

# Vpliv asimetrije vzbujalnega signala na delovanje mikročrpalke

Borut Pečar, Matej Možek in Danilo Vrtačnik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: borut.pecar@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** Za cenovno ugodno izvedbo krmilnega modula piezoelektričnih mikročrpalk je primerna topologija z dvema medsebojno izključujočima se SMPS »boost« napajalnima pretvornikoma. Pomanjkljivost predlaganega modula je ustvarjanje napetostno asimetričnega krmilnega signala pri priklopu na piezoelektrični aktuator mikročrpalke, ki pomeni piezoelektrično breme. Da bi raziskali vzrok asimetrije, smo izvedli impedančne meritve polariziranih in depolariziranih aktuatorjev treh proizvajalcev. Rezultati meritev so potrdili, da je napetostna asimetrija ustvarjenega signala posledica polarizacije piezoelektričnega aktuatorja in da stopnja asimetrije pomembno vpliva na pretočne in tlačne karakteristike mikročrpalke. Ker je zmogljivost mikročrpalke največja pri krmiljenju z napetostno simetričnim vzbujalnim signalom, predlagamo metodo za zagotavljanje napetostne simetrije z natančnim prilagajanjem obratovalnega cikla.

**Ključne besede:** mikročrpalka, krmilnik, napetostno asimetričen vzbujalni signal, piezoelektrični aktuator

## The impact of the excitation-signal asymmetry on the micropump performance

For a cost-efficient micropump driving module, a topology with two mutually exclusive SMPS boost converters is proposed. Its disadvantage is a synthesis of the voltage-asymmetric excitation signal when the module is connected to a piezoelectric load. To investigate the cause of the asymmetry, the impedance of polarized and depolarized piezoelectric actuators from three different vendors is measured. It is shown that the voltage asymmetry of a synthesized signal is a result of the piezoelectric actuator polarization and that the degree of the signal asymmetry significantly affects the micropump flowrate and backpressure performance characteristics. Since the micropump performance is maximized when driven by a voltage-symmetric signal, a solution by fine-tuning of signal duty cycle for providing voltage symmetry is proposed.

**Keywords:** micropump, controller, voltage asymmetric excitation signal, piezoelectric actuator

## 1 UVOD

Mikročrpalke so osnovne komponente mikrofluidnih sistemov in so nepogrešljive povsod, kjer se zahteva natančna kontrola pretokov majhnih količin reagentov. Tipične aplikacije so uvajanje zdravil, mikrokemijske in biološke analize, hladilni in mazalni sistemi itd. [1]. Osnovni gradniki, ki omogočajo delovanje mikročrpalke, so piezoelektrični aktuatorji. Za pogon piezoelektričnih aktuatorjev so potrebna namenska krmilna vezja, sposobna ustvarjati visokonapetostne krmilne signale. Čeprav velja, da je delovanje mikročrpalk pogojeno tudi z obliko vzbujalnega signala, se za vzbujanje mikročrpalk najpogosteje uporabljajo

sinusni ali pravokotni amplitudno-simetričnimi signali brez nadaljnje analize vpliva oblike ali celo asimetrije signala na zmogljivost mikročrpalk. [2–5].

Za cenovno ugodne mikročrpalne aplikacije z majhno porabo energije je primeren miniaturni krmilni modul, razvit v LMSE, ki vključuje dva medsebojno izključujoča se SMPS (Switched Mode Power Supply) napajalna boost pretvornika. Krmilnik vključuje piezoelektrični aktuator v funkcijo vezja, zato ne potrebuje lastnega izhodnega kondenzatorja [5]. Čeprav modul omogoča sintezo učinkovitega krmilnega signala, je ustvarjeni signal amplitudno-asimetričen. Amplitudna asimetrija je posledica piezoelektričnega bremena.

V delu smo raziskali, zakaj razviti krmilnik ustvarja asimetrični vzbujalni signal pri priklučitvi na piezoelektrično breme. V ta namen smo izvedli ciklične impedančne meritve na izbranih vzorcih piezoelektričnih aktuatorjev. Raziskali smo vpliv asimetrije vzbujalnega signala na karakteristike zmogljivosti mikročrpalk. Za kompenzacijo spremenljive impedance piezoelektričnega bremena bomo predlagali pristop za uravnoteženje krmilnega signala z natančnim nastavljanjem obratovalnega cikla.

## 2 KRMILNO VEZJE ZA VZBUJANJE PIEZOELEKTRIČNIH MIKROČRPALK

Razvoj sodobnih mikrofluidnih aplikacij poteka v smeri miniaturizacije, majhne porabe energije in prilagodljivosti.

Krmilnik mikročrpalk mora poleg ustvarjanja visokonapetostnih signalov omogočati nastavljanje

amplitude, frekvence in oblike signala za doseganje želenega odziva mikročrpalke v izbrani aplikaciji. Za stroškovno učinkovito izvedbo krmilnika je primerna topologija vezja, ki so jo predlagali na inštitutu Fraunhofer IZM [6]. Izvedba predvideva dva medsebojno izključujoča se SMPS »boost« napajalna pretvornika. Tadva vključujeta piezoelektrični aktuator v funkcijo vezja, zato ne potrebuje lastnega izhodnega kondenzatorja.

Prednosti predlaganega krmilnega sestava sta nizka cena gradnikov in prilagodljivost ustvarjenega signala v povezavi z digitalnim krmiljenjem.

Slabosti sta občutljivost na presluhe ključnih elektronskih komponent v miniaturi izvedbi in ustvarjen napetostno asimetričen signal ob priključitvi na piezoelektrično breme.

Tipične izmerjene vrednosti amplitud pozitivnega in negativnega napetostnega signala pri vzburjanju 200  $\mu\text{m}$  debelih diskastih piezoelektričnih aktuatorjev Sunnyc P-5H s premerom 10 mm so 130 oziroma -93 V [8]. Napetostna asimetrija je posledica neenake impedance piezoelektričnega bremena v pozitivni in negativni polperiodi vzbujačnega signala, saj pri predlagani izvedbi krmilnega modula impedanca bremena določa vršni vrednosti ustvarjenega signala.

Da bi raziskali odvisnost impedance piezoelektrične aktuatorja od smeri električnega polja v materialu, smo izvedli impedančne meritve na izbranih vzorcih piezoelektričnih aktuatorjev.

### 3 IMPEDANČNE MERITVE PIEZOELEKTRIČNIH AKTUATORJEV

Največ objav impedančnih meritev piezoelektričnih aktuatorjev v odvisnosti od prednapetosti vzbujačnega signala (ang. DC bias) se nanaša na tankoplastne in večplastne nepolarizirane aktuatorje [9–13]. Po našem pregledu literature ni objav s področja impedančnih meritev polariziranih debeloplastnih piezoelektrikov.

