

Energijsko varčni krmilni modul piezoelektričnih mikročrpalk

Matej Možek, Borut Pečar, Drago Resnik in Danilo Vrtačnik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za mikrosenzorske strukture in elektroniko (LMSE), Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: matej.mozek@fe.uni-lj.si

Povzetek. Piezoelektrične mikročrpalke se pogosto uporabljajo v naprednih mikrofluidnih aplikacijah, kjer je potreben natančen nadzor tlaka, pretoka in drugih procesnih parametrov. V aplikacijah, kjer so potrebni majhni pretoki (reda $\mu\text{l}/\text{min}$), sta pogosto najprimernejša rešitev uporabljenih sistemov njihova majhnost in majhna poraba energije. Za optimiziranje pretoka mikročrpalk in izboljšanje izhodne tlačne karakteristike moramo krmilni signal piezoelektričnega aktuatorja prilagoditi posebnostim uporabe, pri čemer izbiramo ustrezno amplitudo in frekvenco krmilnega signala. Za določitev odvisnosti pretoka in izhodnega tlaka od različnih parametrov krmilnega signala je bil zasnovan, izdelan in izmerjen nizkocenovni, miniaturni visokonapetostni krmilni modul piezoelektričnih mikročrpalk. Izvedeni krmilnik odlikujeta nizka poraba energije (tipično 55 mA @ 12 V) in doseg amplitude do 250 V_{PP} na frekvenčnem območju do 400 Hz.

Gljučne besede: piezoelektrična mikročrpalka, krmilni modul, energijsko varčni napajalnik

Low-power Piezoelectric Micropump Driving Module

Piezoelectric micropumps are often used in advanced microfluidic applications where an accurate pressure, flow control and monitoring are required. In applications where a small flow ($\mu\text{l}/\text{min}$ range) is needed, they often represent the most appropriate solution due to their small size and low power consumption. In order to maximize the micropump flow-rate and backpressure performance, the piezoelectric actuator driving signal has to be adapted for a specific application, where appropriate signal amplitude and frequency have to be determined. To investigate the dependence of the flow-rate and backpressure on various driving signal parameters, a low-cost, miniature high-voltage piezoelectric micropump driving module is designed, fabricated and characterized. Implemented driver features low power consumption (max. 55 mA @ 12 V) and can achieve amplitudes of up to 250 V_{PP} in the 400 Hz frequency range.

Keywords: piezoelectric micropump, driving module, high voltage, low power

1 UVOD

Sodobne mikrofluidne aplikacije gredo v smeri miniaturizacije in zmanjšanja porabe energije. Posledično so napetosti digitalnega sistema znižane na danes najpogosteje uporabljeno raven 3 V in nižje. Po drugi strani pa potrebujejo piezoelektrične mikročrpalke za normalno delovanje visokonapetostni signal z vršno vrednostjo nekaj sto voltov. Krmilni signal mikročrpalk je odvisen od konstrukcije in zahtevane zmogljivosti določene mikročrpalke. Zato je miniaturni krmilnik

piezoelektričnih mikročrpalk z majhno porabo zanimiv načrtovalski izziv.

Poleg tega, da je krmilnik sposoben sinteze signala visokih napetosti, mora krmilnik piezoelektričnih mikročrpalk omogočati prilagoditev oblike, amplitude in frekvence krmilnega signala. Za visok izkoristek mikrofluidnega sistema moramo našteje parametre optimizirati glede na tip piezokeramičnega aktuatorja.

Razpoložljivi krmilniki so pogosto fizično veliki in zato omejeni predvsem na laboratorijsko uporabo [1] ali pa so optimizirani za krmiljenje določene vrste piezoelektrične mikročrpalke [2]. Poleg tega razpoložljivi krmilniki ponujajo le omejeno prilagodljivost oblike signala. V preteklih aktivnostih laboratorija smo razvili modul za sintezo visokonapetostnega signala [3]. Ta modul za pripravo signalov ponuja zelo dobro prilagodljivost signala, vendar ni optimiziran s stališča velikosti.

Z uporabo piezo haptičnega gonilnika DRV2667 smo izdelali tudi miniaturni visokonapetostni krmilnik piezoelektričnih mikročrpalk [4]. Ta izvedba je vsebovala popolnoma programabilno obliko signala, frekvenco in amplitudo, vendar je bila omejena z vršno vrednostjo krmilnega signala na 200 V_{PP}, pri čemer je poraba znašala 134 mA. Omenjene omejitve referenčnih gonilnikov so spodbudile razvoj preprostejšega in stroškovno učinkovitejšega elektronskega modula krmilnika piezoelektričnih mikročrpalk, ki bi bil omejen na pravokotni krmilni signal, vendar bi omogočal vzbujanje z višjimi napetostmi in obenem ohranil nizko porabo (porabo reda nekaj deset mA). Ena možnost

