

Vibracijski mikrofluidni rotacijski motor na osnovi stebrička

Suzana Uran, Matjaž Malok, Riko Šafarič

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor
E-pošta: suzana.uran@um.si, riko.safarič@um.si

Vibrational microfluidic rotational motor based on pillar

Abstract. The paper presents the development and testing of a controller for vibrational device of microfluidic motor based on a pillar with diameter lower than 1 mm. It presents the principle of construction of a mechanical amplifier driven by a piezoelectric actuator, a signal generator for AC voltage controlling the piezoelectric actuator and construction of a vibrational microfluidic rotational motor. The microfluidic motor can be driven in both rotational direction and rotational speed can be controlled between -1 rev/s to +4 rev/s.

1 Uvod

Miniaturizacija mehatronskih naprav je že več kot dve desetletji v ospredju raziskovalnih naporov znanstvenikov, ki neumorno razvijajo mikroelektromehanske sisteme (MEMS). Članek prikazuje gradnjo in krmiljenje vibracijskega mikrofluidnega motorja na osnovi stebrička s premerom rotorja manjšim od 1 mm. Sam vibracijski mikrofluidni rotacijski motor je razmeroma preprosta naprava sestavljena iz stebrička v kapljici vode (tekočine). V kapljici vode se zaradi krožnih vibracij ustvari krožni vodni tok okoli stebrička, ki poganja rotor mikrofluidnega motorja. Za poganjanje krožnega toka vode okoli stebrička je potrebno razviti kvalitetno vibracijsko napravo. Pričujoči članek prikazuje princip delovanja in testiranje krmiljenja podsistemov nujnih za kvalitetno in zanesljivo delovanje samega vibracijskega mikrofluidnega rotacijskega motorja na osnovi stebrička.

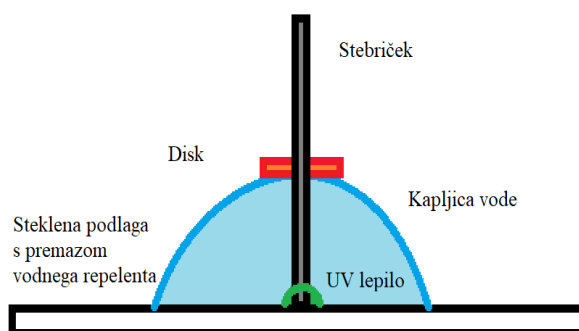
2 Mikrofluidni motor na osnovi stebrička

Zgradbo vibracijskega mikrofluidnega motorja na osnovi stebrička prikazuje slika 1.

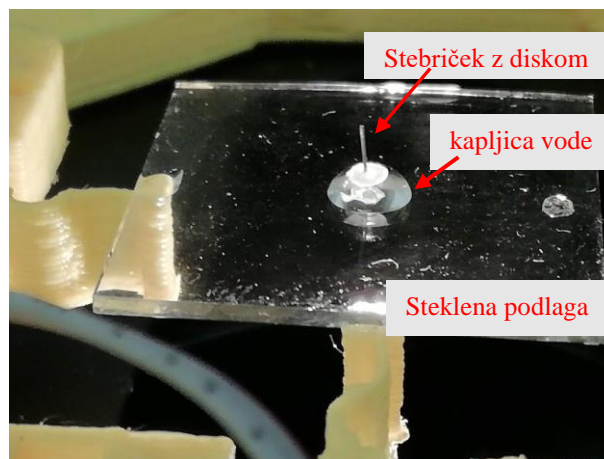
Mikrofluidni motor smo izdelali tako, da smo na čisto in osušeno mikroskopsko steklo namazali tekočino vodnega repelenta in nato namazano površino spolirali. Na ta način je postala površina stekla hidrofobna in je odbijala kapljico vode. Zaradi tega ima kapljica vode, ki se nahaja okoli osi motorja – stebrička, na vrhu izrazito in stabilno okroglino. Stebriček (os motorja) je bil izdelan iz tanke bakrene žičke premera 100 μm in dolžine 4 mm ter je bil prilepljen pravokotno na stekleno podlago z UV lepilom. Rotor mikrofluidnega motorja je disk, ki je lažji od vode, in ima v sredini luknjico premera cca. 200 μm . Disk smo izdelali iz kroglice polystirena (cca. 1 mm premera). Kroglico