Impedančne meritve večplastnih  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  (PZT) aktuatorjev so opisane v [9] pri izbrani merilni frekvenci 100 kHz in vzbujačem signalu amplitude 0,1 V pri prednapetosti  $U_{DC}$  med -40 V in +40 V. Meritve so pokazale, da dielektrična konstanta pada eksponentno z naraščanjem enosmerne prednapetosti vzbujačnega signala, pri čemer je strmina upadanja največja pri enoplastnem aktuatorju. Manjšo asimetrijo karakteristike v povezavi s smerjo električnega polja pripisujejo neenakim razmeram v območju zgornje in spodnje elektrode. Mejno območje naj bi vsebovalo vgrajeno električno polje in če mejni območji pod spodnjo in pod zgornjo elektrodo nista enaki, se vgrajeni električni polji med seboj ne odštejeta in lahko pride do asimetrije, ker mora zunanje električno polje najprej premagati vgrajeno električno polje. Pojasnijo, da je ta efekt še posebno izrazit, če sta materiala elektrod različna.

V raziskavi skupine z univerze Pusan v Koreji [13] asimetrijo karakteristike razložijo enako, vendar dopuščajo možnost, da s kisikom nezasedena mesta v območju med elektrodo in piezoelektrikom vežejo nase proste elektrone, ko je na aktuator pritisnjena pozitivna napetost. Le v redkih primerih poročajo tudi o izmerjeni histerezi pri karakteristikah dielektrične konstante in izgubnega kota pri menjavi smeri električnega polja v piezoelektriku. Med raziskavo skupine z univerze Tver State v Rusiji [14] je bilo pokazano, da temperatura napuščanja tanke deponirane PZT plasti med 540 °C in 570 °C lahko vpliva na C-V karakteristiko in da se ob menjavi smeri električnega polja pojavi histereza v karakteristikah, vendar razlogi zanjo niso podani. Same spremembe v karakteristikah zaradi temperature napuščanja pa pripisujejo spremembam v mikrostrukturi.

Za merjenje impedance smo uporabili LCR meter HP 4284A z opcijo 001, ki v instrumentu združuje enosmerni napetostni vir  $\pm (1 \text{ mV} \sim 40 \text{ V})$ ,  $\leq 100 \text{ mA}$ , točnosti 0,1%. Za testne vzorce smo izbrali piezoelektrične aktuatorje P-5H podjetja Sunnyc [8], PIC 151 podjetja PI ceramics [15] in LQS2 podjetja Choko Ltd [16]. Osnovni deklarirani parametri piezoelektričnih aktuatorjev so podani v tabeli 1.

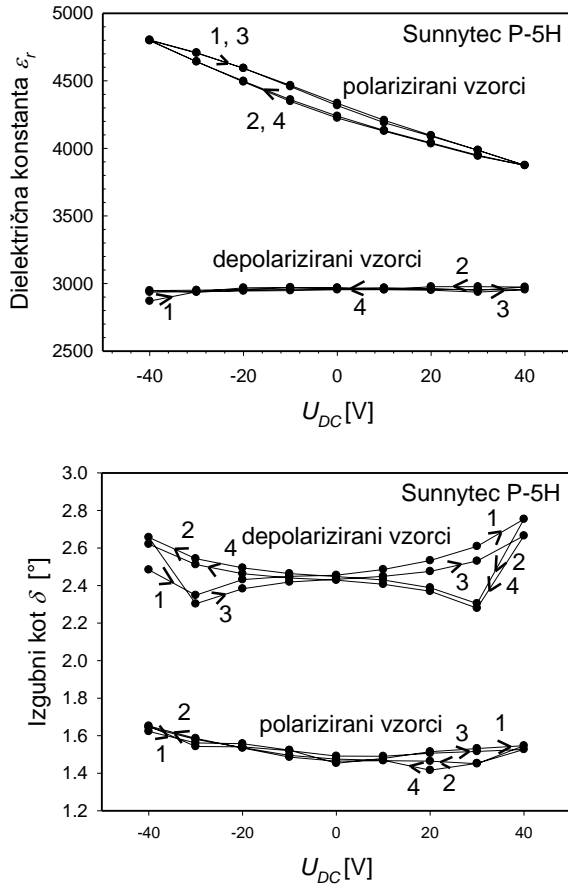
Tabela 1: Osnovni deklarirani parametri za piezoelektrične aktuatorje treh izdelovalcev

	$T_{Curie}$ [°C]	$d_{33}$	$d_{31}$
P-5H	180	650	-290
PIC 151	250	500	-210
LQS2	250	570	-260

Vzorci so mehansko krhki, zato je potreben poseben pristop k izvedbi električnih kontaktov. Za kontaktiranje elektrod piezoelektričnega aktuatorja smo izdelali pripravo, sestavljeno iz bakrenega traku, na katerega se položi piezoelektrični aktuator in čezenj napne vzmetna zaponka. Za meritev histereze impedančnih karakteristik smo meritev nadgradili z večkratnim cikliranjem vgrajenega enosmernega generatorja  $U_{DC}$  od -40 V do +40 V in nazaj do -40 V ter nazadnje celoten cikel še dvakrat ponovili, vse s korakom po 10 V. Frekvenco izmeničnega merilnega signala smo nastavili na vrednost 100 Hz, amplitudo vzbujačnega signala na 1V. Iz rezultatov impedančnih meritev smo izračunali dielektrično konstanto  $\epsilon_r$  in izgubni kot  $\delta$  PZT aktuatorja.

Prve meritve na polariziranih vzorcih aktuatorja P-5H so potrdile spremembo dielektrične konstante  $\epsilon_r$  pri preletu prednapetosti  $U_{DC}$  od -40 V do +40 V (slika 1, zgoraj, polarizirani vzorci). Z naraščanjem prednapetosti  $U_{DC}$  dielektrična konstanta  $\epsilon_r$  pada skoraj linearno s strmino  $11.25 \text{ V}^{-1}$ . Ob upadanju prednapetosti se pojavi histereza v karakteristiki  $\epsilon_r$ . Razlika  $\epsilon_r$  pri menjavi smeri električnega polja ( $U_{DC}$  pri prehodu skozi 0V) je 100, a se klub temu vrednosti  $\epsilon_r$  pri napetosti -40V spet ujema s prvo izmerjeno vrednostjo, nov cikel variacije prednapetosti pa se odrazi v enakih

vrednostih kot pri prvem preletu. Tudi vrednosti, izmerjene v tretjem ciklu, so identične, kar kaže na dobro ponovljivost meritev.



