



HETEROGENO INTEGRISANI KAPACITIVNI SENZOR ZA ODREĐIVANJE SILE NA STOPALIMA

HETEROGENEOUSLY INTEGRATED CAPACITIVE SENSOR FOR DETERMINING THE FORCE ON THE FEET

Teodora Kostić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu je prikazano projektovanje, fabrikacija i testiranje kapacitivnih senzora sila. Realizovana su dva tipa heterogenih senzora korišćenjem PCB tehnologije, 3D tehnologije, provodnog tekstila i silikonske gume Ecoflex. Određene su karakteristike fabrikovanih senzora pri delovanju mase do 50kg, a nakon toga su tri ispitanika testirala senzore u dva različita stanja, sedenja i stajanja.

Ključne reči - Kapacitivni senzori sile, stopalo, 3D tehnologija, provodni tekstil, PCB tehnologija

Abstract – This paper presents the design, fabrication, and testing of capacitive force sensors. Two types of heterogeneous sensors were realized using PCB technology, 3D technology, conductive textile, and silicone rubber Ecoflex. The characteristics of the manufactured sensors were determined under the action of a mass of up to 50 kg, and after those three examinees tested the sensors in two different states, sitting and standing.

Keywords: Capacitive force sensors, foot, 3D technology, conductive textile, PCB technology

1. UVOD

Potreba za korišćenjem sve većeg broja senzora u oblasti medicine i sporta dovela je do digitalizacije medicinskih uređaja. Pojava IoT-a (eng. *Internet of Things*) je doprinela ubrzanju digitalizacije, koja podrazumeva prikupljanje i analizu podataka, dobijenih u realnom vremenu. Cilj primene ovakvih uređaja je mogućnost njihove svakodnevne upotrebe uz daljinsko praćenje nadležnog medicinskog osoblja.

Jedan od najčešće korišćenih senzora sila su kapacitivni senzori. Njihova kapacitivnost se može menjati pri spoljašnjim mehaničkim stimulansima [1]. Najjednostavniji kapacitivni senzori se sastoje od dve elektrode između kojih se nalazi dielektrični sloj, a do promene kapacitivnosti može doći pri promeni površine elektroda, njihovog međusobnog rastojanja, ali i karakteristika dielektričnog sloja.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Milica Kisić, docent.

2. ANALIZA LJUDSKOG HODA

Plantarni pritisak je pritisak koji se vrši između donja i potporne površine. Merenje plantarnog pritiska pruža ključne informacije o ljudskom zdravstvenom stanju.

Ljudski hod zahteva koordinaciju nervnog i mišićno-skeletnog sistema kako bi se obezbedila ravnoteža tokom kretanja. Može se proučavati zbog njegove ciklične prirode, koja je u literaturi poznata kao „ciklus hoda” [2]. Ovo stanje omogućava identifikaciju normalnih i patoloških obrazaca. Za početak ciklusa hoda se uzima momenat kada klataća noga udari petom o podlogu. Ciklus se završava kada ista noga ponovo udari petom o podlogu.

Za vreme jednog ciklusa hoda, svaka noga prolazi kroz dve glavne faze: faza oslonca i faza njihanja (klačanja). Ciklus hoda se može definisati kao interval između dve uzastopne radnje koje se ponavljaju tokom hoda.

Nedavni razvoj u tehnologijama IoT unapređuje i poboljšava kvalitet zdravstvene zaštite i biomedicinske oblasti. Proučavanjem obrazaca pritiska i ciklusa rada hoda pomoću „pametnih” uložaka sa ugrađenim sensorima sile postiže se efikasnije, fleksibilnije i preciznije prikupljanje informacija o funkcionalnosti stopala, ali i zdravstvenom stanju ispitanika.

3. DIZAJN SENZORA ZA MERENJE MASE/SILE

U ovom radu je predložen kapacitivni senzor za merenje sile na stopalima. Senzor se sastoji od dve elektrode između kojih se nalazi odstoynik koga čine dva polucilindra, odnosno brazde.

Projektovana su dva senzora. Kod jednog su elektrode čvrste, nesaviljive i izrađene u tehnologiji štampanih ploča (eng. *Printed Circuit Board*, PCB). Deo prostora između dve elektrode je ispunjen vazduhom.

Kod drugog senzora je jedna elektroda savitljiva i naleže na odstoynik, pa je između elektroda prostor ispunjen dielektrikom. Ta savitljiva elektroda je izrađena od komercijalno dostupnog provodnog tekstila.

Poprečni preseci oba senzora prikazani su na slikama 1 i 2.



Slika 1. Poprečni presek senzora sa PCB elektrodama



Slika 2. Poprečni presek senzora sa tekstilnom elektrodom

3.1. Izrada odstoynika

Odstoynik je izrađen korišćenjem Ecoflex-a [3]. Ecoflex su silikonske gume i mogu se koristiti, na primer, za izradu uložaka u ortopediji.

