous+(NF_SC(1,i)-NF_previous)*0.992)
nsubst,substep_sparse_zone
KBC,1
HROPT,FULL
HROUT,OFF
LUMPM,0
OUTPR,ALL,ALL,
LSWRITE,(i-1)*5+2,

harfrq,(NF_previous+(NF_SC(1,i)-NF_previous)*0.992), (NF_OC(1,i)+(NF_next-NF_OC(1,i))*0.002)
nsubst,substep_cluster_zone
KBC,1
HROPT,FULL
HROUT,OFF
LUMPM,0
OUTPR,ALL,ALL,
LSWRITE,(i-1)*5+3,

harfrq,(NF_OC(1,i)+(NF_next-NF_OC(1,i))*0.002), (NF_OC(1,i)+(NF_next-NF_OC(1,i))*0.025)
nsubst,substep_sparse_zone
KBC,1
HROPT,FULL
HROUT,OFF
LUMPM,0
OUTPR,ALL,ALL,
LSWRITE,(i-1)*5+4,

harfrq,(NF_OC(1,i)+(NF_next-NF_OC(1,i))*0.025), (NF_OC(1,i)+(NF_next-NF_OC(1,i))*0.25)
nsubst,substep_sparse_zone
KBC,1
HROPT,FULL
HROUT,OFF
LUMPM,0
OUTPR,ALL,ALL,
LSWRITE,(i-1)*5+5,

NF_previous=NF_OC(1,i)
*enddo

total_substep=nmodes*(substep_cluster_zone+4*substep_sparse_zone)
total_ls=nmodes*5

LSSOLVE,1,total_ls,1,
FINISH

/post26
/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,1,1

!-- voltage
nsol,200,6,VOLT,voltage
!-- voltage amplitude
abs,2,200,,volt_amp

!-- voltage phase
ATAN,199,200
FILLDATA,198,,3.1415926,0
QUOT,197,199,198
FILLDATA,196,,180,0
PROD,3,197,196,,volt_phase

!-- power
prod,198,2,2,,volt_amp_square
filldata,197,,Resistance,0

```

```

quot,4,198,197,,Power

!--- deflection
nsol,200,free_end_pt,U,Z,deflection
!--- deflection_amp
abs,5,200,,,defl_amp

!--- deflection phase
ATAN,199,200
FILLDATA,198,,,,3.1415926,0
QUOT,197,199,198
FILLDATA,196,,,,180,0
PROD,6,197,196,,defl_phase

!--- strain amplitude at top center
ANSOL,7,topc_pt,EPEL,X,e11
!--- deflection_amp
abs,8,7,,,e11_amp

!--- strain phase at top center
ATAN,199,7
FILLDATA,198,,,,3.1415926,0
QUOT,197,199,198
FILLDATA,196,,,,180,0
PROD,9,197,196,,e11_phase

*DIM,EXPORT_DATA,TABLE,total_substep,7
VGET,EXPORT_DATA(1,0),1
VGET,EXPORT_DATA(1,1),2
VGET,EXPORT_DATA(1,2),3
VGET,EXPORT_DATA(1,3),5
VGET,EXPORT_DATA(1,4),6
VGET,EXPORT_DATA(1,5),8
VGET,EXPORT_DATA(1,6),9
VGET,EXPORT_DATA(1,7),4

/OUTPUT,R1e5,'xls','',append
*VWRITE, '*****',*****
%14C%14C
*VWRITE, 'Rload=',Resistance
%14C%10.3G
*VWRITE,'FREQ','voltage_amp','voltage_phase','deflection_amp','deflection_phase','top_center_e11_amp','top_center_e11_phase','power'
%14C %14C %14C %14C %14C %14C %14C %14C %14C
*VWRITE,EXPORT_DATA(1,0),EXPORT_DATA(1,1),EXPORT_DATA(1,2),EXPORT_DATA(1,3),EXPORT_DATA(1,4),EXPORT_D
ATA(1,5),EXPORT_DATA(1,6),EXPORT_DATA(1,7)
%14.5G %14.5G %14.5G %14.5G %14.5G %14.5G %14.5G %14.5G %14.5G %14.5G
/OUTPUT,TERM

```

B.2 Tranzijentna analiza

```

!-----!
!-----!
!----- TRANSIENT Analysis with resistor -----!
!-----!
!-----!
/CONFIG, NRES, 50000 !+1 jer ne kreće od nule, i +1 jer ima posljednji UNLOAD step kojeg ne čitam iz tablice

/PREP7
ddele,n_top1,volt
ddele,n_bot1,volt
ddele,n_top2,volt
ddele,n_bot2,volt
CPDELE,n_top1,n_bot1,,ANY
CPDELE,n_top2,n_bot2,,ANY
alls

