

Razvoj vibracijske naprave mikrofluidnega motorja

Matjaž Malok

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

E-pošta: matjaz.malok@student.um.si

The Development of Vibration Devices of Microfluidic Motors

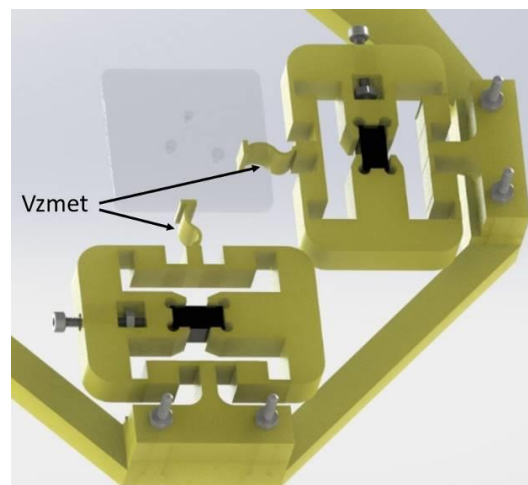
Abstract. The paper presents the development and testing of vibration devices of microfluidic motors. It presents the principle of operation of the mechanical amplifier on a vibration device, which increases the elongation of piezoelectric actuators. Furthermore, it describes the principle of generating circular motion by sine and cosine signal, a process by means of which the piezoelectric actuators are controlled. Control signals are generated by a PIC microcontroller. With it we can set the phase shift, amplitude and frequency of the signals. The limitations of the use of the mechanism of the vibration devices are also presented.

Lastly, the development of the microfluidic motor in a pot with a disc and an axis is presented. The disc is made of Styrofoam with a diameter of 1,5 mm and the axis is made of copper wire with a diameter of 200 μm . For the bearing, we use optical fiber. The method of controlling the speed of the motor is presented. We also present a possible means of controlling the direction of the rotation.

1 Uvod

Članek prikazuje razvoj in testiranje mehanizmov vibracijske naprave mikrofluidnega motorja ter razvoj milimetrске verzije motorja na osnovi lončka z osjo. Vibracijska naprave (Slika 1) je generator vibracij, ki poganjajo krožni tok vode v lončku oz. okoli stebrička [1]. V dosedanjem delu [2] se je za ustvarjanje vibracij uporabljal elektromotor z ekscentrom. Vendar pa je pri tem prihajalo do problemov s pregrevanjem elektromotorja, saj je bil le ta tesno vstavljen v ohišje, in pojavljanja dodatnih vibracij, ki so povzročale dodatne vrtenje pri kroženju vode, kar zmanjšuje sposobnost za vrtenje objektov v vodi. Zato smo razvili novo različico vibracijske naprave, ki jo krmilimo s piezoelektričnimi aktuatorji, ki so vstavljeni v mehanizma vibracijske naprave. Mehanizma vibracijske naprave sta del vibracijske naprave, v katera vstavimo piezoelektrična aktuatorja, in služita kot mehanska ojačevalnika vibracij. Mehanska ojačitev vibracij je potrebna, saj lahko uporabljen piezoelektrični aktuator proizvede pomike do 10 μm . Tako smo ob resonančnih frekvencah dosegli do 26 kratno ojačenje pomikov. Z večanjem amplitude pomikov pa narašča hitrost vrtenja vode v lončku in s tem energija, ki jo lahko uporabimo za vrtenje objektov v lončku [1]. Mehanizma vibracijske naprave, in s tem piezoelektrična aktuatorja v njiju, sta nameščena pod pravim kotom. Če ju krmilimo s

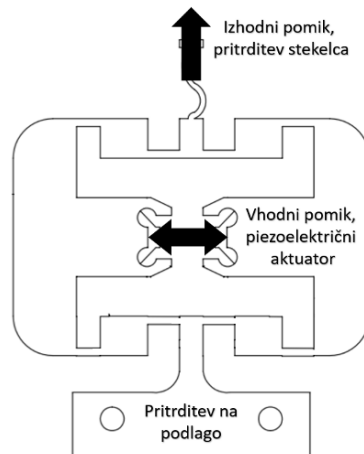
sinusnim in kosinusnim signalom, dobimo krožno gibanje stekelca, ki je pritrjeno na mehanizem vibracijske naprave, na katerem se izvaja gradnja mikrofluidnega motorja.



