

## KAPACITIVNI SENZOR SILE ZAGRIZA OD JESTIVIH MATERIJALA CAPACITIVE SENSOR OF BITE FORCE BASED ON EDIBLE MATERIALS

Elena Vrška, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

### Oblast – BIOMEDICINSKO INŽENJERSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu dat je predlog upotrebe, postupak pravljenja i testiranja pločastog kondenzatora tj. senzora zagriža napravljenog od jestivih materijala iz oblasti mikroelektronike. Upotrebjeni provodni materijali su zlato, srebro i aluminijum. Dat je uvid u način pravljenja 3D modela na Ultimaker 2+ 3D štampaču za potrebe testiranja. Rezultati su prikazani u grafičkoj formi, tabelarno i na osnovu ovoga doneti su određeni zaključci.

**Ključne reči:** mikroelektronika, provodni materijali, 3D model od PLA materijala, jestivi pločasti kondenzator, senzor zagriža.

**Abstract** – This work contains a proposal for use, a procedure for making and testing a plate capacitor, ie. bite sensor made of edible materials from the field of microelectronics. The conductive materials used are gold, silver and aluminum. An insight into how to make a 3D model on an Ultimaker 2+ 3D printer for testing purposes is given. The results are presented in graphical form, in tabular form and based on this, certain conclusions were made.

**Keywords:** microelectronics, conductive materials, 3D model of PLA material, edible plate capacitor, bite sensor.

### 1. UVOD

Osnovni zadatak ovog rada predstavlja upotrebu prirodnih ili biorazgradivih materijala za razvoj jestivih pločastih kondenzatora tj senzora zagriža, koji mogu potencijalno biti primenjivani u zdravstvene svrhe konkretno u stomatologiji. Sila zagriža se široko koristi u stomatologiji za razumevanje mehanike žvakanja, procenu terapijskih učinaka protetskih uređaja i pružanje referenci za biomehaniku protetskih uređaja. Sila zagriža se takođe koristi za procenu žvakaće funkcije kod pacijenata pre i posle ortognatske operacije. Takođe sila zagriža korišćena je za proveru veze između lošeg zdravlja zuba dece i uticaja koji može imati na njihov kvalitet života. Do danas je razvijen veliki broj senzora za merenje sile zagriža pacijenta da pomogne stomatolozima da izvrše potpunu analizu na svojim pacijentima. Za ljude, maksimalna sila zagriža (tipično 600 – 800 N) jedan je od pokazatelja zdravlja sistema za žvakanje. Sila zagriža proističe iz delovanja mišića otvaranja vilice [1], [2], [3].

### NAPOMENA:

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Goran Stojanović, red. prof.**

Pokazalo se da je merenje maksimalne dobrovoljne sile zagriža važan pokazatelj zdravlja zuba, mišića vilice i temporomandibularnog zgloba. Iako se maksimalne sile zagriža opsežno mere u istraživačkim studijama skoro 40 godina, one se još uvek ne koriste rutinski za kliničku procenu. To je uglavnom zato što je većina senzora sile zagriža izrađena po meri za istraživačke studije, a nekoliko komercijalno dostupnih pretvarača nije potvrđeno za rutinsku kliničku upotrebu. Komercijalno dostupan pretvarač koji je validiran za rutinsku kliničku upotrebu je sistem T-Scan III, koji beleži raspodelu relativnih sila oko reda zuba tokom stiskanja, međutim ne beleži apsolutne sile. Dva važna faktora u dizajnu pretvarača sile zagriža su veličina površine zuba koju podržava sonda i debljina sonde. Za procenu snage mišića vilice, idealan pretvarač bi podržao čitav niz zuba. Drugi važan faktor je debljina pretvarača, gde se govori da bi idealni pretvarač trebao biti što tanji. Takođe meki jestivi senzori će tek biti prilagođeni i kreirani za prikupljanje podataka za naučna istraživanja ljudi i drugih životinja, kako bi se ova oblast što više unapredilo [1], [3], [4].

### 2. IZRADA SENZORA ZAGRIZA OD JESTIVIH MATERIJALA I NANOŠENJE PROVODNIKA

Najpre će biti predstavljena vrsta trakice (slika 1.) koje se sada koristi u stomatologiji za merenje sile zagrižaja, nije napravljena od jestivog materijala i stvara neprijatan osećaj pri korišćenju. U ovom poglavlju biće predstavljeni senzori zagriža napravljeni od jestivih materijala, koji bi se koristili kao zamena za pomenute modele trakica (koje se u stručnoj terminologiji zovu artikulacioni papir).