Slika 1: Izmerjena dielektrična konstanta  $\epsilon_r$  in izgubni kot  $\delta$  v odvisnosti od prednapetosti  $U_{DC}$  za polarizirane in depolarizirane vzorce P-5H

Pri preletu enosmerne prednapetosti  $U_{DC}$  od -40 V do +40 V se je kapacitivnost merjenega piezoelektričnega aktuatorja spremenila za 1 nF, kar je 25-odstotna sprememba. Zgornje meje prednapetosti  $U_{DC}$  so omejene z zmogljivostjo strojne opreme. S pomočjo ekstrapolacije lahko privzamemo, da se pri vzbujanju mikročrpalke z izmeničnim signalom in amplitudo 240 V<sub>pp</sub> kapacitivnost aktuatorja pri prehodu iz negativne v pozitivno polperiodo spremeni iz 12 nF na 9 nF. Procentualna razlika v kapacitivnosti (25%) je v korelaciji s procentualno razliko v amplitudah ustvarjenega signala (28%), kjer je amplituda prve polperiode 130 V, amplituda druge polperiode pa 93 V (glej poglavje 2). Variacija v izhodni impedanci bremena se odraža v doseganju različnih napetostnih nivojev dveh medsebojno izključujočih se SMPS »boost« napajalnih pretvornikov.

Sprememba izgubnega kota pri variaciji prednapetosti  $U_{DC}$  je prikazana na sliki 1 (spodaj, polarizirani vzorci). Izgubni kot je največji pri vrednosti

$U_{DC} = -40$  V, z zmanjševanjem napetosti  $U_{DC}$  proti 0V upada s trendom  $-0.005$  °/V, nato pa pri napetosti +40 V spet naraste na vrednost, ki je nižja od začetne vrednosti  $U_{DC}$  pri -40 V. Pri zmanjševanju prednapetosti  $U_{DC}$  je opazna histereza, vendar le pri pozitivnih vrednostih napetosti, kjer je izgubni kot pri upadanju  $U_{DC}$  manjši kot pri naraščanju. V ponovitvi merilnega cikla izmerjene vrednosti sledijo vrednostim prvega cikla. Če predpostavimo, da izgubni kot podaja izgube v piezoelektričnem aktuatorju, so te najmanjše pri zmanjševanju pozitivne enosmerne komponente električnega polja. Na podlagi rezultatov meritev sklepamo, da je to povezano z relaksacijo domen.

Karakteristika dielektrične konstante v odvisnosti od smeri električnega polja je v nasprotju s primeri iz literature [10-13], kjer se dielektrična konstanta sicer spreminja v odvisnosti od velikosti enosmerne komponente električnega polja, ne pa od smeri polja. Po podrobnem pregledu znanstvenih objav je bilo ugotovljeno, da so bile vse objavljene meritve izvedene na nepolariziranih aktuatorjih. To nas je napeljalo na domnevo, da je za specifično nesimetrično karakteristiko dielektrične konstante (slika 1, zgoraj, polarizirani vzorci) morda ključna polarizacija piezoelektrika. Za potrditev domneve so bile nujne meritve na nepolariziranih vzorcih. V ta namen smo izbrane polarizirane vzorce depolarizirali.

### 3.1 Polarizacija / Depolarizacija

V večini neprevodnih (dielektričnih) materialov je električna polarizacija  $P$ , ki jo induciramo s pomočjo zunanega električnega polja, majhna. Poznamo piezoelektrične snovi, kjer polarizacijo spremenimo z mehansko napetostjo, piroelektrike, kjer polarizacijo spremenimo s temperaturno spremembo in feroelektrike, kjer polarizacijo spremenimo z električnim poljem [17].

Feroelektrik je material, ki ima že po naravi spontano polarizacijo in mu jo lahko z nasprotnim zunanjim poljem, večjim od koercivnega polja  $E_c$ , obrnemo. Nad Curiejevo temperaturo feroelektrik preide v paraelektrično stanje. Vsi feroelektriki so tudi piezoelektriki.

Prvi pogoj za feroelektričnost je prisotnost spontanega električnega dipolnega momenta, ki se lahko spreminja ob prisotnosti električnega polja [18]. Dipolni moment  $p$  definiramo kot

$$p = \int \rho(\mathbf{r}) r dV \quad (1),$$

kjer je  $\rho(\mathbf{r})$  gostota električnega naboja na določenem mestu v snovi. Če lahko ione v kristalu obravnavamo kot točkaste nabite delce, lahko zgornji integral preide v direktno vsoto po vseh ionih

$$p = \sum_i q_i r_i \quad (2),$$

kjer je  $q_i$  naboj  $i$ -tega iona in  $r_i$  razdalja do  $i$ -tega iona. Kristali s centrom inverzije ne morejo biti feroelektriki. Če ni centra inverzije, obstaja vsaj ena polarna os. Tisti, ki imajo ob odsotnosti zunanega polja in zunanje sile na snov polarno os, so feroelektriki, preostali pa piezoelektriki, kjer elastična sila spreminja polarizacijo. Feroelektrična snov je sestavljena iz več takšnih molekul, skupni dipolni moment je vsota

$$P = \sum_{molekula} P_{molekula} \quad (3).$$

Polarizacija je definirana kot dipolni moment na enoto prostornine

$$P = \frac{\sum p}{V} \quad (4).$$

Odziv polarizacije feroelektrika na zunanje električno polje opiše histerezna zanka. Dielektrična konstanta nam pove, kako se bo ob prisotnosti zunanega električnega polja v snovi prerazporedil naboj. Večja ko je le-ta, močnejše se bodo ločili pozitivni in negativni naboji v snovi [19].

Po depolarizaciji piezoelektričnega materiala ta izgubi piezoelektrične lastnosti in se ne uvršča več med piezoelektrike, temveč med dielektrike. Ob prisotnosti zunanega električnega polja pa se naboj v snovi še vedno prerazporedi.

Postopek depolarizacije smo izvedli tako, da smo vzorce za 10 minut pogreli na temperaturo, ki je bila za 40 °C višja od deklarirane Curiejeve temperature. Deklarirana Curiejeva temperatura za P-5H je 180 °C, za PIC 151 in LQS2 pa 250 °C.

Impedančne meritve na vzorcih smo izvedli takoj po depolarizaciji in spet ponovili po 24 urah, s čimer smo želeli preveriti stabilnost depolariziranega materiala. Ujemanje rezultatov je potrdilo stabilnost, kar kaže na to, da je depolarizacija zaključen proces, pri katerem se ob ohlajanju piezoelektričnega materiala ohrani stanje domen.

Meritve na istih vzorcih po depolarizaciji so dodane rezultatom meritev polariziranih vzorcev na sliki 1. Dielektrična konstanta materiala je po depolarizaciji 2950 in je neodvisna od prednapetosti  $U_{DC}$ . V primerjavi s polariziranimi vzorci brez pritisnjene enosmerne električnega polja je za 30 % manjša.