Slika 1: Posnetek detajla vibracijske naprave.

2 Princip delovanja mehanizma vibracijske naprave

Mehanizem vibracijske naprave deluje kot mehanski ojačevalnik. Pomike, ki jih povzroči piezoelektrični aktuator, mehanizem ojači oz. poveča njihovo amplitudo [3],[4]. Pri tem se ne le poveča amplituda, ampak se spremeni tudi smer pomikov. Tako dobimo pomike v pravokotni smeri, glede na premike piezoelektričnega aktuatorja.



Slika 2: Princip delovanja mehanizma vibracijske naprave.

Z ustrezno postavitvijo fleksibilnih povezav je možno doseči tudi, da dobimo na izhodu iz mehanizma skrček, ko se piezoelektrični aktuator raztegne. Vendar

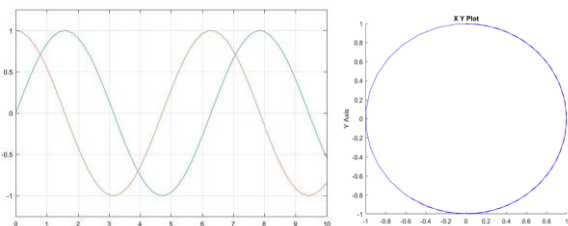
pa smo se odločili za različico, pri kateri vstavimo piezoelektrični aktuator v neobremenjen mehanizem. Ko se piezoelektrični aktuator raztegne, se raztegne tudi izhod mehanizma (Slika 2). Ko pa se piezoelektrični aktuator skrči, se skrči tudi mehanizem. Vendar pa mu pri tem pomaga tudi elastičnost mehanizma, ki se želi vrniti v prvotno lego, in tako pomaga piezoelektričnemu aktuatorju pri skrčku, saj ima piezoelektrični aktuator nekajkrat manjšo silo pri krčenju kot pri raztezanju.

3 Krmiljenje vibracijske naprave

Vibracijsko napravo poganjamo s kompaktnima in ekonomsko najsprejemljivejšima piezoelektričnima aktuatorjema MPO Piezo Stacks MPO-050015 podjetja Nanofaktur [5] dolžine 1 cm in prečne dimenzije 5 x 5 mm, ki se lahko v neobremenjenem stanju raztegneta za 15 μm , pri napetosti med 0 in 150 V. V kolikor bi uporabili večja oz. daljša piezoelektrična aktuatorja, bi le ta generirala večje pomike, vendar pa bi s tem izgubili kompaktnost vibracijske naprave. Prav tako pa v našem primeru pomike, ki jih generirata piezoelektrična aktuatorja, ojačamo z mehanskim ojačevalnikom oz. mehanizmom vibracijske naprave.

Vibracijsko napravo krmilimo s sinusnim oz. kosinusnim signalom, ki ju pripeljemo na piezoelektrična aktuatorja. Amplituda napetosti krmilnega signala je med -10 in 115 V, s srednjo vrednostjo 52,5 V. Ko je vrednost napetosti na piezoelektričnih aktuatorjih višja od 52,5 V se le ta raztegujeta, ko pa je napetost nižja od 52,5 V pa se krčita, pri čemer sta piezoelektrična aktuatorja, ko je na njihju priključena napetost 52,5 V, že nekoliko raztegnjena glede na stanje, ko nanju ni priključena napetost. Krmilni signal generiramo z mikrokrmilnikom dsPIC33FJ64MC802, ter ga ojačamo z visokonapetostnim operacijskim ojačevalnikom Apex Microtechnology PA78.

