

# OPTIMIZACIJA STRUKTURA U RAZVOJU MIKRO-ELEKTRO-MEHANIČKIH SISTEMA

Ermin Husak<sup>1</sup>, Isak Karabegović<sup>1</sup>, Milena Đukanović<sup>2</sup>, Mehmed Mahmić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, dr. Irfana Ljubijankića bb.,  
Bihać Bosna i Hercegovina

<sup>2</sup>Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Džordža Vašingtona bb., 81 000  
Podgorica, R Crna Gora

**Sažetak:** Optimizacija je aktivnost bez koje je danas nezamisliv razvoj bilo kojeg procesa i strukture. Optimizacija struktura sve se više koristi u području mašinstva, građevine, elektrotehnike pa tako i u području mikro i nano tehnologija. Razvoj mikro-elektro-mehanički sistema posljednjih godina je značajno intenzivirana, što je neminovno dovelo i do korištenja optimizacije kao jedne od neizbježnih faza u razvoju proizvoda. U ovom radu ćemo predstaviti opći pristup optimizaciji struktura kao i tehnologiju mikro-elektro-mehaničkih sistema kroz nekoliko primjera mikromehanika. Na kraju rada se navodi nekoliko primjera optimizacije mikro-elektro-mehaničkih sistema.

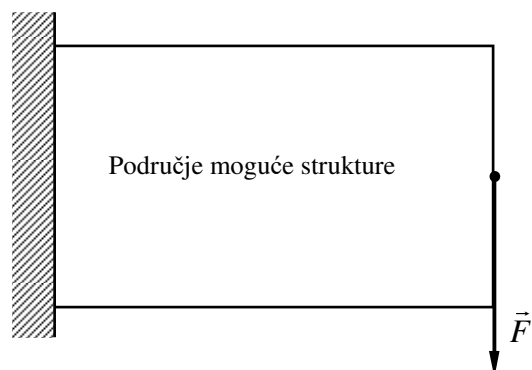
**Ključne riječi :** mikro-elektro-mehanički sistemi MEMS, optimizacija, struktura, razvoj

## 1. UVOD

Optimizacija struktura posljednjih godina je sve popularnija tema u mašinstvu, građevini, aeronautici, rudarstvu, nuklearnom inženjeringu, ostalim inženjerskim disciplinama pa tako i u razvoju mikro-elektro-mehaničkih sistema. Struktura podrazumijeva određeni materijal koji je kompaktan i koji zauzima određenu formu da bi izvršavao zamišljenu funkciju. Na taj način struktura u mašinstvu i građevini podrazumijeva materijalnu formu koja treba da izdrži određena opterećenja. Cilj optimizacije struktura je poboljšanje funkcionalnosti, minimiziranje cijene koštanja ili ušteda vremena. Dok je kod mašinskih i građevinskih struktura cilj optimizacije u većini slučajeva minimizacija težine radi ušteda količine materijala a time direktno minimiziranje troškova. Kod mikro-elektro-mehaničkih sistema nema svrhu minimizacije težine jer su sami po sebi mikro tj. izrazito mali. Optimizacija strukture mikro-elektro-mehaničkih sistema koja ima za svrhu poboljšati performanse i funkcionalnost ovih uređaja optimizirajući strukture svakim danom nalazi sve više opravdanosti [1, 2].

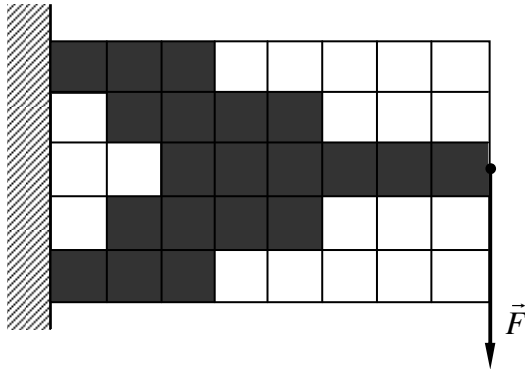
## 2. OPTIMIZACIJA STRUKTURA

Da bi mogli razumjeti optimizaciju strukture na mikro razini potrebno je razumjeti optimizaciju strukture na makro razini. Tri su kategorije optimizacije strukture a to su: optimizacija topologije, optimizacija oblika i optimizacija dimenzija strukture. Na slici 1 vidimo primjer područja moguće topologije mašinske ili građevinske strukture koja treba da nosi opterećenje u obliku sile na desnom kraju.