!Create resistor & connect directly to piezo electrodes
!Default resistor parameter
*SET, Resistance, 100000
r,5, Resistance
type,5 $ real, 5

```

e,7,6

```
nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,PiezoH
nset,a,loc,z,BeamH+PiezoH
nset,a,node,,7
CP,7,VOLT,all
alls
```

```
nset,s,loc,x,OffsetX,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,-PiezoW/2.0,PiezoW/2.0
nset,r,loc,z,BeamH+2*PiezoH
nset,a,loc,z,0
nset,a,node,,6
CP,6,VOLT,all
alls
```

```
nset,s,loc,x,(OffsetX+PiezoL/2.0)
nset,r,loc,y,0.0
nset,r,loc,z,BeamH+2*PiezoH
*get,topc_pt,node,0,num,min
alls
```

```
nset,s,loc,x,(OffsetX+PiezoL)
nset,r,loc,y,0.0
nset,r,loc,z,PiezoH+BeamH
*get,free_end_pt,node,0,num,min
alls
```

```
!-----!
!Load & Boundary Conditions      !
!-----!
```

```
!Bot Electrode BC
d,7,volt,0
!Base Vibration Acceleration
!accelx=0.0
!accely=0.0
!accelz=-1.0
!ACEL,accelx,accely,accelz
```

/SOL !enter the solution processor

PTS= 7936 !staviti jednu točku

```
*DIM,UZDISP, TABLE,PTS,2,,INDEX,TIME,DISP
```

!Ovo je unos tablice od 3 stupca x PTS (broj točaka), INDEX vrijednosti (0,1,2,3,4...) on automatski posiše, dok broj 2 označava stupce TIME I DISP

```
!*TREAD,UZDISP,D:\ansys_routine\working\1gram\transient\sweep.txt,,0
!*STATUS,UZDISP
```

```
*TREAD,UZDISP,D:\ansys_routine\working\1gram\transient\sweep.txt,,0
*STATUS,UZDISP
```

!DELT= 0.001601178

```
ANTYPE,TRANS
TIMINT,ON,STRUC
NLGEOM,ON
AUTOTS, ON
RESCONTROL,DEFINE,NONE,NONE
NEQIT, 20
OUTRES,ALL,LAST
!TRNOPT,REDUC
```

```
!KBC,1
ALPHAD, 3.3510 ! mass matrix multiplier
TINTP,,0.25,0.5,0.5
BETAD, 1.8863e-005! stiffness matrix multiplier
!DMPRAT,0.008, ! Sets a constant damping ratio.
```

ALLSEL

```
*DO, 1, 1, PTS
      NSEL, S, LOC, X, 0
NOW = UZDISP(1,1)
      D, ALL, UZ, UZDISP(1,2)
      TIME, NOW
      ALLSEL
      LSWRITE
*ENDDO

!UNLOAD step, leave time for transient response
!KBC, 1
!NSEL, S, LOC, X, 0
!D, 1, UY, 0
!TIME, NOW+(DELT*2)
!ALLSEL
!LSWRITE

!Transient response, free vibration step
!ALLSEL
!ACEL, 0, 9.81
!TIME, NOW+1
!ALLSEL
!LSWRITE