S pomočjo sinusnega in kosinusnega signala, ki ju pripeljemo na piezoelektrična aktuatorja, ustvarjamo krožno gibanje stekelca (Slika 3), ki je pritrjeno na vibracijsko napravo. Pri tem imamo možnost spreminjanja frekvence, amplitude in faznega zamika signala, s čimer lahko ustvarimo različno obliko kroženja, spreminjamo hitrost ter pa smer kroženja. Vendar pa zaradi omejitev operacijskega ojačevalnika in pa slabših sposobnosti piezoelektričnega aktuatorja pri krčenju ne dobimo pravilne krožnice, ampak je krožnica v delu, kjer se vsaj eden od piezoelektričnih aktuatorjev krči, popačena.



Slika 3: Princip generiranja krožnega gibanja.

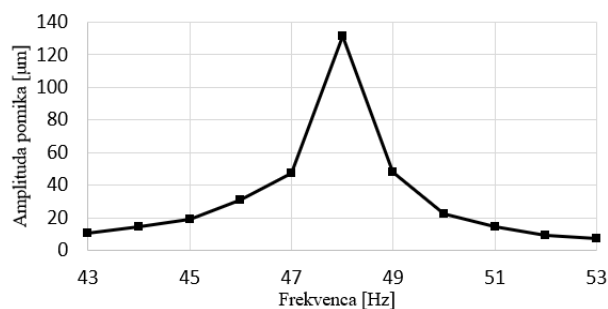
4 Omejitve mehanizmov vibracijske naprave

Pri uporabi mehanizmov so se nam pojavljali problemi zaradi mehanske sklopljenosti mehanizmov, saj smo zaradi tega izgubljali amplitudo pomikov. V začetku smo imeli stekelce pritrjeno neposredno na mehanizmu vibracijske naprave (Slika 4, levo), vendar pa smo kasneje za zmanjšanje sklopljenosti uporabili dodatne vzmeti na robovih mehanizmov (Slika 1). Prav tako smo izdelali še različico, pri kateri smo popolnoma odpravili mehansko sklopljenost (Slika 4, desno). Vendar pa smo pri tej različici imeli dolgo ročico, ki je zaradi lastne vztrajnosti vnašala dodatne motnje v sistem.



Slika 4: Vibracijska naprava s stekelcem pritrjenim neposredno na mehanizmu vibracijske naprave (levo) in popolnoma mehansko razklopljena različica (desno).

Mehanizmi vibracijske naprave so bili izdelani iz ABS plastike, natisnjene s 3D tiskalnikom. Uporaba plastike je prav tako povzročala številne probleme pri uporabi mehanizmov, saj je plastika močno dušila vibracije oz. pomike, ki jih je generiral piezoelektrični aktuator. Vpliv dušenja je postajal izrazitejši s povečevanjem frekvence. Pri višjih frekvencah smo dobili pomike le ob resonančnih frekvencah mehanizmov oz. v njeni bližini. Pri tem je bil problem, da so bili maksimumi resonančnih frekvenc zelo ozki, velikokrat v območju nekaj Hz (Slika 5).



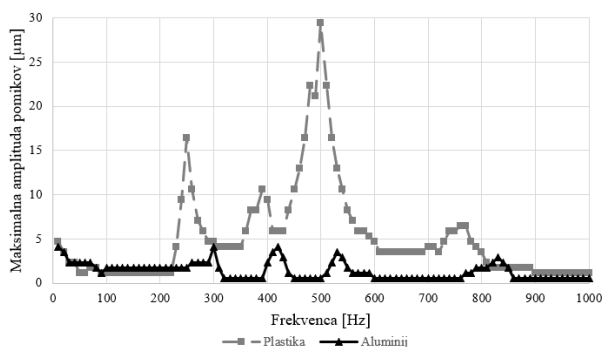
Slika 5: Ozek maksimum maksimalnega ojačenja pomika pri resonančni frekvenci.