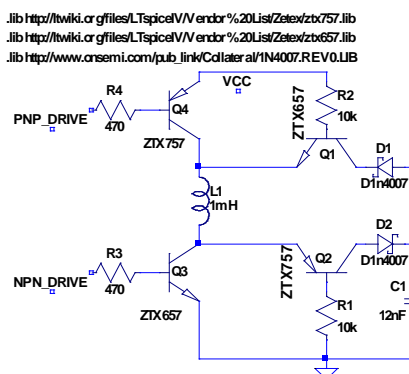
izvedbe vključuje zasnovo krmilnika z ločenim virom visoke napetosti. Krmilni signal nato tvorimo s pomočjo H-mostiča. Tovrstna izvedba zaradi kompleksnosti nikdar ni pomenila stroškovno učinkovite rešitve. Poleg tega sta pri polnem H-mostiču krmiljeni obe elektrodi, kar z vidika varnosti uporabnika ni zaželeno. Nizkocenovna izvedba krmilnika je rešitev brez transformatorjev, ki jo je predlagal in patentiral Fraunhofer IZM [5]. Ideja temelji na dveh medsebojno izključujočih se pretvornikih SMPS boost, ki izkoriščata svinčev cirkonijev titanat (PZT) aktuator mikročrpalke kot izhodni kondenzator SMPS. Ker ni izhodnega gladilnega kondenzatorja, nastane miniaturna, digitalno krmiljena različica krmilnega modula piezoelektričnih mikročrpalk. Modul, razvit za pripravo signala, ponuja sintezo standardnega pravokotnega krmilnega signala, ki spominja na RC polnjenje/praznjenje skozi PZT-aktuator piezoelektrične mikročrpalke.

Nastali pravokotni krmilni signal mikročrpalke je sicer daleč od idealnega pravokotnega signala, a vendar lahko učinkovitost takšnega vezja štejemo kot ustrezno za določene aplikacije, ki so občutljive glede stroškov in velikosti. Namen prispevka je oceniti primernost te zasnove za mikročrpalke, razvite v našem laboratoriju [7].

2 OPIS DELOVANJA KRMILNEGA MODULA

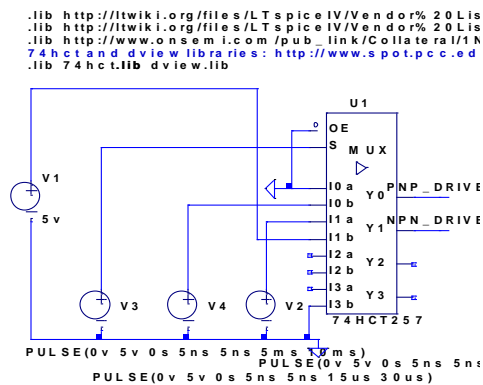
Visokonapetostni del analiziranega vezja je zasnovan okoli dveh boost napajalnikov SMPS, prikazanih na sliki 1, ki zagotavljata ustrezna pozitivno in negativno polperiodo krmilne napetosti mikročrpalke z izmeničnim vklapljanjem/izklapljanjem. SMPS-vezje za pozitivno polperiodo krmilne napetosti vsebuje preklonni tranzistor Q_3 in diodo D_2 , medtem ko SMPS za negativno polperiodo obsega preklonni tranzistor Q_4 in diodo D_1 . Izhodni kondenzator C_1 v obeh vezjih predstavlja kapacitivnost PZT aktuatorja mikročrpalke. Induktivnost L_1 je prav tako skupna obema boost pretvornikoma. Medtem ko krmilnik ustvarja negativno polperiodo krmilne napetosti na mikročrpalki C_1 , je tranzistor Q_3 popolnoma odprt (njegova baza je prek R_3 vezana na V_{CC}) in Q_4 z diodo D_1 izvede pulzno širinsko modulacijo PWM (ang. pulse-width modulation). Za pozitivno polperiodo krmilne napetosti sta vlogi Q_3 in Q_4 zamenjani: Q_4 je popolnoma odprt (njegova baza je prek R_4 vezana na GND) in Q_3 z diodo D_2 izvede PWM-preklop. Tranzistorja Q_1 in Q_2 v orientaciji skupne baze zagotavljata izolacijo med polperiodama in preprečujeta praznjenje kapacitivnosti PZT-aktuatorja mikročrpalke C_1 prek neaktivnega (tj. popolnoma odprtega) tranzistorja. Ob preklopu pozitivne napetosti je Q_4 popolnoma odprt – izhodna kolektorsko-emitorska napetost se zmanjša na vrednost nasičenja, zato ostaja izolacijski tranzistor Q_1 zaprt, kar učinkovito preprečuje povratni tok skozi diodo D_1 . Podobno razmišljanje

lahko uporabimo za par tranzistorjev Q_2 , Q_3 in diodo D_2 med negativno polperiodo krmilne napetosti.