Slika 1. Prikaz modela trakice koja se sada koristi u stomatologiji.

Prvo će biti predstavljeni jestivi materijali od kojih je uspeo da se napravi pločasti kondenzator tj. senzor zagriža. Uzimajući u obzir željenu gumastu strukturu prvi korak je vodio ka gumenim bombonama, međutim ovo se nije pokazalo kao dobro rešenje, struktura je bila lepljiva i nije mogla da se iseca. Sledeći pokušaj pravljenja senzora za zagriz je pravljenje smese od želatina i kečapa. Ovo bi predstavljano slanu varijantu jestive smese. Iako su na prvi pogled senzori napravljeni od želatina i kečapa ispali poprilično dobro i trebalo ih je uvrstiti u uspele pokušaje,

nakon nanošenja provodnih materijala na senzore došlo je do neželjene reakcije i merenja nisu mogla da se izvršavaju na pomenutim sensorima. Nanošenje provodnih materijala će biti podrobnije opisano u daljem tekstu ovog rada.

Dalja istraživanja sa gumenim strukturama su bila uspešnija, jer su se obzir uzeli i materijali čvršće strukture. Uspešno napravljeni senzori zagriža od jestivih materijala su: senzor napravljen od gumenih bombona i fondana debljine 3 mm, senzor napravljen od komercijalnog fondana debljine 3mm i 5 mm, senzor napravljen od ratluka i šećera u prahu debljine 3 mm, senzor napravljen od sira, brašna i fondana debljine 3 mm i senzor napravljen od džema i želatina debljine 3 mm.

Postupak izrade biće predstavljen kroz primer senzora napravljenog od džema i želatina. Kesica želatina (10 g) se istrese u činijicu i u to se dodaju 3 velike kašike vode. Sačeka se desetak minuta. Dok čekamo, pripremimo kalup za izlivanje smese. Kalup je napravljen od aluminijske folije dimenzija 30 x 15. Ove dimenzije su dovoljne da se napravi kalup iz kojeg mogu da se iseku tri modela senzora. Ivice aluminijske folije je potrebno podići sa svake strane kako istopljena smesa ne bi curila iz kalupa pri izlivanju. Nakon desetak minuta smesa je spremna za kuvanje, jedino na šta treba obratiti pažnju je da želatin ne proključa, treba ga zagrejavati do tačke ključanja i u njega dodati 60 g džema. Za svega nekoliko minuta smesa se u potpunosti sjedini i istopi i može se izliti u prethodno pripremljeni kalup. Korišćen je komercijalni džem od šipuraka, ali može bilo koji po izboru. Nakon sjedinjavanja sastojaka smesa se izlije u prethodno napravljeni kalup od aluminijske folije i odloži se u frižider kako bi se sve steglo na 12h. Nakon 12 h smesa je spremna za isecanje skalpelom (slika 2).



Slika 2. Prikaz isecanja senzora zagriža po modelu.

Nakon isecanja dobijaju se 3 senzora zagriža debljine 3 mm (slika 3).



Slika 3. Prikaz finalnih senzora zagriža napravljenih od želatina i džema, debljina 3 mm.

Prednost ove metode je u tome, što sa jedne strane senzora je odmah nalepljena aluminijska folija kao provodnik. Naravno ostavljena je samo na jednom

senzoru a skinuta je sa ostala dva, kako bi se kasnije na njih mogli naneti provodnici od srebra i 24k zlata.

Nakon praktičnog pravljenja senzora zagriža usledilo je nanošenje provodnih materijala na uspešno napravljene senzore zagriža. Listići zlata (Au), srebra (Ag) i aluminijuma (Al), su provodnici koji su korišćeni i lepljeni sa obe strane pločastog kondenzatora odnosno senzora zagriža za čitav niz zuba. Kako bi senzor zagriža koji je napravljen od jestivih materijala bio pogodan za testiranje u laboratoriji, ova faza je bila neophodna.