Slika 1: Područje mogućeg rasporeda materijala strukture

Ovisno od tog šta uzimamo kao funkciju cilja i kategoriju optimizacije dobijamo optimalno rješenje strukture. Funkcija cilja u optimizaciji struktura može biti minimiziranje težine, maksimiziranje krutosti strukture, maksimiziranje produktivnosti izrade, minimiziranje troškova izrade, itd. Moguće optimalno rješenje strukture korištenjem optimizacije topologije je dato na slici 2.



Slika 2: Optimalno rješenje strukture

Na slici 2 prikazana je optimizacija topologije strukture koristeći se principom optimizacije kontinuuma kojeg dijelimo na diskretna polja. Da bi se određena struktura mogla optimizirati potrebno je kvalitativne karakteristike strukture prevesti u kvantitativne vrijednosti pomoću kojih se može formirati matematički model čije se optimalne vrijednosti traže [3, 4].

Opći model svakog problema optimizacije dat je u sljedećem obliku:

$$\text{minimizirati } f(x)$$

sa ograničenjima

$$h(x)=0$$

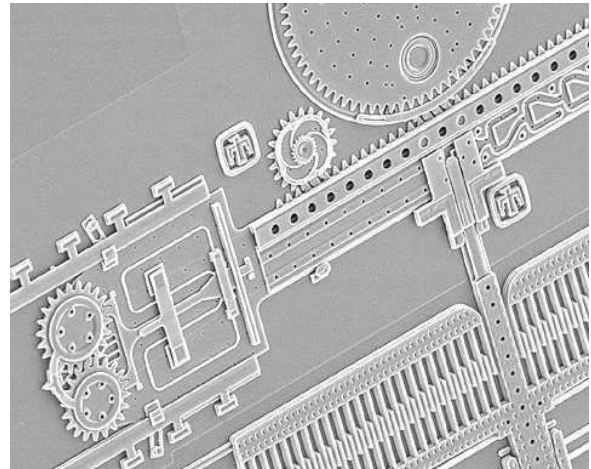
$$g(x)\leq 0$$

gdje je  $x$  varijabla,  $f(x)$  funkcija cilja,  $h(x)$  i  $g(x)$  ograničenja.

### 3. MIKRO-ELEKTRO-MEHANIČKI SISTEMI

Mikro-elektro-mehanički sistemi su građeni od mikrosenzora i mikroaktuatora koji mogu osjetiti njihovu okolinu i imaju mogućnost da reagiraju na promjene u okolini koristeći se upravljanjem mikrokrugovima. Oni ustvari predstavljaju integraciju mehaničkih elemenata, senzora,

aktuatora i elektronike na zajedničkom silicijskom supstratu korištenjem mikro-mašinske tehnologije.



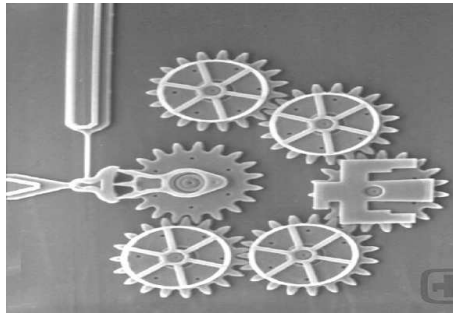
Slika 3: Mikro-elektro-mehanički sistemi [5]

Dimenzije MEMS uređaja većinom se kreću od 0,02 do 1 mm a dimenzije komponenata MEMS-a se kreću u granicama 0,001 do 0,1 mm.