Slika 1: Visokonapetostni del krmilnika

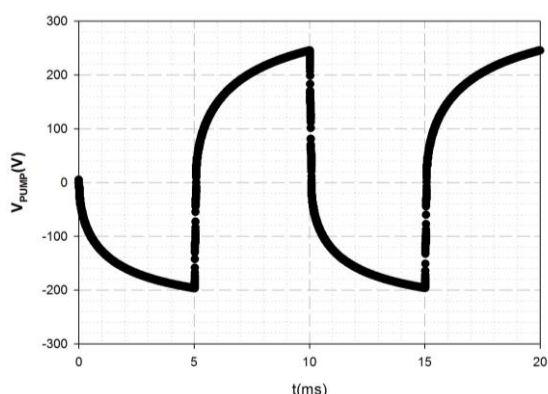
Za tvorbo izmeničnega pravokotnega krmilnega signala mikročrpalke moramo pozitivnega in negativnega boost pretvornika preklapljati v opisanem zaporedju, kar dosežemo s krmiljenjem signalov PNP_DRIVE in NPN_DRIVE na sliki 1. V začetni fazi smo izvedli poenostavljeno tvorbo krmilnih signalov, da bi ocenili optimalno frekvenčno območje PWM in ugotovili potrebo po PWM-pogonu. Nastalo krmilno vezje, prikazano na sliki 2, je temeljilo na 4-kanalnem 2/1 izbiralniku (ang. multiplexer) TTL 74HC257 za 5-voltno napajalno različico ali CMOS (40257) za 12-voltno različico. Vezje izbiralnika napaja vir V_1 . Vsak izbiralnik 2/1 ima podatkovna vhoda a in b, skupni izbirni vhod s ter pripadajoči izhod Y. Na sliki 2 smo uporabili samo prva dva izbiralnika, indeksirana 0 in 1. Visokofrekvenčno pulzno-širinsko modulacijo smo izvedli z dvema viroma izmenične napetosti V_2 in V_4 . Nizkofrekvenčni signal krmiljenja mikročrpalke zagotavlja vir V_3 , ki je priključen na izbirni vhod za izbiralnika. Hitrost preklapljanja izbirnega vhoda ustreza medsebojnemu izključevanju boost pretvornikov, kar določa frekvenco vzbujanja PZT-aktuatorja mikročrpalke.



Slika 2: Vzbujevalni del krmilnika

3 SIMULACIJE DELOVANJA KRMILNEGA MODULA

Začetne simulacije opisanega vezja smo izvedli v LTSpice IV [6]. V predstavljenem primeru je bila izmerjena kapacitivnost PZT-aktuatorja mikročrpalke $C_1 = 12 \text{ nF}$ [7], frekvenca mikročrpalke vzbujanja pa je bila nastavljena na 100 Hz z delovnim razmerjem signal/pavza 50 %. Simulirali smo prelet visoke PWM preklopne frekvence v območju od 10 kHz do 33 kHz in beležili doseženo vršno vrednost krmilne napetosti mikročrpalke. Potek napetosti na mikročrpalci pri 100 Hz je prikazan na sliki 3.

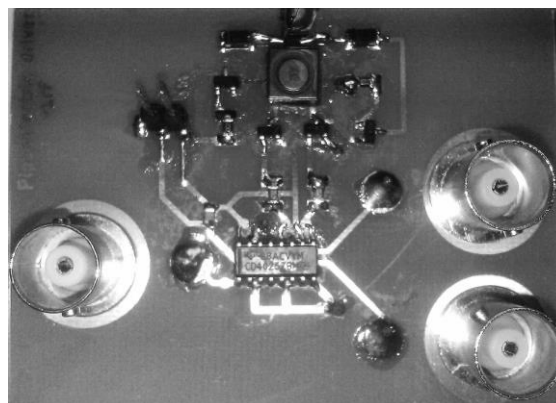


Slika 3: Rezultat simulacije izhodne napetosti krmilnega modula

Začetne simulacije so pokazale, da je za izhodno napetost, ki je prikazana na sliki 3, značilna asimetrija pozitivnih in negativnih amplitud polkrožnega cikla, ki znašajo tipično 50 V. Nastalo neuravnoteženje pomeni DC napetost, ki sčasoma poslabša upogib PZT-aktuatorja in tako preprečuje optimalno delovanje mikročrpalke. Izkazalo se je, da bo morala končna izvedba krmilnika mikročrpalke nastavljeni delovni razmerje med pozitivno in negativno polperiodo krmilne napetosti mikročrpalke. Analizirano visokonapetostno vezje, prikazano na sliki 1, takšne sposobnosti nima, vendar pa smo zaradi enostavnosti topologije visokonapetostnega vezja naprej raziskali možnost nastavitve amplitude posamezne polperiode. Nastalo razliko med pozitivno in negativno napetostjo vzbujanja lahko grobo prilagodimo z različnimi osnovnimi upori R_3 in R_4 , fino pa s povratno vezavo, s katero merimo vršno vrednost posameznega cikla krmilne napetosti.