Tako smo izdelali različici vibracijske naprave brez uporabe mehanskih ojačevalnikov iz plastike (Slika 6, levo) oz. aluminija (Slika 6, desno), kjer smo imeli manjše pomike, kot pri ostalih različicah. Vendar pa smo dobili pomike, sicer majhne, tudi pri frekvencah, pri katerih je prej plastika zadušila vse vibracije.



Slika 6: Vibracijski napravi brez mehanskih ojačevalnikov, zgrajeni iz plastike (levo) oz. aluminija (desno).

Tako smo dokazali, da je za ojačenja oz. popačenje signala ob resonančnih frekvencah kriva uporaba plastike, saj so bili vplivi ob uporabi aluminija mnogo manjši (Slika 7).



Slika 7: Ojačenja pomikov ob resonančnih frekvencah ob uporabi plastike (sivo) in aluminija (črno).

Nadalje je bil problem, da so se lastne frekvence spreminjale glede na način pritrditve stekelca oz. pritrditve piezoelektričnega aktuatorja v mehanizem. Pri tem so se resonančne frekvence spremenile za nekaj Hz. Precej bolj izrazite pa so bile spremembe resonančne frekvence zaradi utrujanja materiala. Pri tem so se lahko resonančne frekvence premaknile tudi za več 100 Hz, pri enem od mehanizmov so se maksimumi resonančnih frekvenc prestavili iz 400 na 200 Hz, zgolj po nekaj urah uporabe mehanizma. Problem pa je bil tudi v tem, da resonančne frekvence niso bile enake pri obeh uporabljenih mehanizmih, kar je bilo posledica izdelave s 3D tiskalnikom, pri čemer je lahko prihajalo do odstopanj pri izdelavi zaradi nekoliko različnih lastnosti plastike, s katero se je tiskalo, ter različne poti tiskalnika. Posledica tega je bila, da nismo dobili krožnih pomikov stekelca, ampak se je stekelce premikalo v smeri, ki je prevladovala zaradi ojačenja pomikov zaradi resonančne frekvence.

5 Vrtenje vode

Vrtenje vode povzročimo s pomočjo vibracij [1]. Za dosego vrtenja v krogu in le enega vrtinca potrebujemo krožne vibracije stekelca. Vendar pa v imamo v našem primeru popačene vibracije stekelca zaradi razlogov opisanih v prejšnjem poglavju in popačenja krmilnega signala. Posledica tega je, da se nam pojavlja večje število vrtincev, kar pa pomeni, da izgubljam energijo, ki bi jo želeli uporabiti za vrtenje.

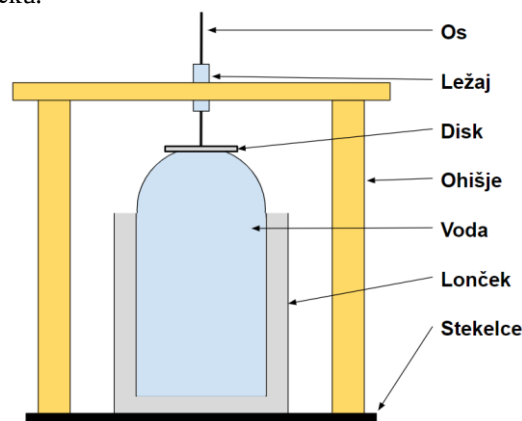
Drugi problem pa je, da tudi trenje med podlago in vodo generira gibanje vode. Do sedaj je bilo dokazano, da se voda vrti, ko imamo tanek film vode na vibrirajoči podlagi. Vendar pa smo z eksperimenti ugotovili, da se

z večanjem višine vode na stekelcu do 3 mm, hitrost vrtenja vode na stekelcu povečuje. Pri tem imamo več vrtincev, ki se vrtijo v naključni smeri. Pri višini 3 mm, pa se ustvarita dva prevladujoča vrtinca, ki se vrtita v nasprotni smeri. Vendar pa se z naraščanjem gladine vode hitrost vrtenja zmanjšuje, in se pri približno 7 mm povsem ustavi.