O razliki med karakteristikami polariziranih in nepolariziranih tankoplastnih piezoelektrikov poročajo tudi z univerze Dallas Texas [20]. Avtorji opazijo premik karakteristik  $\epsilon_r$  po napetostni osi takoj po polarizaciji materiala. Na podlagi značilnega premika vpeljejo metodo za merjenje učinkovitosti polarizacije piezoelektrikov. Večji ko je premik po napetostni osi, učinkovitejša je polarizacija. Tipična karakteristika dielektrične konstante nepolariziranih tankoplastnih piezoelektrikov je podobna konkavni osnosimetrični

funkciji s histerezo, polarizacija pa povzroči premik karakteristike v levo. Avtorji pojasnijo, da je polarizacija piezoelektričnih plasti sestavljena iz normalne feroelektrične polarizacije  $P$  in volumetrične porazdelitve poravnanih defektnih dipolnih kompresorjev  $V_{pb}^- - V_0^{++}$ . Pokažejo, da so takšni defektni dipoli lahko orientirani oz. stabilizirani pod vplivom zunanega električnega polja, kar povzroči vgrajena električna polja. Ta polja posledično povzročijo premik histerezne karakteristike po napetostni osi. Domnevajo, da je razlog za premik karakteristike njihovih vzorcev po polarizaciji stabilizacija defektnih dipolov v procesu polarizacije.

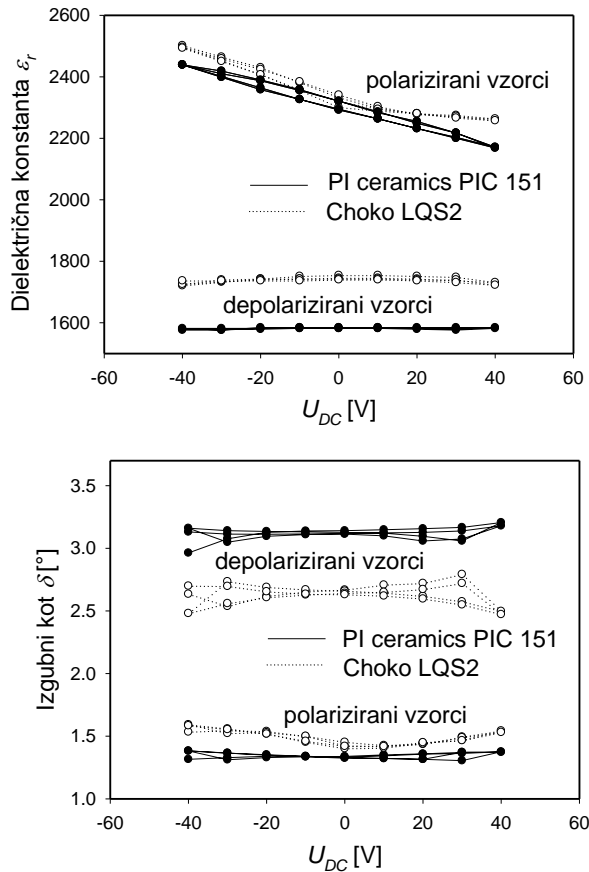
Izgubni kot po depolarizaciji je prikazan na sliki 1. Ta se s povečevanjem ali zmanjševanjem prednapetosti  $U_{DC}$  poveča za 8 % ne glede na smer polja. Ob menjavi smeri polja je opazno naglo zmanjšanje izgubnega kota, čemur sledi ponovni trend naraščanja.

Vzroka za povečanje izgub materiala po depolarizaciji ne poznamo, dopuščamo pa možnost, da bi lahko bil vzrok v samem segrevanju piezoelektričnega materiala med depolarizacijo in s tem spremembe v mikrostrukturi materiala. Podobno obliko karakteristike za debeloplastni nepolarizirani material najdemo v [21]. Avtorji jo opišejo kot »krivulja metulja« z dvema ekstremoma. Pojasnijo, da dielektrični materiali ne kažejo spremembe v impedanci zaradi pritisnjene napetosti, saj je kapacitivnost funkcija geometrijskih parametrov (debelina in površina dielektrika). V piezoelektričnih materialih pa sprememba enosmerne komponente pritisnjene napetosti povzroči spremembo v električni impedanci, volumnu materiala in posledično v kapacitivnosti. Natančnejše razlage za obliko karakteristike v obliki metulja ne podajo.

Da bi preverili verodostojnost meritev, smo identično karakterizacijo izvedli še za vzorca PIC 151 in LQS2. Izmerjena dielektrična konstanta in izgubni kot v odvisnosti od prednapetosti  $U_{DC}$  sta prikazana na sliki 2.

V primerjavi s piezoelektričnim aktuatorjem P-5H (slika 1) so poteki karakteristik  $\epsilon_r$  in  $\delta$  podobni. Polarizirani vzorci imajo tipično histerezo v karakteristiki dielektrične konstante. Ta je 3,4 % za P-5H, 1,7 % za LQS2 in 1,3 % za PIC 151. Stopnja histereze pri prehodu prednapetosti  $U_{DC}$  skozi nič je v korelaciji s piezoelektričnimi parametri  $d_{33}$  (650, 570 in 500). Prav tako je v korelaciji s piezoelektričnim parametrom  $d_{33}$  strmina karakteristik  $\epsilon_r$ , ki je -11,25 - 4,375 in -3,375 V<sup>-1</sup> za aktuatorje P-5H, LQS2 oziroma PIC 151. Karakteristika relativne dielektričnosti za aktuator LQS2 je podobna zlepku dveh linearnih funkcij s strminama -4.375 V<sup>-1</sup> za  $U_{DC} < 0$  V in -1.25 V<sup>-1</sup> za  $U_{DC} > 0$  V. Vzroka zmanjšanja strmine karakteristične krivulje pri pozitivni enosmerni komponenti električnega polja v aktuatorju ne poznamo. Po depolarizaciji je karakteristika dielektrične konstante podobna konstantni linearni funkciji, ki je značilna za nepiezoelektrične dielektrike. Vrednosti karakteristik izgubnega kota polariziranih vzorcev so ponovno v korelaciji s piezoelektrično konstanto  $d_{33}$ . Izgubni kot je

največji za piezoelektričen aktuator P-5H in najmanjši za PIC 151. Karakteristike izgubnega kota depolariziranih vzorcev so spet podobne krivulji metulja [21].