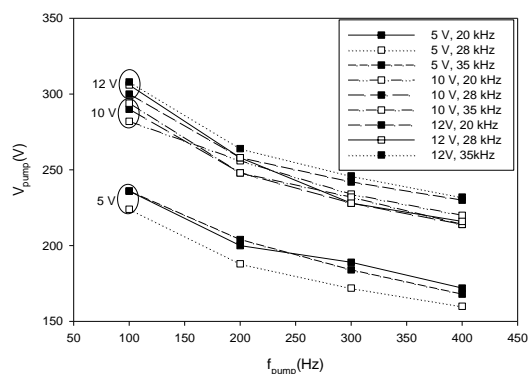
4 ZAČETNI PROTOTIP KRMILNEGA MODULA

Za vrednotenje simuliranega vezja in izbiranje ustreznih preklopnih tranzistorjev smo zasnovali in izdelali začetni prototip velikega formata, zasnovanega s klasičnimi elementi, prikazan na sliki 4.



Slika 4: Prototip krmilnega vezja velikega formata

Stikalni tranzistorji, ki smo jih uporabili med simulacijami (ZTX657/757), žal niso na voljo v ohišju za površinsko montažo (ang. surface mount), zato smo med preizkušanjem delovanja uporabili nadomestne visokonapetostne bipolarne tranzistorje FM458/FM458. V nadaljevanju smo preizkusili tudi para tranzistorjev PBHV9040 / PBHV8540, s katerima smo dosegli boljše uparjanje in posledično manjše neuravnoteženje med doseženima amplitudama pozitivne in negativne polperiode. Začetni prototip smo krmilili s tremi funkcijskimi generatorji poljubne oblike signala Agilent 33120B, izhodni krmilni signal smo opazovali z osciloskopom Siglent SDS1102X. Prvi funkcijski generator je zagotavljal delovno frekvenco mikročrpalke, tako da smo ga priključili na izbirni signal s (vir V_3 na sliki 2). Preostala funkcijska generatorja sta zagotavljala visokofrekvenčni signal PWM za vzbujanje ustreznega tranzistorja Q_3/Q_4 (vira V_2 in V_4 na sliki 2). Delovno frekvenco mikročrpalke smo spreminjali v območju od 100 Hz do 400 Hz v korakih po 100 Hz. Pri vsaki delovni frekvenci mikročrpalke smo spreminjali visoko frekvenco PWM-signalov in obratovalni cikel PWM-signalov, pri kateri smo dosegli maksimalno izhodno napetost, ki obenem zagotavlja minimalno razliko vršne vrednosti negativne in pozitivne polperiode. Po končanem preletu delovnih frekvenc mikročrpalke smo spreminjali še napajalno napetost (5 V, 10 V in 12 V) krmilnega modula.



Slika 5: Frekvenčni prelet začetnega prototipa krmilnega modula

Rezultati meritev amplitude in vzbujalne frekvence mikročrpalke so predstavljeni na sliki 5. Vrednosti amplitude so bile v mejah simuliranih vrednosti, zlasti v zgornjem frekvenčnem območju (tj. 400 Hz), kjer so bile amplitude do $240 V_{pp}$ dosežene z napajalno napetostjo 12 V. Poleg tega so na sliki 5 prikazane meje uporabe glede na napajalno napetost in visoko preklopno frekvenco za mikročrpalke, izdelane v našem laboratoriju.

Obratovalni razmerji PWM-tranzistorjev Q_3 in Q_4 , ustrezno imenovani D_{Q4} in D_{Q3} , ki zagotavljata maksimalne vrednosti amplitude mikročrpalke na sliki 5, sta povzeti v tabelah 1 in 2. Vrednosti se nanašata na aktivni del delovnega cikla, kjer je določen tranzistor odprt (npr. NPN_DRIVE nastavljen na V_{CC} , PNP_DRIVE nastavljen na GND).

Tabela 1: Razmerje signal/pavza PWM (%) za tranzistorja Q_3/Q_4 @ $V_{CC}=5 V$

f _{PWM}	20 kHz		28 kHz		35 kHz	
f(Hz)	D _{Q4}	D _{Q3}	D _{Q4}	D _{Q3}	D _{Q4}	D _{Q3}
100	41%	58%	23%	73%	34%	51%
200	40%	62%	26%	73%	41%	56%
300	39%	62%	29%	73%	37%	59%
400	42%	69%	32%	73%	33%	63%