Belance je korišćeno za potrebe lepljenja provodnih materijala na jestive senzore zagriža. Za senzore zagriža napravljene od želatina i džema kao i senzore od želatina i kečapa nije bilo potrebno koristiti jestivi lepak. Samo površina ovih senzora je bila dovoljno lepljiva i na nju su se trakice zalepile odmah. Ovaj postupak lepljenja primenjen je na sledeći način: od svih materijala koji su uspešno napravljeni je po tri primerka, na svaki materijal iste strukture nalepljeni su provodnici od zlata, srebra i aluminijske folije. Napravljeni su 7 različitih uzoraka od svakog po 3 primera sa tri različita provodnika, ukupno 21 senzor (slika 4.). Naravno treba napomenuti da je nanošenje provodnika urađeno i za senzor zagriža napravljen od želatina i kečapa, ali tek kasnije kada je došlo do neželjene reakcije, ovaj senzor nije uspeo da dođe do faze testiranja u laboratoriji.



Slika 4. Izgled svih pločastih kondenzatora tj senzora zagriža nakon nanošenja provodnika od zlata (Au), srebra (Ag) i aluminijuma (Al).

### 3. IZRADA MODELA ZA TESTIRANJE 3D PRINTEROM

3D model je pravljen kako bi na celoj površini senzora zagriža bila jednaka primenjena snaga. Pravljenje modela je urađeno pomoću 3D štampača tipa Ultimaker 2+. Najpre je 3D datoteka iz Autocada sačuvana sa ekstenzijom .stl datoteka a ova datoteka je učitana u programu Ultimaker Cura, koji služi za sečenje i u osnovi 3D dizajn pretvara u seriju naredbi mašinskog koda koje 3D štampaču govore kako da se kreće i napravi željeni dizajn. 3D modeli su napravljeni od crnog PLA (PolyLactic Acid) materijala sa popunjenošću od 100%. Prečnik brizgaljke štampača podešen je na 0.6 mm. Napravljeni su dva jednaka 3D modela pločastog kondenzatora, kako bi se omogućilo ravnomerno raspoređivanje sile sa obe strane senzora zagriža (slika 5).



Slika 5. Izgled 3D modela pravljeno po dimenzijama i obliku pločastog kondenzatora.

#### 4. TESTIRANJE SENZORA ZAGRIZA

Na senzore zagrizu pre samog merenja lepile su se dodatne aluminijumske trakice sa obe strane, kako bi se omogućio bolji i stabilniji donji deo senzora gde će se kasnije stavljati elektrode. Lepljenje je vršeno uz pomoć provodnog epoksida, sjedinjavanjem uz pomoć spatule (slika 6).



Slika 6. Prikaz izgleda sjedinjenog provodnog epoksida na levoj strani slike i primer zalepljene aluminijumske trakice na uzorak pomoću provodnog epoksida sa desne strane.

Nakon završenog prvog koraka pripreme uzoraka vršena je priprema mernih aparata korišćenih za primenu sile i merenje promene kapacitivnosti na osnovu primenjene sile na uzorak. Eksperimentalni metod je bio sledeći: određeni uzorak je stavljen na već pričvršćen 3D model na uređaju za pretvaranje sile, nakon toga na uzorak su postavljene elektrode koje su drugim delom povezane na uređaj za merenje kapacitivnosti. Pri svakoj primeni sile u rasponu od 50 do 800 N sa korakom 50 N i trajanjem od 30 s merena je kapacitivnost koja je beležena sa strane za svaku primenjenu silu. Postupak merenja je uspešno primenjen nad 6 od ukupno 21 uzorak. Većina uzoraka sa provodnicima od zlata ili srebra nisu imali validno očitavanje ili je, u nekim slučajevima, došlo do kratkog spoja pa samim tim nije moglo da se izvrši merenje. Na slici 7 je prikazan primer merenja kapacitivnosti uz pomoć uređaja Keysight model U1733C pri primeni određene sile uz pomoć uređaja Instron model 34SC – 2, na senzoru zagrizu od fondana debljine 3 mm sa provodnikom od aluminijuma.



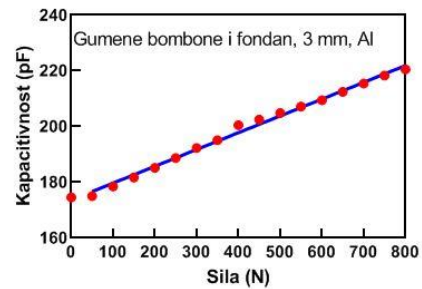
Slika 7. Prikaz merenja kapacitivnosti uzorka zagrizu od fondana, debljine 3 mm sa provodnikom od Al.