Tako je kroženje vode zaradi vibracij podlage mnogokrat prevladujoče nad kroženjem vode zaradi lončka oz. stebrička. Tako smo uspeli zavrteti mikrofluidni motor le v primeru, ko smo imeli en dovolj velik in močan vrtinec vode v lončku, ki ga niso motili drugi vrtinci, ki so se generirali zaradi vibracij podlage.

6 Izgradnja mikrofluidnega rotacijskega motorja

V okviru projekta smo uspeli izdelati mikrofluidni rotacijski motor na osnovi lončka z osjo. Mikrofluidni motor je za pogon uporabljal energijo vrteče se vode v lončku.

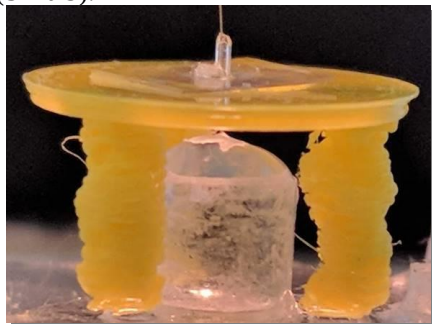


Slika 8: Shema sestavnih delov mikrofluidnega motorja.

Rotor smo izdelali iz stiropora, tako da smo četrtino kroglice stiropora sploščili v disk premera 1,5 mm. Disk (Slika 8) smo izdelali tudi iz duropora in tanke plastike, vendar pa smo ugotovili, da je najboljša plovnost pri uporabi stiropora. Disk smo pritrdili na os iz bakra premera 200 μm. V kolikor smo uporabljali tanjšo os, uporabili smo žičke premera 50 μm iz niklja, platine in paladija, do vrtenja ni prišlo zaradi torzijske deformacije osi. Os iz bakra smo vstavili v ležaj, ki smo ga izdelali iz kapilare optičnega vlakna notranjega premera 240 μm. Preko ležaja je bil rotor vstavljen v ohišje mikrofluidnega motorja. Pri izdelavi ležaja iz optičnega vlakna je bilo potrebno izdelati čim krajši ležaj, da se je zmanjšalo trenje, prav tako pa je bilo potrebno optično vlakno čim lepše odrezati, da se ni zatikalo. Pri tem je bilo problematično, da se je optično vlakno, če smo ga odrezali na kratki razdalji, zdrobilo in ustvarilo zobato površino, prav tako pa se je plastika, ki obdaja optično vlakno, razcefrala in smo morali zato konec optičnega vlakna pobrusiti.

Pri tem nam je uspelo zagnati mikrofluidni rotacijski motor le v primeru, ko smo imeli dovolj kakovostno in močno vrtenje vode. Pri poskusih smo prav tako ugotovili, da hitrost vrtenja vode narašča z večanjem višine kupole vode. Tako smo morali imeti za dosego

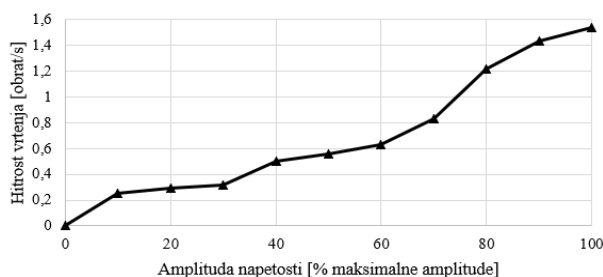
vrtenja dovolj visoko kupolo vodo. Prav tako pa smo pred vsakim vrtenjem morali poiskati ustrezno frekvenco, kjer smo imeli dovolj veliko amplitudo pomikov, da smo dobili dovolj hitro in kakovostno vrtenje vode, in s tem dovolj energije, da se je motorček zavrtel (Slika 9).



Slika 9: Mikrofluidni rotacijski motor.