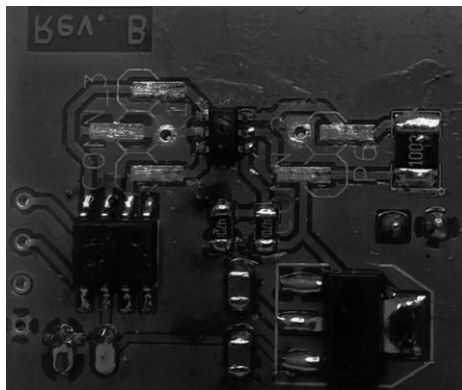
Tabela 2: Razmerje signal/pavza PWM (%) za tranzistorja Q_3/Q_4 @ $V_{CC}=12 V$

f _{PWM}	20 kHz		28 kHz		35 kHz	
f(Hz)	D _{Q4}	D _{Q3}	D _{Q4}	D _{Q3}	D _{Q4}	D _{Q3}
100	9%	93%	8%	93%	9%	91%
200	9%	94%	10%	94%	9%	93%
300	9%	94%	11%	95%	7%	93%
400	6%	94%	10%	95%	7%	93%

5 OPTIMIZIRANJE DELOVANJA KRMILNEGA MODULA

Iz začetnih meritev prototipa, predstavljenih na sliki 5, smo izluščili zahtevnost izvedbe krmilnih signalov tranzistorjev Q_3 in Q_4 : Čeprav se delovanje vezja na sliki 1 zdi preprosto, potrebuje dokaj zapleteno vzbujanje. Učinkovito izenačenje vršnih napetosti pozitivne in negativne amplitude polperiode smo zaradi znižanja cene poskušali izvesti z enim PWM-generatorjem s preklopno frekvenco pribl. 30 kHz z vsaj 7-bitno ločljivostjo PWM. Da bi čim bolj zmanjšali neuravnoteženje vršnih napetosti krmilnega signala, moramo nadzorovati izhodno napetost mikročrpalke in ustrezno prilagoditi trajanje zgornje in spodnje polperiode krmilnega signala. Predstavljena izvedba v velikosti 26 x 28 mm vključuje 8-bitni mikrokrmilnik, ATMEL Tiny 10 v 6-pinskem SOT-23 ohišju [8], kot je prikazano na sliki 6. Obseg delovanja napajalnega modula smo razširili na 18 V z uporabo neinvertirajočega, 2-kanalnega MOSFET gonilnika TC4427, ki obenem deluje tudi kot pretvornik napetostnih nivojev za krmilna signala NPN_DRIVE in

PNP_DRIVE (glej sliko 1). Vhoda gonilnika TC4427 sta združljiva s 5 V TTL preklopnimi nivoji, zato lahko mikrokrmilnik deluje pri 3,3 V, s čimer se minimalna poraba energije ohranja. Napajalno napetost 3,3 V mikrokrmilnika smo izvedli s pomočjo vezja LM1117-3.3.



Slika 6: Miniaturna izvedenka krmilnika na osnovi ATTiny10

Izbrani mikrokrmilnik ima eno 8-bitno PWM enoto, ki jo je mogoče nastavljati v "hitrem" (fazno neusklajenem) načinu z dvema izhodnima primerjalnima registroma (OC0A / OC0B). Prekinitev se lahko sproži ob primerjavi izhoda z ustreznim registrom (OC0A / OC0B). Vsak PWM-kanal preklaplja med stikalom (PWM) in neaktivnim (popolnoma odprtim) stanjem. Preklapljanje med obema stanjema, ki je bilo v diskretni izvedbi izvedeno z izbiralnikom '257, smo izvedli s preklapljanjem ustreznega načina priključka iz stanja PWM (to je način OC0x) v normalno vhodno/izhodno stanje (način PORTB I/O).

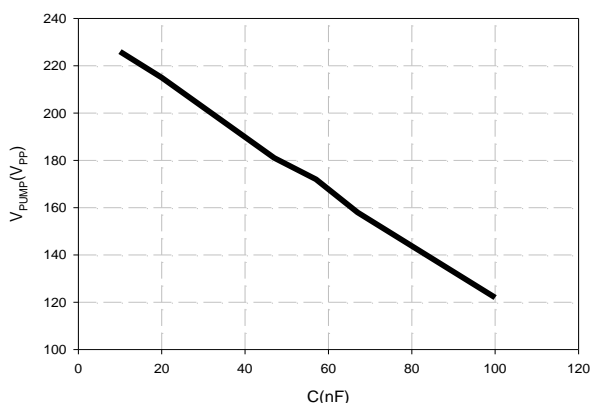
Notranji oscilator mikrokrmilnika moramo nastaviti na 8 MHz, da dosežemo območje stikalnih frekvenc PWM-modula 30 kHz z 8-bitno ločljivostjo. Z uporabo 8 MHz notranjega signala ure brez prednastavitve na časovniku TMR0 nastane PWM-generator, ki deluje na 31,25 kHz z 8-bitno ločljivostjo.

Frekvenco delovanja mikročrpalke smo določili s štejetem prelivov časovnika TMR0. Ker število prelivov doseže vnaprej določeno vrednost, se vlogi vzbujanja tranzistorjev Q_3/Q_4 obrneta s preklopom načina PWM-priključka in ponastavitvijo števca prelivov (ang. counter overflow). Opisani program se v celoti izvaja v prekinitvenih rutinah.