Slika 2: Izmerjena dielektrična konstanta  $\epsilon_r$  in izgubni kot  $\delta$  v odvisnosti od prednapetosti  $U_{DC}$  za polarizirane in depolarizirane vzorce PIC 151 in LQS2

#### 4 VPLIV NAPETOSTNE ASIMETRIJE VZBUJALNEGA SIGNALA NA DELOVANJE MIKROČRPALKE

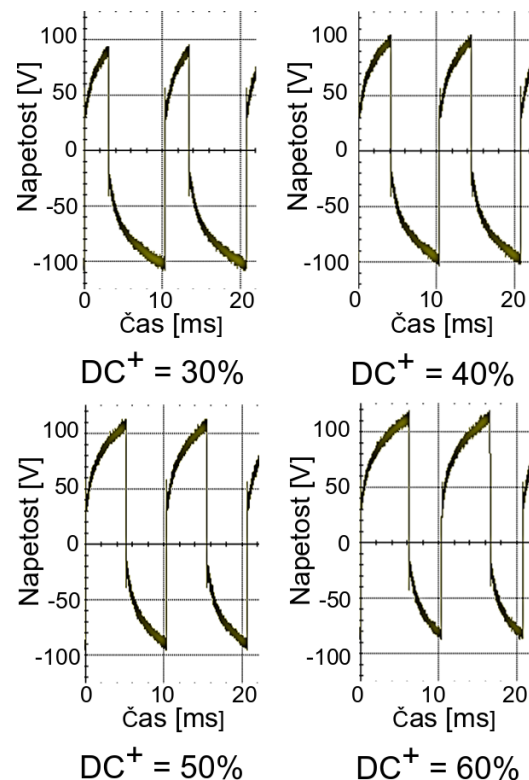
Pokazali smo, da priključitev polariziranega piezoelektričnega aktuatorja na krmilnik povzroči napetostno asimetrijo ustvarjenega signala, ni pa znano, kako napetostna asimetrija vpliva na delovanje črpalke. Da bi lahko raziskali vpliv asimetrije ustvarjenega signala na delovanje, smo morali ustvariti signale z različno napetostno asimetrijo.

Ker amplituda ustvarjenega signala ni odvisna le od bremena, temveč tudi od trajanja posamezne polperiode, se s podaljšanjem časa ene in krajšanjem časa druge polperiode amplituda signala v prvi polperiodi poveča, v drugi pa zmanjša. Povedano drugače, če ima prvi »boost« pretvornik na razpolago več časa kot drugi, bo na piezoelektričnem aktuatorju lahko zgradil višjo napetost. Časa ene in druge polperiode sta opredeljena z obratovalnim ciklom. Tega je zaradi prilagodljivosti

vgrajenega mikrokontrolerja mogoče poljubno spreminjati.

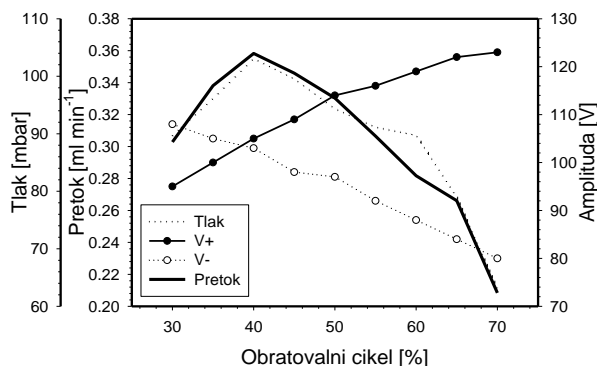
Izviren pristop z variacijo obratovalnega cikla nam je omogočil izvajanje pretočnih in tlačnih meritev elastomernih črpalk pri 9 V napajalne napetosti in 100 Hz frekvence vzbujanja ob prilagajanju obratovalnega cikla od 30–70 % in ustvarjanju vzbujalnih signalov z različno stopnjo asimetrije. Stopnjo asimetrije signala definiramo kot  $S_{ASIM} = V^+ - V^-$ .

Signal za reprezentativne štiri vrednosti obratovalnega cikla ( $DC^+ = 30\%$ ,  $40\%$ ,  $50\%$  in  $60\%$ ) in za čas trajanja dveh period je prikazan na sliki 3. Pri obratovalnem času  $DC^+ = 30\%$  je pozitivna amplituda  $V^+$  nižja od negativne amplitude kljub veliki strmini naraščanja signala v prvi polperiodi, saj ima prvi »boost« pretvornik za grajenje napetostnega nivoja na razpolago manj časa kot drugi. Pri obratovalnem ciklu  $DC^+ = 40\%$  je dosežena amplitudna simetrija ustvarjenega signala. Večja strmina naraščanja v primerjavi s strmino upadanja, ki je posledica polarizacije piezoelektričnega aktuatorja, je kompenzirana s krajšim časom prve polperiode, manjša strmina upadanja pa s podaljšanjem časa druge polperiode. Pri običajnem obratovalnem ciklu  $DC^+ = 50\%$  sta časa prve in druge polperiode izenačena. Amplituda pozitivne periode je 114V, negativne pa 96 V. Pri obratovalnem ciklu  $DC^+ = 60\%$  večja strmina naraščanja in daljši čas v prvi polperiodi povzroči še večjo razliko v amplitudah (120 V in -88 V).



Slika 3: Prikaz ustvarjenega vzbujalnega signala za štiri reprezentativne vrednosti obratovalnega cikla in čas trajanja 22 ms za piezoelektrični aktuator P-5H

Rezultati tlačnih in pretočnih meritev elastomerne mikročrpalke [22] pri 9 V napajalne napetosti in 100 Hz frekvence vzbujanja ob prilagajanju obratovalnega cikla od 30–70 % so prikazani na sliki 4.



Slika 4: Rezultati tlačnih in pretočnih meritev elastomerne mikročrpalke pri 9 V napajalne napetosti in 100 Hz frekvence vzbujanja ob prilagajanju obratovalnega cikla med 30 in 70 %

Pri posamezni nastavitvi obratovalnega cikla smo merili doseženi amplitudi obeh polperiod  $V^+$  in  $V^-$  vzbujalnega signala ter pretočno in tlačno zmogljivost pri črpanju vode. Pretok vode smo merili z gravimetrično metodo ( $Q = dm/dt \times \rho$ ) z laboratorijsko tehtnico Kern ABJ 120-4M. Tlak vode smo merili s kalibriranim diferencialnim tlačnim senzorjem (First Sensor AG, HCX005D6V) in digitalnim multimetrom Keithley 2700.

Z daljšanjem obratovalnega cikla  $DC^+$  napetost pozitivne polperiode raste, negativne pa pada. Karakteristiki sta podobni linearnima funkcijama z nasprotno enakima smernima koeficientoma  $+0.43 \text{ V}\%^{-1}$  in  $-0.43 \text{ V}\%^{-1}$ . Izkaže se, da sta pretočna in tlačna zmogljivost največji v obratovalnem ciklu izenačenja, ki je približno  $DC^+ = 40 \%$ . Takrat sta učinkovitosti sesalne in potisne faze izenačeni.

Z daljšanjem obratovalnega cikla  $DC^+$  nad 40 % se večja amplituda signala v potisni fazi mikročrpalke in manjša amplituda v sesalni fazi. Zanimivo je, da primerjalno večja vzbujalna amplituda v potisni fazi mikročrpalke ne zmore kompenzirati zmanjšanja amplitude v sesalni fazi in zmogljivost črpanja upade. Enak trend upada zmogljivosti je opazen pri krajšanju obratovalnega cikla  $DC^+$  pod 40 %. Večja vzbujalna amplituda v sesalni fazi mikročrpalke ne more kompenzirati zmanjšanja amplitude v potisni fazi in črpalna zmogljivost spet upade.