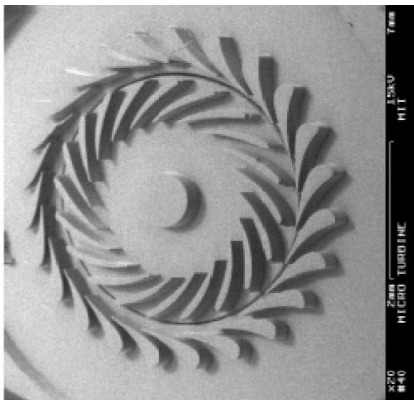
Njihov razvoj je krenuo upravo zahvaljujući razvoju tehnologije dobijanja integriranih krugova. Mikromehaničke komponente se proizvode korištenjem kompatibilnih mikrostrojnim procesa koji selektivno ugraviraju dijelove silicijskih podloga ili dodaju nove strukturalne slojeve za formiranje mehaničkih i elektromehaničkih uređaja.

Komercijalizacijom manje integriranih MEMS uređaja, kao što su mikroakcelerometri, glave inkjet printera, mikroogledala za projiciranje i njihovim uspjehom krenulo se predlaganju i izvedbi kompleksnijih MEMS uređaja. Njihov razvoj je krenuo u području mikrofluida, istraživanja svemira, biomedicini, kemijskoj analizi, bežičnim komunikacijama, čuvanju podataka, displejima, optici itd [6].

Mikroobrada je postala fundamentalna tehnologija za proizvodnju mikromehaničkih uređaja a posebno minijaturiziranih senzora i aktuatora. Mikroobrada silicija je najnaprednija tehnologija mikroobrade i daje mogućnost obrade MEMS-ova dimenzija u submilimetarskom opsegu. Koristeći ovu tehnologiju razvijaju se mnoge mikromehaničke strukture kao što su grede, dijafragme, utori, otvori, opruge, zupčanici, suspenzije itd, tako da MEMS-ove možemo zvat i mikromehanizmima. Primjeri mikromehanizama su prikazani na slici 4.



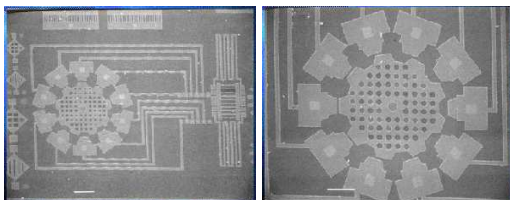
a) Prijenosni mehanizmi



b) Gasna turbina



c) Mikro rotor (u sredini) i stator

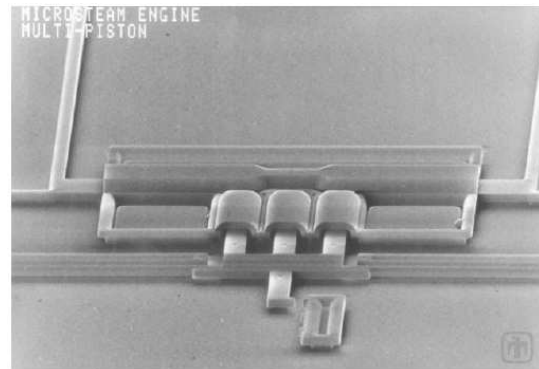


d) MEMS koračni motor [7]

*Slika 4: Primjeri MEMS-a*

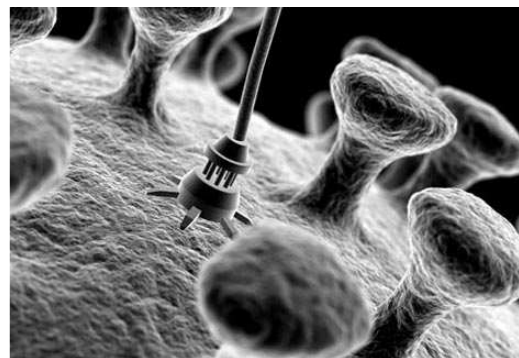
Na slici 5 vidimo uređaj na paru izveden pomoću MEMS tehnologije. Voda unutar tri kompresijska cilindra se zagrijava pomoću električne struje i isparava, izbijajući klip.