Za kompenzacijo variacij napajalne napetosti ima mikrokrmilnik tudi analogno-digitalni (A/D) pretvornik, ki ga lahko uporabimo za merjenje napajalne napetosti modula. Odčitek A/D-pretvornika določa spremembo frekvence PWM-generatorja in obeh delovnih razmerij glede na zalogo vrednosti, ki so bile vnaprej določene v tabelah 1 in 2. V tabelah je zajeto tudi zaznavanje previsoke napajalne napetosti – takrat modul izključi krmilna vhoda tranzistorjev Q_3 in Q_4 . Predstavljeni pristop izvaja krmiljenje z odprto zanko, ki prilagodi vrednost obratovnega cikla glede na napetost napajanja.

6 REZULTATI

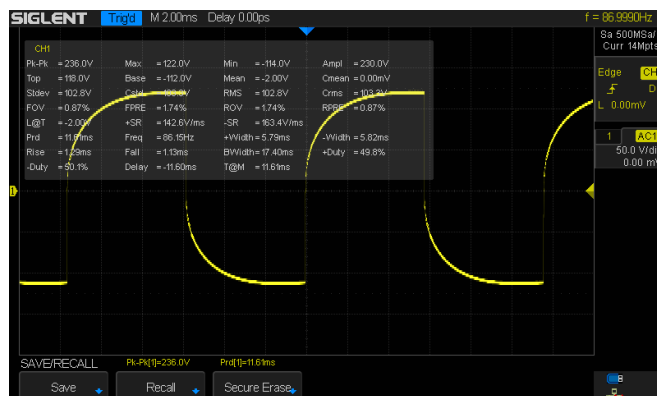
Na miniaturi izvedenki modula, prikazani na sliki 6, smo izmerili porabo energije in natančnost izhodnega signala z različnimi kapacitivnimi obremenitvami na izhodu. Za meritev toka smo uporabili multimeter HP33401 na napajalnem priključku, za merjenje izhodnega signala pa smo uporabili osciloskop. Za spreminjanje kapacitivnosti izhodne obremenitve so bili uporabljeni visokonapetostni nastavljivi kondenzatorji z vrednostmi od 10 nF do 100 nF s korakom 10 nF in več piezoelektričnih mikročrpalk vzporedno. Nastavili smo stalno delovno frekvenco mikročrpalke 190 Hz in napajalno napetost 9 V.



Slika 7: Izhodna napetost krmilnega modula pri različnih izhodnih bremenih

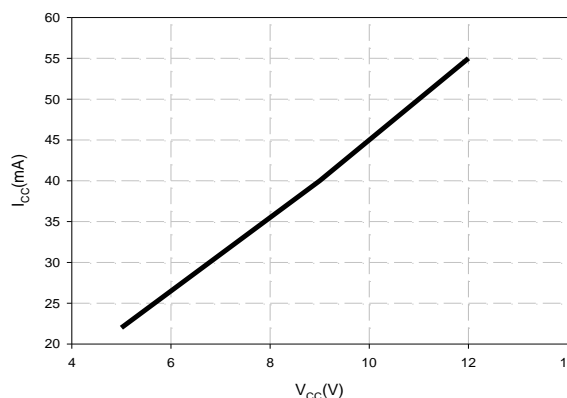
Čprav iz slike 7 sledi tako rekoč linearno padajoč potek odvisnosti višine krmilne napetosti od bremena, moramo poudariti, da se oblika krmilnega signala močno poslabša, saj hitrost vzpona pozitivnega signala pade s 140 V/ms na 80 V/ms. Mejno vrednost kapacitivnosti bremena, pri kateri modul ohranja hitrost dviga 140 V/ms, smo določili pri 57 nF s krmilno napetostjo 172 V_{pp}. Večje kapacitivne (> 57 nF) obremenitve izhoda povzročijo nasičenje obeh SMPS-pretvornikov krmilnega modula, kar poslabša hitrost vzpona in upada izhodnega signala. Posledica tega zmanjšanja je drastično poslabšanje tlačno pretočnih karakteristik krmiljene mikročrpalke. Poslabšanje oblike krmilnega signala pripisujemo predvsem omejenemu toku toka skozi induktivnost L₁.

Za enakomernejša poteka obeh polperiod signala bi morali povečati največji tok induktivnosti L₁, kar je žal v nasprotju z vidikom zasnove majhne porabe. Slika 8 prikazuje izmerjene rezultate izhodnega signala s kapacitivnim bremenom 12 nF. Pri tej frekvenci krmilnik dosega vršno vrednost signala 236 V_{pp} s hitrostjo vzpona pozitivnega signala 142 V/ms oziroma negativnega 163 V/ms. Amplituda pozitivne in negativne polperiode je bila 122 V oziroma -114 V.



Slika 8: Izhodna napetost modula pri 87 Hz

Izmerili smo porabo toka modula glede na območje napajalnih napetosti.