smo trikrat prerezali in najširši sredinski del toplotno deformirali (sploščili) z dvema kovinskima ploskvama segretima na cca. 70 °C (trajanje nekaj sekund). Nato smo v sredini diska z mehanskim ostrim točkalom naredili luknjico premera cca. 200 μm . Disk smo natakneli na stebriček, ki na vrhu gleda iz kapljice. Disk natakneljen na stebriček prosto plava na vrhu kapljice in le nekoliko splošči vrh kapljice.

Zgrajen mikrofluidni motor je prikazan na sliki 2.



Slika 1: Skica mikrofluidnega motorja na osnovi stebrička



Slika 2: Zgrajen mikrofluidni motor - Disk na kapljici vode s stebričkom v sredini

Vrtenje diska (rotorja) mikrofluidnega motorja povzročimo tako, da z vibracijami steklene podlage poženemo mikrofluidni krožni tok vode (tekočine) v kapljici. Nastanek mikrofluidnega krožnega toka je podrobno opisan v [5] in [6].

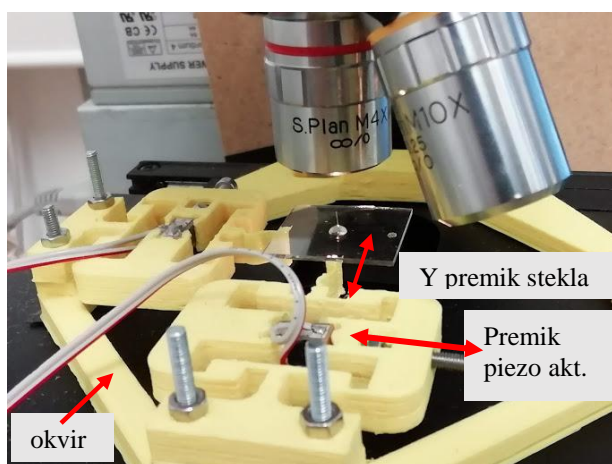
Vibracije steklene podlage, na kateri je zgrajen mikrofluidni motor, izvajamo s pomočjo piezoelektričnih aktuatorjev. Piezoelektrični aktuatorji se pogosto uporabljajo v mikro/nano aplikacijah, saj omogočajo zelo precizne premike in razvijajo dokaj velike sile. Vendar je celo območje premika piezoelektričnih aktuatorjev majhno, saj znaša okoli

0.1% dolžine piezoaktuatorjev. Zato se piezo aktuatorji pogosto uporabljajo skupaj z različnimi mehanizmi, ki ojačujejo premike piezo aktuatorjev.

Da bi zagotovili večje hitrosti vrtenja in s tem boljše krmiljenje mikrofluidnega motorja smo vibracijsko napravo za mikrofluidni motor na osnovi stebrička zasnovali na osnovi mehanskega mostičnega mehanizma, ki ojačuje premike piezo aktuatorja [1,2].

3 Vibracijska naprava

Vibracijska naprava je sestavljena iz mehanizma vibracijske naprave (slika 3) in iz generatorja signala vibracijske naprave.



Slika 3: Mehанизem vibracijske naprave

Vibracijska naprava na sliki 3 je vpeta v mikroskop. Vpetje v mikroskop je bilo potrebno, saj je velikost razvitih motorjev v sub milimetrskem področju (velikost rotorja je bila med 300 in 1000 μm). Sama vibracijska naprava je sestavljena iz okvirja, ki je bil pritrdjen na mikroskop, ter je omogočal premikanje levo/desno in gor/dol v fokusu leče mikroskopa. Na okviru sta bila pritrdjena dva mehanska ojačevalnika vibracij (na sliki 3 levo za premik stekla po X-osi in spredaj za premik stekla po Y-osi). Zaradi mehanskega ojačevalnika je med premikanjem piezo aktuatorja in premikanjem stekla kot 90 stopinj. Okvir vibracijske naprave in oba mehanska ojačevalnika smo izdelali s tehniko 3D tiskanja iz ABS plastike. Med obema mehanskima ojačevalnikoma je bilo na mehkih elastičnih povezavah prilepljeno mikroskopsko steklo dimenzije 20 x 20 mm, saj je bila osvetlitev žariščne točke mikroskopa izvedena od spodaj.