Pretočna in tlačna zmogljivost vode upadeta eksponentno s stopnjo asimetrije  $S_{ASIM}$ . Predvidevamo, da morata biti za optimalno delovanje mikročrpalke zmogljivosti sesalne in potisne faze uravnoteženi. Skupna zmogljivost črpalke je lahko le tolikšna, kot jo narekuje zmogljivost manj učinkovite faze. Eksponentno upadanje črpalne zmogljivosti v odvisnosti od stopnje asimetrije  $S_{ASIM}$  sovпада z eksponentno odvisnostjo črpalne zmogljivosti v odvisnosti od amplitude vzbujalnega signala [22]. Eksponentna

odvisnost je posledica aktivnih usmerjevalnih elementov (sekvenčno razpiranje in pripiranje izvaja piezoelektrični aktuator). Z manjšanjem amplitude vzbujanja se zaradi manjše deformacije membrane manjša delovni volumen črpalke, hkrati pa se manjša tudi učinkovitost aktivnih pripirnih elementov, kar se odraža v eksponentnem upadu zmogljivosti.

Pri črpalakah, ki imajo vgrajene pasivne ventile (sekvenčno odpiranje in zapiranje vrši pretok tekočine), je odvisnost tlačne in pretočne zmogljivosti linearna [23]. Z zmanjševanjem amplitude vzbujanja se manjša delovni volumen mikročrpalke, sama učinkovitost pasivnih ventilov pa se ne spremeni. Domnevamo, da bi pri mikročrpalakah z vgrajenimi pasivnimi ventili pretočna in tlačna zmogljivost upadali proporcionalno s stopnjo asimetrije signala  $S_{ASIM}$ .

Pokazali smo, da je pretočna in tlačna zmogljivost pri napetostno asimetričnem signalu omejena z manjšo amplitudo polperiode in da je največja zmogljivost mikročrpalke dosežena pri vzbujanju s simetričnim signalom. Vpliv asimetrije bi lahko kompenzirali s povečanjem negativne in pozitivne polperiode  $V^-$  in  $V^+$ , npr. s povečanjem napajalne napetosti krmilnika, vendar pa pri tem prekoračimo največjo dovoljeno električno poljsko jakost v piezoelektričnem aktuatorju, ki znaša za primer standardne sestave PZT-5H 490 V/mm [24].

Iz navedenega povzemamo, da je za napajanje testiranih mikročrpal najprimernejši napetostno simetrični vzbujalni signal in da je smiselno vpeljati metodo za zagotavljanje napetostne simetrije, s katero bomo zagotovili dolgoročno stabilno delovanje mikročrpal in doseganje visokih tlačnih in pretočnih zmogljivosti.

## 5 METODA ZA KOMPENZACIJO VPLIVA POLARIZIRANEGA PIEZOELEKTRIKA IN USTVARJANJE SIMETRIČNEGA SIGNALA

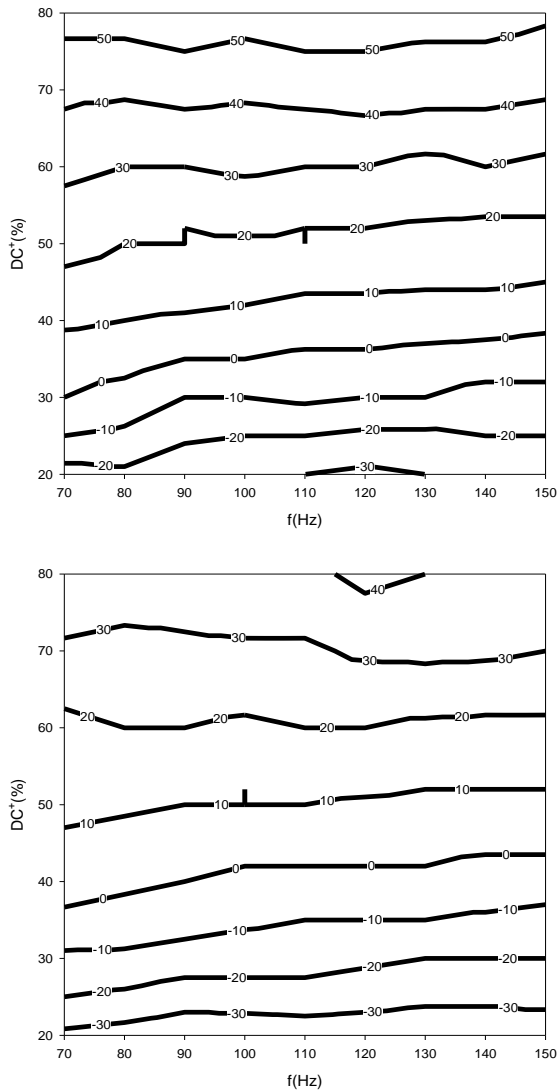
Za kompenzacijo vpliva polariziranega piezoelektričnega bremena in zagotavljanje napetostne simetrije ustvarjenega signala smo vpeljali metodo z natančnim nastavljanjem obratovalnega cikla za uravnoteženje krmilnega signala.

S podaljšanjem časa ene in krajšanjem časa druge polperiode lahko kljub polariziranemu piezoelektričnemu bremenu dosežemo napetostno simetričen signal. Učinkovitost pristopa smo demonstrirali na vzorcu P-5H.

Program za krmilni modul mikročrpalke smo spremenili tako, da smo lahko nastavljali 16 različnih razmerij signal/pavza pozitivnega dela krmilne polperiode od 20 do 80 % v frekvenčnem območju od 90 do 150 Hz s korakom po 10 Hz. Na viru enosmerne napetosti smo med meritvami spreminjali napajalno napetost krmilnega modula 9 in 10 V. Modul smo vsakič programirali na novo frekvenco vzbujanja