Slika 9: Poraba toka krmilnega modula

Odvisnost napajalnega toka od napajalne napetosti modula je prikazana na sliki 9. Poraba toka modula se postopoma povečuje linearno glede na večanje obremenitve in frekvence signala do 55 mA pri napajanju 12 V, kar je bila zgornja meja načrtovanja in obenem najvišja dovoljena napetost MOSFET-krmilnika TC4427. Poraba toka mikrokrmilnika ostaja zanemarljiva skozi celotno merilno območje. Izmerjena poraba toka celotnega krmilnega modula je znašala 22 mA pri 5 V_{CC} in 55 mA pri 12 V_{CC}.

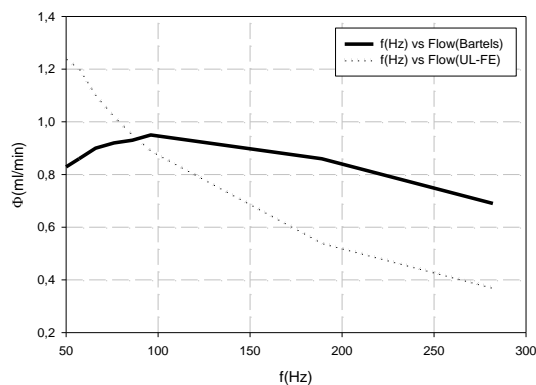
Po začetnem testiranju mikročrpalk smo zasnovali sistem za računalniško vodeno karakterizacijo piezoelektričnih mikročrpalk, prikazan na sliki 10.

Analizirani krmilni modul smo priključili na mikročrpalko, razvito v našem laboratoriju [7]. Rezervoar, napolnjen z DI vodo, je bil na izhodu priključen na fluidni vhod mikročrpalke in senzor tlaka in pretoka. Izhod sensorja tlaka smo merili z voltmetrom KE2700. Merilni sistem omogoča frekvenčno vzbujanje mikročrpalke, pri čemer za vsako delovno frekvenco izmeri tlak in pretok zraka in DI vode.

Pretok mikročrpalke smo merili z uporabo natančne tehtnice Kern ABJ 120-4M. Dobljene rezultate tehtanja smo korigirali glede na izhlapevanje medija med meritvijo.



Slika 10: Sistem za računalniško vodenno karakterizacijo piezoelektričnih mikročrpalk

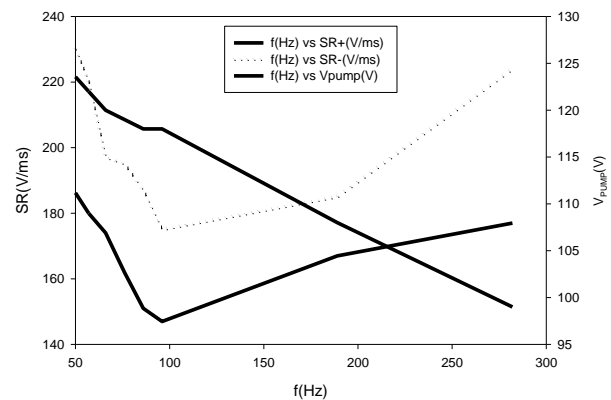


Slika 11: Primerjava krmilnikov mikročrpalke LMSE v odvisnosti od frekvence (medij DI voda)

Odvisnost pretoka DI vode od delovne frekvence mikročrpalke je predstavljena na sliki 11. Rezultati kažejo primerjavo frekvenčnega preleta izdelanega miniaturnega krmilnega modula z namiznim (7,5 x 16 x 20 cm) mp-x krmilnikom Bartels [1], ki je bil nastavljen z enakimi amplitudnimi in frekvenčnimi pogoji. Bistvena razlika v krmilnih parametrih je bila oblika signala, kjer je bil krmilnik Bartels mp-x nastavljen na pravokotni krmilni signal. Preizkušani krmilnik je zagotavljal podobno obliko polnjenja kapacitivnosti, kot je prikazano na sliki 8. Minimalno DC uravnoteženje obeh stikalnih polperiod smo dosegli tako, da smo isto mikročrpalko vzbujali v frekvenčnem območju od 50 Hz do 400 Hz, pri čemer sta bila oba delovna cikla nastavljena v skladu s tabelama 1 in 2.

Za nižjefrekvenčno območje (tj. pod 80 Hz) načrtovani krmilni modul dejansko presega vrednosti pretoka mikročrpalke, ki smo jih dosegli s krmilnikom Bartels mp-x. Izdelani krmilni modul doseže 1,2 ml/min v primerjavi z 0,8 ml/min, dobljenim z modulom mp-x. Žal se s povečevanjem krmilne frekvence mikročrpalke

zmanjšata hitrost vzpona/upada in amplituda krmilnega signala, kar povzroči enakomerno eksponentno upadanje zmogljivosti pretoka. Kot je razvidno iz slike 12, smo optimalno pretočno zmogljivost načrtovanega krmilnika dosegli pri nizkih frekvencah (<80 Hz), kjer je primarno omejena s hitrostjo vzpona/upada krmilnega signala. Slika 12 povzema izmerjene hitrosti vzpona (ang. slew rate, SR) pozitivne polperiode (SR^+) in hitrosti upada negativne polperiode (SR^-) in amplitudo krmilne napetosti mikročrpalke v odvisnosti od krmilne frekvence.