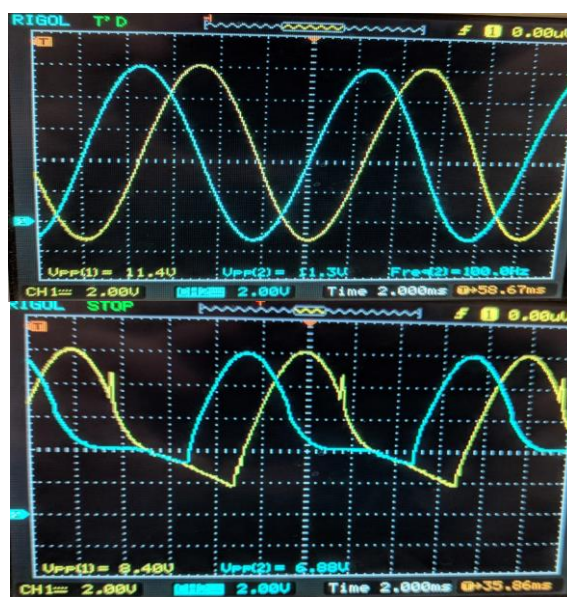
Mehanski mostični ojačevalnik je ojačal amplitudo piezoelektričnega aktuatorja za cca. 3 krat, odvisno od frekvence, pri resonančni frekvenci mehanskega ojačevalnika pa celo za 26 krat. Z mehкими, elastičnimi in tankimi povezavami smo precej zmanjšali mehansko sklopjenost med obema mehanskima ojačevalnikoma.

Vsak od mehanskih ojačevalnikov [1], [2] je vzbujan s svojim piezoelektričnim aktuatorjem MPO Piezo Stacks MPO-050015 [3] podjetja Nanofaktur iz

Nemčije. Piezoelektrični aktuator (dimenzije 5 x 5 x 10 mm) je nameščen na sredini mehanskega ojačevalnika (slika 3) in je napajen z izmenično napetostjo v območju od -10 V do +115 V. To območje napetosti omogoča mehanske premike piezo aktuatorja z amplitudo cca. 10 μm . Resonančna frekvenca piezo aktuatorja je 105 kHz.

Piezoelektrične aktuatorje krmilimo z napetostjo z visokonapetostnim operacijskim ojačevalnikom Apex Microtechnology PA87 [4]. Ojačevalniki PA87 so namenjeni za krmiljenje piezo aktuatorjev, lahko jih napajamo z napetostjo od -15V do 335V, na izhodu dajejo 150 mA trajnega toka (200 mA kratkotrajno) in imajo frekvenčno območje višje od 200 kHz. Dva krmilna signala (sinusno napetost za prvi piezoelektrični aktuator in kosinusno napetost za drugega) pa smo generirali z mikrokrmilnikom dsPIC33FJ64MC802. Programska oprema generatorjev signala sinusa in kosinusa, lastne izdelave je omogočala spremembo frekvence med 1 Hz in 10 kHz s korakom 1 Hz, nižanje izhodne napetosti elektronskega dela vibracijske naprave je bilo možno s korakom 10% med 0 do 115 V izhodne amplitude. Programska oprema generatorja signala vibracijske naprave je omogočala tudi nastavljen fazni zamik $+90^\circ$ med sinusno in kosinusno izhodno napetostjo.

Električno lahko piezo aktuator modeliramo s kondenzatorjem, katerega impedanca je obratno sorazmerna s frekvenco ($1/j\omega C$). Podana kapacitivnost uporabljenega piezo aktuatorja je 1.1 μF . Tokovne zahteve piezo aktuatorjev z višanjem frekvence premikanja naraščajo. Za želeni sinusni potek napetosti $u(t)=A\sin(\omega t)$ je potreben tok $i = \omega \cdot C \cdot A \cdot \cos(\omega t)$. Z osciloskopom smo izmerili časovne poteke izhodne napetosti ojačevalnika PA87 brez (slika 4 zgoraj) in s priključenim (slika 4 spodaj) piezo aktuatorjem pri frekvenci 100 Hz sinusnega signala.