LSSOLVE, 1, PTS
FINISH

/STATUS, SOLU
```

Životopis

David Blažević rođen je 21. siječnja 1984. u Rijeci. Nakon srednjoškolskog obrazovanja u matematičkoj gimnaziji Andrije Mohorovičića upisuje Tehnički Fakultet pri Sveučilištu u Rijeci na kojem diplomira 2008. god. Nakon kratkog rada u tvrtci Luka Rijeka d.d., zapošljava se na Tehničkom Fakultetu u Rijeci kao znanstveni novak na MZOŠ projektu prof. dr. sc. Saše Zelenike 'Podatljivi uređaji ultra-visoke preciznosti za uporabu u mikro i nanotehnologiji'. Sudjeluje u brojnim aktivnostima Laboratorija za precizno inženjerstvo koje uključuju: istraživanja u sklopu doktorskih disertacija i studentskih završnih radova, prototipiranje tehnoloških inovacija, prijave na tuzemne i inozemne znanstvene projekte te u popularizaciji znanosti. U međuvremenu postaje i djelatnikom novoosnovanog Centra za mikro i nano znanosti i tehnologije, također pri Sveučilištu u Rijeci u čijem radu aktivno sudjeluje. Do sada je boravio na razmjenama pri Sveučilištu u Udinama te je bio stipendist Sinkrotronskog istraživačkog postrojenja Elettra u Italiji. U znanstvenom radu bavi se istraživanjem koncepta pretvaranja kinetičke energije vibracija u električnu energiju, sustavima za precizno i točno pozicioniranje, preciznim laboratorijskim mjerenjima te inicira suradnje s akademijom i industrijom. Sudjeluje u nastavi (izvođenju konstrukcijskih vježbi) na kolegiju Konstrukcijski elementi I na preddiplomskom sveučilišnom studiju Strojарstva, kolegiju Osnove konstruiranja na preddiplomskom sveučilišnom studiju Elektrotehnike i Računarstva te Precizne konstrukcije i tehnologija mikrosustava i Laboratorijske vježbe A i B na diplomskom sveučilišnom studiju Strojарstva. Uz navedeno održava i znanstveno popularna predavanja u osnovnim i srednjim školama te Festivalima znanosti. Autor je više znanstvenih radova objavljenih u međunarodnim zbornicim te jednog patenta prijavljenog pri DZIV-u. Oženjen je i otac jednog djeteta, a u slobodno vrijeme bavi se vinilnom arheologijom, radi kao disk džokej i piše blog na www.smedisecer.net.

Popis objavljenih radova

Blažević, David; Zelenika, Saša. Numerical modelling of piezoelectric vibration energy scavenging bimorphs // Proceedings of the 14th EUSPEN International Conference - Vol. 1 / Leach, R. (ur.). Delft, Nizozemska : Sieca Repro, 2014. 389-392 (poster,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

Kamenar, Ervin; Zelenika, Saša; Blažević, David; Šamanić, Ivan. River flow energy harvesting by employing piezoelectric eels // Proceedings of the 14th EUSPEN International Conference - Vol. 1 / Leach, R. (ur.). Delft, Nizozemska : Sieca Repro, 2014. 63-66 (poster,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

Blažević, David; Kamenar, Ervin; Zelenika, Saša. Load optimised piezoelectric generator for powering battery-less TPMS. // Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. 8763 (2013) ; 87631K-1-87631K-10 (članak, znanstveni).

Blažević, David; Kamenar, Ervin; Zelenika, Saša. Wireless tire pressure monitoring by employing kinetic energy harvesting // Proceedings of the 7th International Conference of the Croatian Society of Mechanics (7ICCSM2012) / Virag, Zdravko ; Kozmar, Hrvoje ; Smojver, Ivica (ur.). Zagreb : Studio HRG, 2012. 113-114 (poster,međunarodna recenzija,sažetak).

Blažević, David; Kamenar, Ervin; Zelenika, Saša. Vibration energy scavenging powered wireless tire pressure monitoring sensor // Proceedings of the 12th euspen International Conference / Shore, P. ; Spaan, H. ; Burke, Th. (ur.). Delft, Nizozemska : EUSPEN, 2012. 408-411 (poster,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

Blažević, David; Kamenar, Ervin; Zelenika, Saša. Wireless tire pressure monitoring by employing kinetic energy harvesting // Proceedings of the 7th International Conference of the Croatian Society of Mechanics (7ICCSM2012) / Virag, Zdravko ; Kozmar, Hrvoje ; Smojver, Ivica (ur.). Zagreb : Studio HRG, 2012. 113-114 (poster,međunarodna recenzija,sažetak).

Zelenika, Saša; Blažević, David. Issues in validation of performances of piezoelectric vibration-based energy harvesters. // Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. 8066 (2011) ; 806615-1-806615-11 (članak, znanstveni).

Blažević, David; Zelenika, Saša. Sensitivity Analysis of Piezoelectric Scavenging of Vibration Energy // Proceedings of 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN) - vol. 2 / Spaan, H. ; Shore, P. ; Van Brussel, H. ; Burke, T. (ur.). Delft, Nizozemska : Sieca Repro, 2011. 454-457 (plenarno predavanje,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

Blažević, David; Zelenika, Saša; Gregov, Goran., Mechanical analysis of piezoelectric vibration energy harvesting devices // 33rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics – Mipro 2010 ; Microelectronics, electronics and Electronic Technology (MEET) & Grid and Visualization Systems (GVS) / Biljanović, Petar ; Skala, Karolj (ur.), Zagreb : Denona, 2010. 148-152

Blažević, David; Zelenika, Saša; Gregov, Goran., Experimental characterisation of off-the-shelf vibration energy scavengers // Proceedings of 10th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN) - Vol. II / Spaan, H. ; Shore, P. ; Van Brussel H. ; Burke, T. (ur.), Delft, Netherlands : Sieca Repro, 2010. 290-294

Patent:

'Sustav za automatsku regulaciju tlaka sa samoregulirajućim autonomnim ventilom', DZIV prijava P20130370A