Slika 12: Odvisnost hitrosti vzpona (SR^+) / upada (SR^-) od frekvence

Za boljše približanje pravokotni obliki krmilnega signala in natančnejšo nastavitve uravnoteženja pozitivne in negativne napetosti vzbujanja bi morali dodati krmilni algoritem s povratno vezavo, ki bi zajemala izhodno napetost mikročrpalke v dani polperiodi in nastavljala delovno razmerje pozitivne in negativne polperiode krmilne napetosti mikročrpalke. Slednje žal podraži izvedbo in dodatno obremeni izhodno stopnjo krmilnega modula, kar posledično poslabša obliko signala.

7 SKLEP

Predstavljene so bile zasnova, izdelava in karakterizacija krmilnika piezoelektričnih mikročrpalk. Izdelani krmilni modul odlikujeta majhnost (25 mm x 25 mm x 5 mm) in majhna poraba toka (≈ 55 mA). Izdelani krmilni modul omogoča integracijo v ohišje mikročrpalke.

Modul smo preizkušali na frekvenčnem območju od nekaj Hz do 400 Hz, pri čemer je pri nižjih frekvencah dosegal amplitude krmilne napetosti do 250 V_{pp}. Na podlagi meritev črpanja DI vode smo določili optimalno delovno frekvenčno območje delovanja med 50 do 80 Hz.

Kot smo omenili že uvodoma, je ciljno območje uporabe predstavljenega krmilnika omejeno predvsem na stroškovno občutljive aplikacije in aplikacije z majhno porabo energije.

Nadaljnje delo je usmerjeno v zagotavljanje uravnoveženosti pozitivnega in negativnega signala ter višje hitrosti vzpona/upada krmilnega signala.

ZAHVALA

To delo je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (št. P2-0244).

LITERATURA

- [1] »Bartels mp-x Controller«, <http://www.bartels-mikrotechnik.de/index.php/produkte/elektronik>, 15.2.2019.
- [2] »Bartels mp6-OEM Controller«, <http://www.bartels-mikrotechnik.de/index.php/produkte/elektronik>, 15.2.2019.
- [3] M. Antonijevič, T. Dolžan, B. Pečar, U. Aljančič, M. Možek, D. Vrtačnik, D. Resnik, S. Amon, "Characterization system for piezoelectric micropumps", 48th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials & the Workshop on Ceramic Microsystems, September 19 - September 21, 2012, Otočec, Slovenia. Proceedings. Ljubljana: MIDEM - Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials.
- [4] SMOLE, Dejan, DOLŽAN, Tine, PEČAR, Borut, ALJANČIČ, Uroš, MOŽEK, Matej, VRTAČNIK, Danilo, RESNIK, Drago, AMON, Slavko. Low-power piezoelectric micropump driving module. 50th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials, October 8 - October 10, 2014, Ljubljana, Slovenia.
- [5] Thomas Baumann, Eckart Hoene, "Highly Miniaturized Piezoactor Drive", Fraunhofer-Institut IZM. <http://www.powerguru.org/highly-miniaturized-piezoactor-drive/>, 15.2.2019.
- [6] LTSPICE4, Linear Technologies: <http://ltspice.linear-tech.com/software/LTspiceXVII.exe>, 15.5.2017.
- [7] DOLŽAN, Tine, PEČAR, Borut, MOŽEK, Matej, RESNIK, Drago, VRTAČNIK, Danilo. Self-priming bubble tolerant microcylinder pump. Sensors and actuators. A, Physical, ISSN 0924-4247, 2015, vol. 233, pp. 548–556.
- [8] 8-bit AVR Microcontroller: ATtiny4 / ATtiny5 / ATtiny9 / ATtiny10 DATASHEET: http://www.atmel.com/images/atmel-8127-avr-8-bit-microcontroller-attiny4-attiny5-attiny9-attiny10_datasheet.pdf, 15.2.2019p.

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.

Borut Pečar je diplomiral leta 2008 in doktoriral leta 2013 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje obsega MEMS strukture v povezavi z mikrofluidiko in FEM numerično modeliranje.

Drago Resnik je diplomiral leta 1984, magistriral leta 1993 in doktoriral leta 2000 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje vključuje mikroobdelavo silicijevih senzorskih struktur, raziskavo anizotropnega jedkanja silicija in nizekotemperaturnega bondiranja silicijevih struktur.

Danilo Vrtačnik je diplomiral leta 1981, magistriral leta 1994 in doktoriral leta 2000 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje vključuje mikroobdelavo silicijevih senzorskih struktur in kovinskih tankih plasti ter njihove integracije v mikrofluidiko.