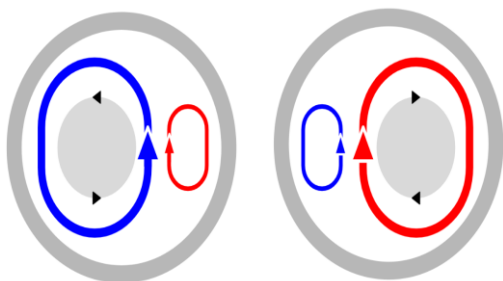


Slika 4: Izhodna (sin/cos) signala PA87 pri 100 Hz brez in s priključenim piezo aktuatorjem (modra barva – X-os, rumena barva – Y-os)

Pravilne krožne gibe mikroskopskega stekla smo dobili do frekvence 40 Hz, saj so bile izmerjene napetosti na piezo aktuatorjih do te frekvence precej pravilne sinusne oblike. Pri višjih frekvencah pa so bile izmerjene napetosti bolj popačene, npr. kot na sliki 4 spodaj. Premikanje stekla sta močno popačila mehanska ojačevalnika skupaj z napajalno elektroniko. Namesto lepega krožnega gibanja stekla smo dobili pri resonančnih frekvencah bolj elipsoidno obliko gibanja stekla, kar je posledica povečanja amplitude premikanja zaradi resonance enega ali obeh mehanskih ojačevalnikov. Resonančne frekvence vibracijske naprave so se pojavljale v območju od 48 Hz do 900 Hz. Izrazitejše resonančne frekvence (velikost amplitude do 70 μm) smo dosegli v frekvenčnem pasu od 70 do 350 Hz z zelo ozkimi resonančnimi vrhovi, ki so bili široki zgolj 10-15 Hz. Največjo amplitudo 130 μm smo dobili pri resonančni frekvenci okoli 500 Hz, zato smo pri tej frekvenci dobili največjo hitrost vrtenja motorja (slika 7). Pri frekvencah višjih od 600 Hz se je amplituda zmanjševala in je pri 1000 Hz dosegla zgolj 1 μm . Razen tega se je mikroskopsko steklo pri različnih resonančnih frekvencah gibalo enkrat v smeri urnega kazalca drugič pa v proti urni smeri. To lastnost smo izkoristili za to, da smo lahko disk rotacijskega motorja vrteli enkrat v eno, drugič v drugo smer.

Krmiljenje smeri vrtenja vibracijskega mikrofluidnega motorja lahko dosežemo na dva načina. Pri prvem načinu dosežemo spremembo smeri vrtenja mikrofluidnega motorčka s spremembo faznega zamika med krmilnima signaloma iz 90° na 270° , pri drugem pa moramo poiskati dve različni resonančni frekvenci, pri katerih imamo vrtenje vode v nasprotnih smereh. Drugi način se je pokazal kot bolj zanesljiv in ponovljiv.

Zaradi popačenj signalov nimamo enega lepega vrtinca, ampak imamo običajno dva vrtinca, ki se vrtita v nasprotnih smereh, kar je posledica vibriranja steklene podlage. Pri vrtenju motorčka v eno smer je prevladujoč velik vrtinec, medtem ko je drugi vrtinec manjši, in ne vpliva na kroženje. Ko pa spremenimo frekvenco pa se spremeni kroženje vode tako, da prej glavni vrtinec postane manjši, prej manjši vrtinec pa postane glavni vrtinec, in tako vrtimo disk v nasprotno smer (Slika 5).



Slika 5: Dve obliki prevladujočega vrtinca vode v kapljici

4 Testiranje mikrofluidnega motorja

Slika 6 prikazuje dva trenutka vrtenja diska na stebriček pri pogledu skozi mikroskop. Premer diska je cca. 500 μm , v sredini pa se sicer nejasno vidi steber premera

100 μm z nekoliko svetlejšim kolobarjem okoli stebra, ki predstavlja režo med stebričkom in diskom. Na sliki 6 a) vidimo izboklino diska desno spodaj, medtem, ko je izboklina diska na sliki 6 b) levo zgoraj. Hitrosti rotacije diska, ki smo jih dosegali, so bile med -1 obr/s in $+4$ obr/s, odvisno od vzbujalne frekvence napajalne napetosti iz signalnega generatorja, kar prikazuje slika 7.