Kada se prekine dotok struje, kapilarne sile uvlače klip.



*Slika 5: MEMS - parni stroj*

Integracija mikrobrade i mikroelektronike na istom čipu rezultira dobijanjem pametnih senzora (smart sensors). Oni mogu uključivati mikrokontroler, procesor digitalnog signala, integrirani krugovi specifične namjene, komunikacije itd. Mikrobrada silicija referira se na formiranje mikroskopskih mašinskih dijelova van silicijskog substrata ili na silicijskom substratu postupcima kao što su depozicioniranje, litografija te jetkanje.



*Slika 6: Spuštanje na nivo nano tehnologije [8]*

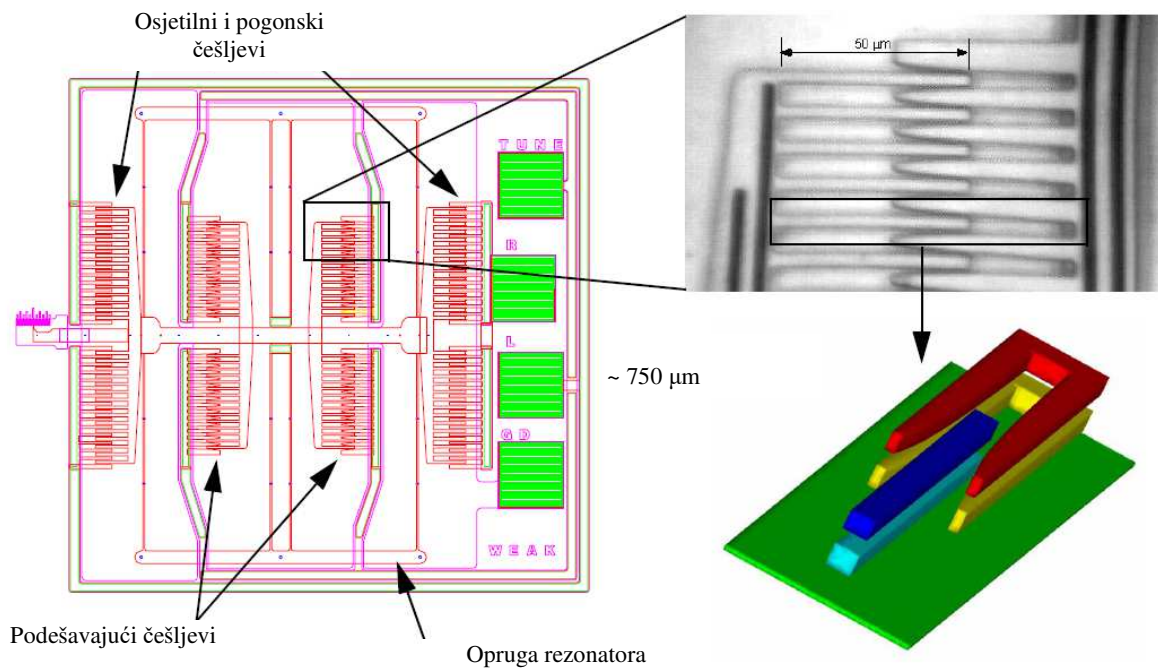
Na slici 6 vidimo budućnost razvoja MEMS tehnologija tj. težnja sa mikro na nano izvedbu.