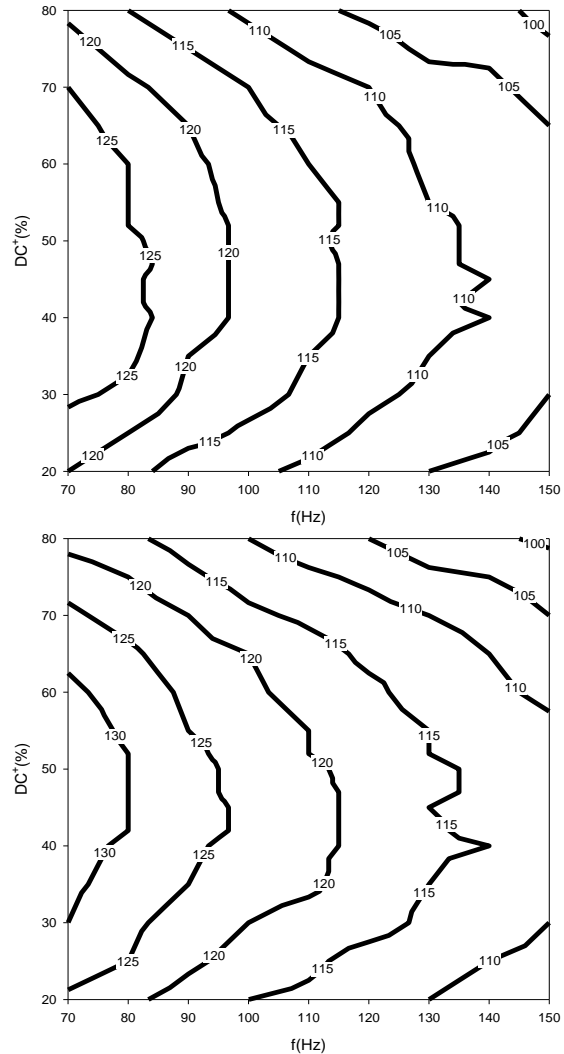
mikročrpalke in za vsako nastavitve obratovalnega cikla zapisali amplitudo pozitivnega dela krmilne polperiode  $V_+$ , negativnega dela krmilne polperiode  $V_-$  ter porabo toka  $I_{CC}$  modula.

Slika 5 prikazuje napetost uravnoteženja (oz. offset) v odvisnosti od napajalne napetosti in obratovalnega razmerja pri različnih frekvencah na intervalu od 70 do 150 Hz. Zanimivo je, da se napajalni napetosti 9 V območje razmerja signal/pavza giblje med 30 in 38 %, medtem ko se pri napajalni napetosti 10 V ta obratovalni cikel premakne na območje med 40 in 43 %.



Slika 5: Uravnoteženje krmilne napetosti v odvisnosti od delovne frekvence in razmerja signal/pavza pri napajalni napetosti 9 V (zgoraj) in 10 V (spodaj)

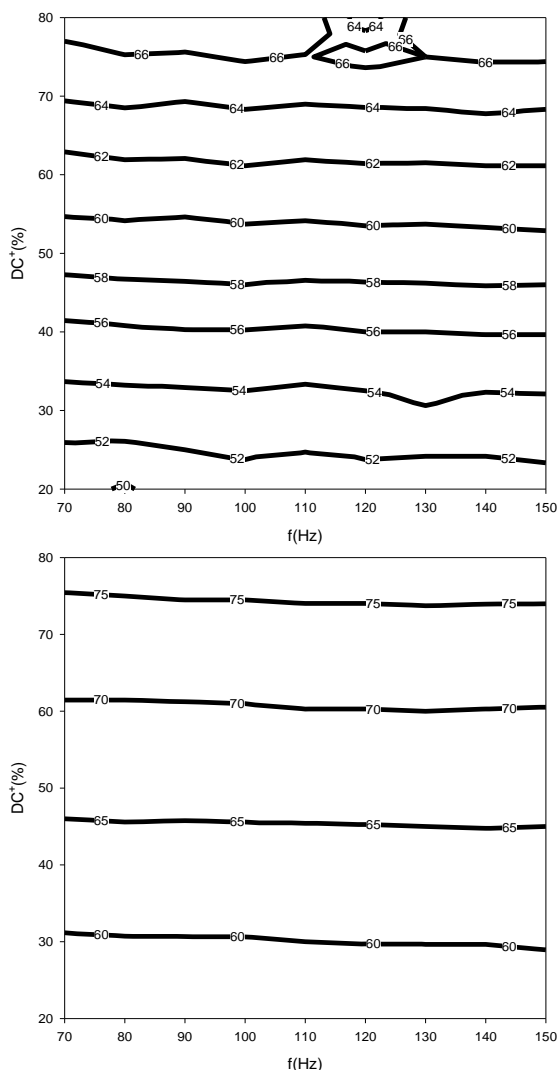
Iz zgornjega sledi, da je mogoče uravnoteženje napetosti doseči glede na znano napajalno napetost po izdelani tabeli, ki določa obratovalni cikel in razmerje signal/pavza.



Slika 6: Amplituda krmilne napetosti v odvisnosti od delovne frekvence in razmerja signal/pavza pri napajalni napetosti 9 V (zgoraj) in 10 V (spodaj)

Slika 6 prikazuje amplitudo krmilne napetosti mikročrpalke v odvisnosti od napajalne napetosti in obratovalnega cikla pri različnih frekvencah na intervalu 70 do 150 Hz. Iz slike 6 sledi, da maksimalno amplitudo piezoelektrika (120 do 130 V) dosežemo samo v intervalu do 100 Hz (krivulji 125 in 120 na sliki 6, zgoraj), medtem ko se ta meja pri višji napajalni napetosti (10 V) premakne do 110 Hz (krivulje 130, 125 in 120 na sliki 6, spodaj). Višja frekvenca (10%) vpliva na tlačne in pretočne zmogljivosti mikročrpalke.

Slika 7 prikazuje porabo toka krmilnega modula v odvisnosti od napajalne napetosti in obratovalnega cikla pri različnih frekvencah na intervalu od 70 do 150 Hz. Iz slike 7 sledi, da poraba niti ni odvisna od delovne frekvence, kar potrjuje tudi teorija stikalnih napajalnikov, temveč predvsem od razmerja obratovalnega cikla signal/pavza.



Slika 7: Poraba toka v mA v odvisnosti od delovne frekvence in razmerja signal/pavza pri napajalni napetosti 9 V (zgoraj) in 10 V (spodaj)

Zgornja meja razmerja signal/ pavza, ki zagotavlja porabo pod 70 mA, se pri napajalni napetosti 9 V nahaja pri 75 %, medtem ko se pri napajalni napetosti 10 V zmanjša na 62 %.

## 6 SKLEP

Za cenovno ugodno izvedbo krmilnika je primerna topologija z dvema medsebojno izključujočima se SMPS »boost« napajalnima pretvornikoma, ki pa zaradi spremenljive impedance piezoelektričnega bremena ustvarjata napetostno asimetrični krmilni signal. Z ekstrapolacijo impedančnih meritev smo ocenili, da se pri vzbujanju mikročrpalke s predlaganim krmilnikom kapacitivnost aktuatorja v drugi polperiodi zmanjša za 25 %, kar je v korelaciji z asimetrijo ustvarjenega signala. Da bi raziskali vzrok asimetrije, smo izvedli impedančne meritve aktuatorjev treh izdelovalcev.

Pokazali smo, da je stopnja histereze in strmina karakteristik  $\epsilon_r$  pri prehodu prednapetosti  $U_{DC}$  skozi nič v korelaciji s piezoelektričnimi parametri  $d_{33}$ .