Zanesljivost in ponovljivost delovanja takšnega motorja je bila visoka. Teste smo izvajali 3 zaporedne delovne dni in niti enkrat se ni zgodilo, da naprava ne bi delovala. Nekoliko je nihala zgolj izmerjena rotacijska hitrost iz dneva v dan (za cca. 20%), kar je bila posledica izhlapevanja kapljice vode. Ko se je volumen kapljice zmanjšal za približno polovico, se je hitrost vrtenja diska opazno zmanjšala. Ko smo manjkajočo vodo dolili, je bilo vrtenje vode ponovno zanesljivo in konstantno. Tudi, ko smo motor razstavili, in ga ponovno sestavili po postopku opisanem na začetku 1. poglavja se ni nič bistveno spremenilo. Opazili pa smo, da so se resonančne frekvence iz slike 7 spremenile (zvišale ali znižale) za nekaj 10 Hz, če točka, kjer je bilo mikroskopsko steklo prilepljeno na mehko elastično spojko mehanskega ojačevalnika, ni bila točno na sredini ustrezne (X, oz. Y) stranice stekla. Prav tako smo ugotovili, da kvaliteta 3D tiskanja mehanskih ojačevalnikov bistveno vpliva na položaj resonančnih frekvenc v sliki 7.



a)

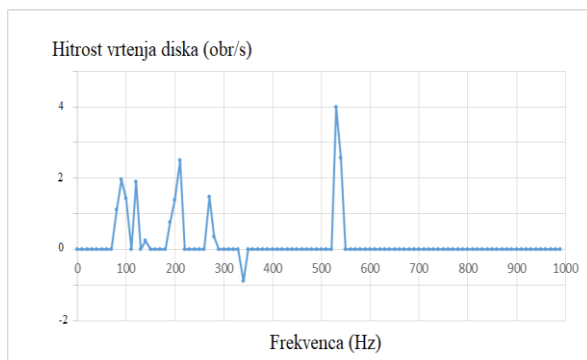


b)

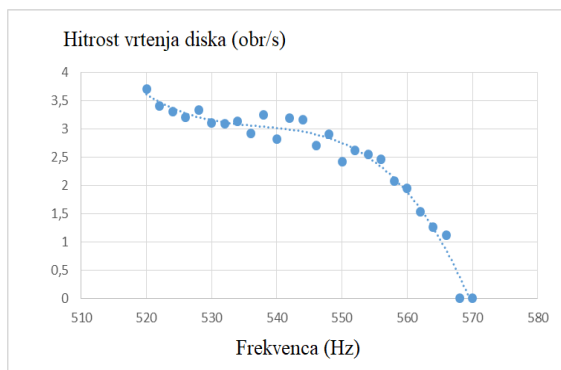
Slika 6: Prikaz vrtenja diska nataknenega na stebriček na kapljici vode skozi mikroskop

Dejansko je imel vsak od 3 parov 3D tiskanih mehanskih ojačevalnikov, ki smo jih testirali drugačne resonančne frekvence. Zato smo morali pri zamenjavi