### 3. OPTIMIZACIJA STRUKTURA MIKRO-ELEKTRO-MEHANIČKI SISTEMA

Poboljšanje performansi i funkcionalnosti određenih mikro-elektro-mehaničkih sistema može se postići optimizacijom strukture tog sistema. Ovdje ćemo navesti nekoliko karakterističnih primjera optimizacije strukture MEMS-a.

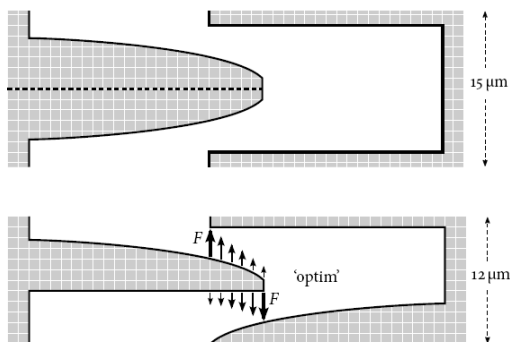
Elektrostatički češljevi su aktuatori koji su jedni od osnovnih gradbenih blokova mikro-elektromehaničkih sistema. Njihov princip rada je baziran na elektrostatičkoj sili koja se generira između polariziranih vodljivih ploča kada se jedna relativno kreće u odnosu na drugu. Radi jednostavne mogućnosti generiranja sile ima široku aplikaciju u mikroelektromehaničkim sistemima. Veliki broj ovih ploča čini strukturu koja liči češlju sa velikim brojem zuba ili prstiju.

Jednostavne aplikacije imamo kod mikrohvataljki, sonde za skeniranje, akcelerometri, pogonski mehanizmi rotacijskih uređaja, lateralno oscilirajući žiroskopi itd. Poboljšanje koja se mogu postići na ovom aktuatoru utiče na veliki broj MEMS proizvoda. Sila koja se generira i mjenja ovisno od promjene kapaciteta uvelike ovisi od oblika zuba ili prstiju češlja. Optimalan oblik prsta će davati optimalanu vrijednost sile.



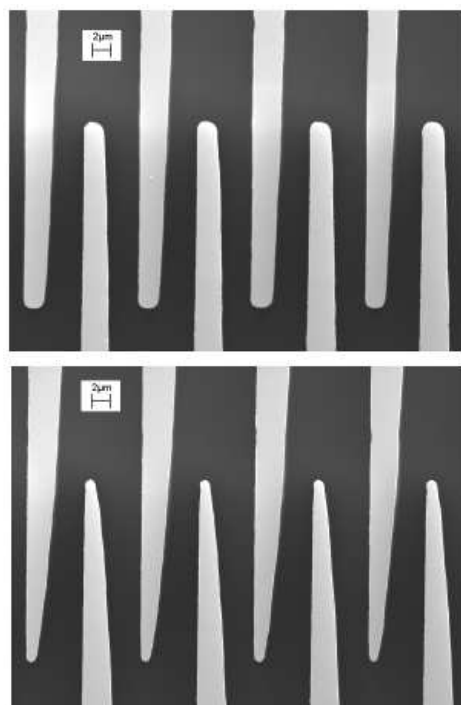
Slika 7: Prikaz podešavajućeg rezonatora – MEMS tehnologija [9]

Na slici 7 je prikazana primjena elektrostatičkih aktuatora, dok je na slici 8 prikazana primjena konačnih elemenata u optimizaciji zuba ili prstiju.



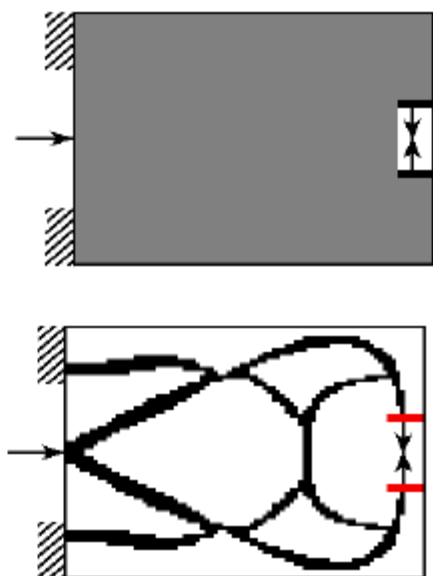
Slika 8: Analiza oblika zuba češljeva [10]

Na slici 9 je prikazan mikroskopski snimak početnog i optimalnog oblika zuba češlja.