6.1 Krmiljenje hitrosti vrtenja

Pri testiranju motorja nam je uspelo krmiliti hitrost vrtenja motorja. Hitrost vrtenja nam je uspelo krmiliti s pomočjo spreminjanja amplitude napetosti, s katero krmilimo piezoelektrična aktuatorja (Slika 10). Z zmanjšanjem amplitude napetosti se zmanjša raztezek piezoelektričnega aktuatorja, s tem pa se zmanjša amplituda vibracij, kar pomeni počasnejše kroženje vode, kot izhaja iz [1].



Slika 10: Hitrost vrtenja v odvisnosti od amplitude napetosti krmilnega signala.

Prav tako nam je uspelo doseči spremembo smeri vrtenja vode v lončku s spremembo faznega zamika iz 90° na 270°. Vendar pa je do tega prišlo le takrat, ko smo imeli en glavni in drug manjši vrtinec, ki sta se vrtela v nasprotni smeri. Pri spremembi faznega zamika se je večji vrtinec le zmanjšal, manjši vrtinec pa povečal. Prav tako pa se je to zgodilo le takrat, ko smo pred spremembo faznega zamika vibracijsko napravo predhodno zaustavili. Tako nam ni uspelo doseči zanesljivega načina krmiljenja smeri vrtenja.

7 Zaključek

V prispevku je predstavljen razvoj vibracijske naprave mikrofluidnega motorja in način njenega krmiljenja. Tako smo izdelali mehanizem vibracijske naprave, ki služi kot mehanski ojačevalnik pomikov piezoelektričnega aktuatorja. Pri tem nam je uspelo

nadzorovano ojačati pomike piezoelektričnega aktuatorja le pri nizkih frekvencah. Pri visokih frekvencah material iz katerega je izdelan mehanizem, torej ABS plastika, zaduši vse vibracije, do ojačenja pomikov pa pride le ob resonančnih frekvencah, vendar pa se pomiki takrat ojačajo nenadzorovano, saj ni nujno, da se ojačajo v smeri, v kateri bi se morali ojačati. Ker pa resonančne frekvence niso enake pri obeh mehanizmihi, tako ne dobimo krožnega gibanja, ampak gibanje po premici, v smeri prevladujočega pomika. Ojačenje pomika pri višjih frekvencah bi lahko bilo mogoče možno doseči z izdelavo mehanizmov iz drugega materiala, npr. aluminija, za katerega smo dokazali, da se pri njegovi uporabi pojavljajo veliko manjša ojačenja pomika ob resonančnih frekvencah.

Prav tako nam je uspelo izdelati mikrofluidni rotacijski motor na osnovi lončka. Pri tem smo zanesljivo krmilili hitrost vrtenja motorja s spreminjanjem amplitude vibracij. Vendar pa nam ni uspelo doseči krmiljenja smeri vrtenja motorja, kar nam je uspelo doseči le v primeru, ko sta se ustvarila dva vrtinca ravno prave velikosti, da se je disk vrtel v večjem od njiju, manjši vrtinec pa tega vrtenja ni motil. Prav tako smo ugotovili, da je najpomembnejši faktor pri tem, ali se bo motorček zavrtel, kakovost kroženja vode v lončku. Tako se velikokrat pojavlja kroženje vode v lončku v obliki več vrtincev, na kroženje vode pa vpliva tudi disk motorja, saj je bilo ugotovljeno, da kroži le površina vode, medtem ko voda v globini miruje. Zato bi bilo potrebno podrobneje raziskati vpliv vibracij na kroženje vode, predvsem pod gladino.

Literatura

- [1] T. Hayakawa, S. Skuma, F. Arai: On-chip 3D rotation of oocyte based on a vibration-induced local whirling flow, *Microsystems & Nanoengineering*, Maj 2018.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] MPO Piezo Stacks, <http://www.nanofaktur.com/piezo-actuators/mpo-piezo-stacks>, [Pridobljeno 23. 6. 2019].

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem red. prof. dr. Riku Šafariču, doc. dr. Suzani Uran, Domnu Potočniku in vsem sodelavcem Laboratorija za kognitivne sisteme v mehatroniki na FERI, Univerza v Mariboru, za vso pomoč in podporo pri eksperimentih in nastajanju članka.