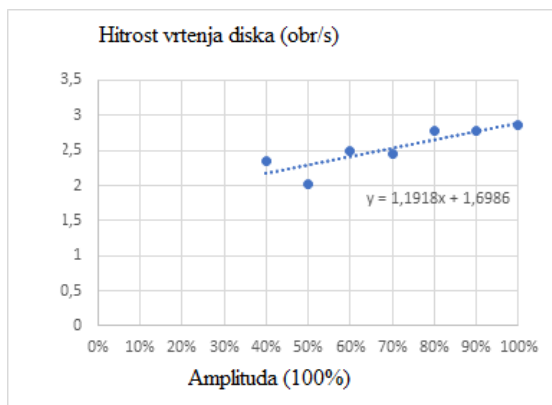
mehanskih ojačevalnikov vedno ponovno umeriti resonančne frekvence pri katerih se je disk mikrofluidnega motorja vrtel v eno ali drugo smer. Tudi pri spremembi premera diska in luknjice v disku je bilo potrebno ponovno umerjanje. Slika 8 prikazuje podrobneje frekvenčno območje od 520 do 570 Hz iz slike 7. Vidimo, da lahko hitrost vrtenja diska spreminjamo s povečevanjem frekvence preko resonančnega vrha. Drugi način spreminjanja vrtilne hitrosti diska omogoča, da obdržimo frekvenco pri 520 Hz (resonančna frekvenca), nato pa znižujemo amplitudo sinusnega in kosinusnega izhodnega napetostnega signala iz generatorja signala (slika 9).



Slika 7: Vrtilne hitrosti diska motorja v odvisnosti od vzbujevalnih frekvenc signalnega generatorja



Slika 8: Hitrosti vrtenja diska okoli frekvence 545 Hz



Slika 9: Hitrosti vrtenja diska v odvisnosti od amplitude signalnega generatorja

5 Zaključek

V prispevku je predstavljen razvoj mikrofluidnega motorja na osnovi stebrička, kjer smo zgradili mehanizem vibracijske naprave in generator vibracijskega signala na osnovi piezoelektričnega aktuatorja. Uporabili smo učinek tvorjenja mikrofluidnega krožnega toka okoli stebrička v kapljici vode, ko vzbujamo stebriček s krožnimi vibracijami. Krožni tok je bil dovolj močan, da smo vrteli majhen disk s polmerom manjšim od 1 mm s hitrostmi do 4 obr/s v obe smeri, pri čemer smo lahko krmilili tudi hitrost vrtenja.

Menimo, da bi lahko predstavljeni motor še zmanjšali, tako da bi bil premer motorja manjši od 300 μm in ga uporabili za izgradnjo mikro motorja za poganjanje mikroelektromehanskih sistemov (MEMS). Slabost predstavljene metode je izhlapevanje vode iz proste kapljice, kar bi najlažje zmanjšali s pomočjo druge manj hlapne tekočine (npr. tekoča kovinska zlitina galinstan). Ali pa bi površino podlage motorja ohlajali pod temperaturo rosišča in s tem izhlapevajočo vodo nadomeščali s kondenzirano vodo iz zraka, za kar bi bilo potrebno zgraditi poseben regulacijski sistem in je zahtevnejše za izvedbo.

Literatura

- [1] C. Lin, Z. Shen, J. Yu, P. Li, D. Huo, Modelling and Characteristic Analysis of a 3 Piezoelectric-actuated Micro-/nano Compliant 4 Platform using Bond Graph Approach, Micromachines, 2018
- [2] H. Wei, B. Shirinzadeh, W. Li, L. Clark, J. Pinskiar, Y. Wang, Development of Piezo-Driven Compliant Bridge Mechanisms: General Analytical Equations and Optimization of Displacement Amplification, Micromachines, Avgust 2017
- [3] MPO Piezo Stacks, <http://www.nanofaktur.com/piezo-actuators/mpo-piezo-stacks>, [Pridobljeno 23. 6. 2019]
- [4] J. Čas, Položajno vodenje robotskega mehanizma s piezoelektričnimi aktuatorji, doktorska disertacija, Maribor, april 2011.
- [5] B. Bratina, A. B. Garcia, M. Petek, S. Uran, R. Šafarič, Razvoj vibracijskega rotacijskega mikromotorja v tekočini, Zbornik 27. mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2018, 17. - 18. September 2018, Portorož, Slovenija
- [6] T. Hayakawa, S. Skuma, F. Arai: On-chip 3D rotation of oocyte based on a vibration-induced local whirling flow, Microsystems & Nanoengineering, Maj 2018

Zahvala

Zahvaljujemo se sodelavcem Laboratorija za kognitivne sisteme v mehatroniki na FERi, Univerze v Mariboru za njihov doprinos pri razvoju in testiranju vibracijskega mikrofluidnega motorja, še posebej Domnu Potočniku in Mikel-u Pildain Leria.