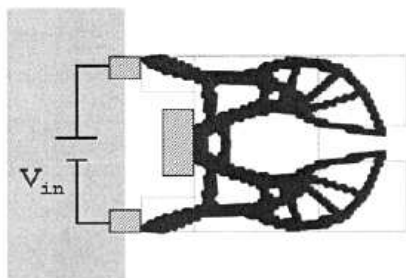


Slika 9: Mikroskopski snimak zuba češlja [10]

Primjer optimizacije mikromehaničke topologije je prikazan na sljedećoj slici gdje je prikazana mikrohvatalljka pokretana mehaničkom silom.



Slika 10: Optimizacija topologije mehaničke hvataljke



Slika 11: Elektrotermalna hvataljka [11]

Slika 11 prikazuje izvedbu optimalnog oblika elektrotermalnog aktuatora tj. hvataljke.

#### 4. ZAKLJUČAK:

Optimizacija struktura ima značajnu ulogu u procesu razvoja proizvoda kako na makro nivou tako i na mikro nivou, pa će najverovatnije imati svoju ulogu i na nano nivou razvoja. Kako smo prikazali u radu područja primjene su neograničena i moguća su u bilo kojoj oblasti inženjerskog rada od mašinstva, građevine pa do mikrotehnologija. Mikro-elektromehanički sistemi imaju već veliku primjenu u automobilima, hemijskoj industriji, u razvoju pametnih uređaja kao što su pametni telefoni ali njihov razvoj i budućnost će biti najznačajnija u medicini. Zbor karakteristika ljudskog tijela i mikro dijelova koje čine ljudski organizam kojima je teško pristupiti bez

invazivnog pristupa, upravo mikro sistemi i mikro mehanizmi tu pronalaze svoju opravdanost.

#### 5. LITERATURA

- [1] J. Arora: „Introduction to optimal design“, McGraw-Hill Book Company, New York, 1989.
- [2] M. Bandsoe: “Optimisation of structural Topology“, Shape and Material, Springer Verlag, 1995.
- [3] G. Vanderplaats: “Structural optimization – past, present, and future” AIAA Journal, vol.20, n.7, 1982. pp.992-1000.
- [4] Kirsch, U.: Structural Optimization—Fundamentals and Applications. Springer, Berlin (1993)
- [5] <http://www.agstech.net/html/mems-e10.html> (30.03.2014.)
- [6] Microelectromechanical systems MEMS [http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2081/books/2081\\_rel\\_title\\_varadan.pdf](http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2081/books/2081_rel_title_varadan.pdf) (25.03.2014.)
- [7] <http://www.mech.northwestern.edu/courses/descriptions/381-introduction-to-micro-electro-mechanical-systems.html> (20.03.2014.)
- [8] [http://nextgenlog.blogspot.com/2010\\_05\\_01\\_archive.html](http://nextgenlog.blogspot.com/2010_05_01_archive.html)(20.03.2014.)
- [9] B.D. Jensen, S. Mutlu, S. Miller, K. Kurabayashi, J. J. Allen, „Shaped Comb Fingers for Tailored Electromechanical Restoring Force“, Journal of microelectromechanical systems V.12, No. 3, 2003, pp. 373-383.
- [10] J. B. C. Engelen, „ Optimization of comb – drive actuators, doktorski rad, Digitalna verzija, Decembar 2010.
- [11] J. Li, „ Electrostatic Zipping actuators and their application to MEMS, doktorski rad, Digitalna verzija, Februar 2004.