Na podlagi primerjave meritev polariziranih in depolariziranih piezoelektričnih aktuatorjev smo ugotovili, da je napetostna asimetrija posledica polarizacije piezoelektričnega aktuatorja. Primerjava rezultatov meritev takoj in 24 h po depolarizaciji kaže na to, da je depolarizacija zaključen proces, ki ob ohlajanju piezoelektričnega materiala ohrani stanje domen.

Da bi raziskali vpliv asimetrije ustvarjenega signala na delovanje mikročrpalke, smo s spreminjanjem obratovalnega cikla ustvarili signale z različno stopnjo napetostne asimetrije. Izkazalo se je, da sta tlačna in pretočna zmogljivost mikročrpalke največji v obratovalnem ciklu izenačenja  $DC^+ = 40\%$  ob vzbujanju z napetostno simetričnim signalom frekvence 100 Hz in napajalno napetostjo 9 V.

Za kompenzacijo vpliva polariziranega piezoelektričnega bremena in zagotavljanje napetostne simetrije smo uspešno vpeljali metodo z natančnim nastavljanjem obratovalnega cikla za uravnoteženje krmilnega signala.

Pri napajalni napetosti 9 V se razmerje obratovalnega cikla signal/pavza giblje med 30 in 38 %, medtem ko se pri napajalni napetosti 10 V to razmerje premakne v območje med 40 in 43 %.

## ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Slovenski agenciji za raziskovalno dejavnost / ARRS (Grant No P2-0244), Ministrstvu za izobraževanje, znanost, kulturo in šport in industrijskemu partnerju Kolektor Group, d.o.o., za podporo predstavljenemu delu.

## LITERATURA

- [1] Santiago, J. G., & Laser, D. J. (2004). A review of micropumps. *J. Micromech. Microeng.*, 14, R35-R64.
- [2] Woias, P. (2005). Micropumps—past, progress and future prospects. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 105(1), 28–38.
- [3] Jeong, O. C., & Konishi, S. (2005, November). Fabrication of all PDMS micro pump. In *IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2005* (pp. 139–143). IEEE.
- [4] Guan, Y., Ren, J., Zhang, G., & Cheng, Z. (2009, November). Fabrication and experiment studies of the piezoelectric micropump with saw-tooth microchannel. In *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems* (Vol. 2, pp. 733–737). IEEE.
- [5] Guan, Y. F., Shen, M. G., & Han, L. L. (2012). Simulations and experiment analysis of a piezoelectric micropump. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 229, pp. 1688–1692). Trans Tech Publications.
- [6] Možek, M., in drugi. Low-power piezoelectric micropump driving module. Conference proceedings 2017, 53rd International Conference MIDEM. October 4 - October 6, 2017, Ljubljana, Slovenia.



[7] Thomas Baumann, Eckart Hoene, "Highly Miniaturized Piezoactor Drive", Fraunhofer-Institut IZM. <http://www.powerguru.org/highly-miniaturized-piezoactor-drive/>, 7.8.2019.

[8] <http://sunnytec-piezo.com>.

[9] Yu, S., Li, L., Zhang, W., Sun, Z., & Dong, H. (2015). Multilayer thin films with compositional  $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3/\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{1.0}\text{Nb}_{1.5}\text{O}_7$  layers for tunable applications. *Scientific reports*, 5, 10173.

[10] Trithaveesak, O., Schubert, J., & Buchal, C. (2005). Ferroelectric properties of epitaxial  $\text{BaTiO}_3$  thin films and heterostructures on different substrates. *Journal of applied Physics*, 98(11), 114101.

[11] Maruno, S., Kuroiwa, T., Mikami, N., Sato, K., Ohmura, S., Kaida, M., ... & Koshikawa, T. (1998). Model of leakage characteristics of  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$  thin films. *Applied physics letters*, 73(7), 954–956.

[12] Cillessen, J. F. M., Prins, M. W. J., & Wolf, R. M. (1997). Thickness dependence of the switching voltage in all-oxide ferroelectric thin-film capacitors prepared by pulsed laser deposition. *Journal of Applied Physics*, 81(6), 2777–2783.

[13] Chae, B. G., Park, C. H., Yang, Y. S., & Jang, M. S. (1999). Asymmetry in fatigue and recovery in ferroelectric  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  thin-film capacitors. *Applied physics letters*, 75(14), 2135–2137.

[14] Kamenshchikov, M. V., Solnyshkin, A. V., & Pronin, I. P. (2017). Peculiarities of CV characteristics of PZT films depending on annealing temperature. *Ferroelectrics*, 508(1), 108–114.

[15] <https://www.piceramic.com>.

[16] <https://www.choko.asia/>.

[17] Gallego-Juarez, J. A. (1989). Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 22(10), 804.

[18] Kranjec, A. (2009). Feroelektriki. Izbrana poglavja iz uporabne fizike. Fakulteta za matematiko in fiziko, 1–17.

[19] Newcomb, C. V., & Flinn, I. (1982). Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators. *Electronics Letters*, 18(11), 442–444.

[20] Fuentes-Fernandez, E. M., Gnade, B. E., Quevedo-Lopez, M. A., Shah, P., & Alshareef, H. N. (2015). The effect of poling conditions on the performance of piezoelectric energy harvesters fabricated by wet chemistry. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(18), 9837–9842.

[21] Hoshyarmanesh, H., Ebrahimi, N., Jafari, A., Hoshyarmanesh, P., Kim, M., & Park, H. H. (2019). PZT/PZT and PZT/BiT Composite Piezo-Sensors in Aerospace SHM Applications: Photochemical Metal Organic Infiltration Deposition and Characterization. *Sensors*, 19(1), 13.

[22] Dolžan, T., Pečar, B., Možek, M., Resnik, D., & Vrtačnik, D. (2015). Self-priming bubble tolerant microcylinder pump. *Sensors and Actuators A: Physical*, 233, 548–556.

[23] <http://www.bartels-mikrotechnik.de>.

[24] Ranjan, G. (2017). Smart Helicopter Rotors: Optimization and Piezoelectric Vibration Control. Springer.

**Borut Pečar** je diplomiral leta 2008 in doktoriral leta 2013 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje zaobsega MEMS strukture v povezavi z mikrofluidiko in FEM numeričnim modeliranjem.

**Matej Možek** je diplomiral leta 1998, magistriral leta 2001 in doktoriral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Področje njegovega zanimanja obsega umerjanje senzorjev, programiranje in elektroniko.

**Danilo Vrtačnik** je diplomiral leta 1981, magistriral leta 1994 in doktoriral leta 2000 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Od leta 2014 je vodja laboratorija za Mikrosenzorske strukture in elektroniko (LMSE). Področje njegovega zanimanja so polprevodniške tehnologije, senzorji in aktuatorji in MEMS.