Pored ovih merenja izvršeno je i in vivo merenje. Postupak: senzor zagrizu napravljen od džema i želatina, debljine 3 mm sa provodnikom od aluminijuma potopljen je u veštačku pljuvačku na 5 minuta. Nakon završenog potapanja na uzorak su postavljene elektrode koje su bile priključene na uređaj za merenje kapacitivnosti. Uzorak je stavljen u čistu vakum kesu, kako bi testiranje na čoveku bilo u potpunosti sterilisano.

#### 5. REZULTATI TESTIRANIH SENZORA ZAGRIZA

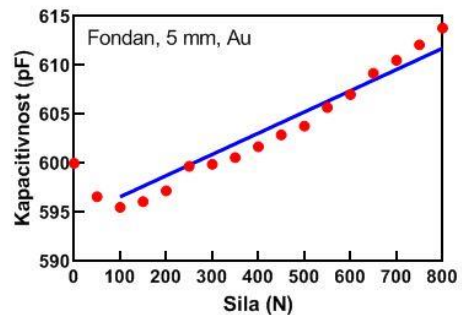
Rešenja testiranih pločastih kondenzatora tj. senzora zagrizu kreirani su i uređivani u programu GraphPad Prism 9. U program je bilo potrebno uneti vrednosti na x osi, koje su predstavljale očitane vrednosti sile predstavljene u N. Dok je y osa predstavljala kapacitivne vrednosti u pF ili nF očitane pri primeni sile. Dobijeni rezultati su predstavljani na graficima jedan po jedan, izabrana su četiri najbolja rezultata, takođe su prikazani i rezultat in vivo merenja. Svaki uzorak će biti prikazan na graficima sa linearnom aproksimacijom.

Na grafiku 1 prikazan je rezultat senzora zagrizu napravljenog od gumenih bombona i komercijalnog fondana debljine 3 mm sa provodnikom od aluminijuma (Al).



Grafik 1. Prikaz grafika uzorka napravljenog od gum. bombona i fondana, debljina 3 mm, Al sa linearnom aprok. Jednačina lin. aprok.:  $Y = 0.06029 * X + 173.7$ .

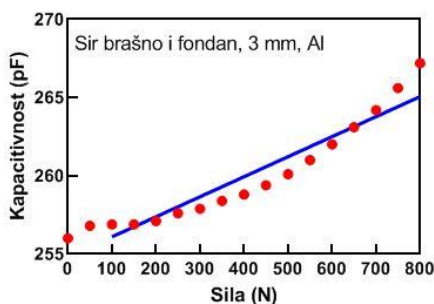
Na grafiku 2 je prikazan rezultat senzora zagrizu napravljenog od komercijalnog fondana debljine 5 mm sa provodnikom od zlata (Au).



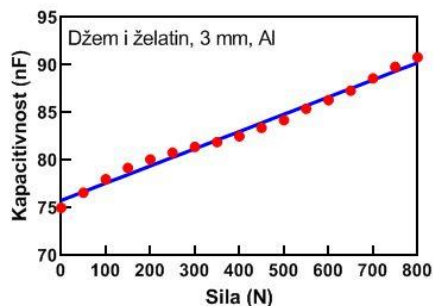
Grafik 2. Prikaz grafika uzorka napravljenog od fondana, debljina 5 mm, Au sa linearnom aprok. Jednačina lin. aprok.:  $Y = 0.02165 * X + 594.4$ .

Na grafiku 3 prikazani su rezultati senzora zagrizu napravljenog od sira, brašna i fondana debljine 3 mm sa provodnikom od aluminijuma (Al).

Na grafiku 4 prikazani su rezultati senzora zagrizu napravljenog od džema i želatina debljine 3 mm sa provodnikom od aluminijuma (Al).



Grafik 3. Prikaz grafika uzorka napravjenog od sira brašna i fondana, debljina 3 mm, Al sa linearnom aprok. Jednačina lin. aprok.:  $Y = 0.01280 \cdot X + 254.8$ .



Grafik 4. Prikaz grafika uzorka napravjenog od džema i želatina, debljina 3 mm, Al sa linearnom aprok. Jednačina lin. aprok.:  $Y = 0.01807 \cdot X + 75.79$ .

Na grafiku 5 prikazani su rezultati in vivo merenja na senzoru zagrizava napravjenog od džema i želatina debljine 3 mm sa provodnikom od aluminijuma (Al).



Grafik 5. Prikaz grafika uzorka napravjenog od džema i želatina, debljina 3 mm, Al sa linearnom aprok. in vivo.

Nakon prikazivanja svih senzora zagrizava i njihovih vrednosti na pojedinačnim graficima za svaki senzor izračunata je senzitivnost pomoću formule:

$$\Delta S = \frac{(C2 - C1)}{(F2 - F1)}$$

Gde F2 predstavlja maksimalnu silu koja je primenjena na određeni senzor, F1 predstavlja vrednost sile kada počne linearno da raste kapacitivnost, C2 predstavlja vrednost kapacitivnosti na maksimalnoj primenjenoj sili a C1 predstavlja kapacitivnost kada ona kreće linearno da raste pri primeni određene sile.

Rezultati izračunati za svaki senzor pojedinačno predstavljani su u tabeli 1.

Tabela 1. Prikaz rezultata izračunatih vrednosti senzitivnosti svakog senzora pojedinačno

Senzor zagrizava	Gum. bon. i fondan, 3 mm, Al	Fondan, 3 mm, Al	Fondan, 5 mm, Al	Fondan, 5 mm, Au	Ratluk, 3 mm, Al	Sir, brašno, fondan, 3 mm, Al	Džem i želatin, 3 mm, Al
$\Delta S$	$0.06 \frac{pF}{N}$	$0.01 \frac{pF}{N}$	$0.07 \frac{pF}{N}$	$0.03 \frac{pF}{N}$	$0.96 \frac{pF}{N}$	$0.02 \frac{pF}{N}$	$0.02 \frac{nF}{N}$

Ako rezultate posmatramo iz ugla senzitivnosti može se zaključiti da je najveća senzitivnost uočena na pločastom kondenzatoru tj. senzoru zagrizava napravjenog od ratluka debljine 3 mm sa prvodnikom od aluminijuma. Senzori koji imaju najmanju senzitivnost, u ovom slučaju senzor napravjen od fondana debljine 3 mm sa provodnikom od Al, senzor napravjen od sira, brašna i fondana debljine 3 mm sa Al i senzor napravjen od džema i fondana debljine 3 mm sa prvodnikom od Al su pokazali da su najizdržljiviji i da imaju najbolje performanse za praktičnu primenu u praksi.

## 6. ZAKLJUČAK

Tema ovog rada bila je da se analiziraju pločasti kondenzatori tj. senzori zagrizava napravljeni od različitih jestivih materijala i sa različitim provodnim materijalima (Au, Ag i Al). Najbolji provodni materijal korišćen u ovom radu je Al. Kada se posmatraju finalni grafici može se zaključiti da je najbolje performanse i rezultate imao senzor napravjen od džema i želatina debljine 3 mm sa provodnikom od Al. Ovaj senzor je iz tih razloga korišćen i u in vivo merenju, gde je takođe pokazao odlične performanse.

## 7. LITERATURA

[1] Sibong Cheng, Baohong Chen, Yuan Zhou, Minglong Xu, Zhigang Suo, 2019, "Soft sensor for full dentition dynamic bite force", Xi'an 710049, PR China, Cambridge, MA 02138, USA.

[2] Srivani Padma, Sharath Umesh, Sundarajan Asokan, Talabattula Srinivas, "Bite force measurement based on fiber Bragg grating sensor", J. Biomed. Opt. 22(10), 107002 (2017), India.

[3] Jarred Fastier-Wooller, Hoang-Phuong Phan, Toan Dinh, Tuan-Khoa Nguyen, Andrew Cameron, Andreas Öchsner and Dzung Viet Dao, 2016, "Novel Low-Cost Sensor for Human Bite Force Measurement", Griffith University, Queensland 4111, Australia.

[4] G. S. THROCKMORTON, J. RASMUSSEN and R. CALOSS, Journal of Oral Rehabilitation 2009, "Calibration of T-Scan\_ sensors for recording bite forces in denture patients", The University of Texas Southwestern Medical Center at Dallas, TX, USA.

## Kratka biografija:



**Elena Vrška** rođena je u Novom Sadu 1997. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektronike, odbranila je 2020. god. na temu "Izrada i testiranje LC elektronskih kola baziranih na jestivim materijalima".