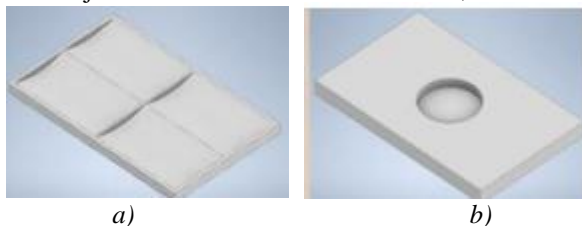
U početku predstavljaju tečnost od dve komponente, pri čemu je prvi (A) osnovni deo, a drugi (B) inicijator polimerizacije. Mešaju se u razmeri 1A:1B po težini ili zapremini. Nakon što ih pomešamo, potrebno je tu homogenu smesu da ubacimo u odgovarajuću modlu i ostaviti da materijal očvrstne i dobije oblik modle.

3.2. Dizajn modle urađen putem 3D tehnologije

Kako bismo izradili specifičan dizajn odstoynika, bilo je potrebno da izradimo modlu pomoću 3D štampača [4]. 3D štampači omogućavaju dizajnerima da pređu direktno od konceptnih ideja i dizajna do fizičkih modela.

Za izradu je korišćena tehnologija istopljenog filameta. Objekat se kreira nanošenjem sloja po sloj materijala, polimera, poznatog kao filament.

3D dizajn modle je prikazan na slici 3a. Izrađene su 3 modle različitih dimenzija, odnosno visina centra brazde. Dimenzije visine centra brazde iznose 2mm, 3mm i 5mm.

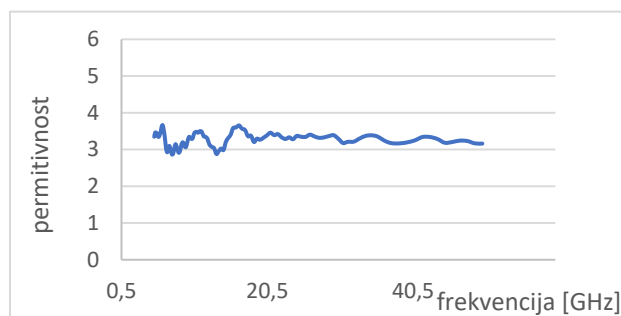


Slika 3. 3D prikaz a) odstoynika, b) modela postolja

Za testiranje senzora koristila se šipka na kojoj su ređani tegovi, tako da je bilo neophodno dizajnirati i izraditi postolje kao držač šipke. Postolje na sredini ima otvor koji odgovara prečniku šipke, slika 3b. Iste je površine kao i površina senzora, tj. elektroda, kako bi se sila rasporedila uniformno po celoj površini senzora.

3.3. Permitivnost odstoynika

Keysight 85070E [5] je set pomoću kojeg se može odrediti permitivnost mnogih materijala u širokom frekventnom opsegu. Za merenje je podešen frekvencijski opseg od 500 MHz do 50 GHz. Nakon toga se vrši kalibracija kroz tri različite sredine. Prva je vazduh, gde je kraj probe otvoren, druga predstavlja kratak spoj i treća podrazumeva da se proba ubaci u vodu na poznatoj temperaturi.



Slika 4. Zavisnosti permitivnosti od frekvencije odstoynika od 5cm

Merenja su pokazala da je permitivnost oko 3.2 što je predstavljeno na slici 4. Dobijeni rezultati se poklapaju sa podacima koji su dati u specifikaciji Ecoflex-a.

4. FABRIKACIJA SENZORA

Za izradu elektroda dva tipa kapacitivnih senzora su korišćeni: provodan tekstil i PCB tehnologija.

4.1. PCB tehnologija

Prilikom izrade, od jednog velikog komada ploče na kojoj se nalazi sloj bakra, odsekli smo dva ista oblika koja nam predstavljaju dve elektrode. Izvučene su žice, odnosno kontakti, sa obe elektrode radi povezivanja mernog instrumenta sa senzorom. Na slici 5 prikazan je sklopljen senzor sa PCB elektrodama dimenzija 50mm × 80 mm.



Slika 5. Prikaz dobijenog senzora sa PCB elektrodama

4.2. Provodni tekstil

Kombinacija tekstilnih i Ecoflex materijala može da obezbedi kreiranje senzora koji su udobni, izdržljivi i koji reaguju na pokrete i pritisak stopala.



Slika 6. Prikaz tekstilne trake i prikaz sklopljenog senzora sa postoljem spremnim za merenja

Za izradu jedne (gornje) elektrode senzora, korišćen je komercijalni provodan tekstil. Kao što je prikazano na slici 6, izvučen je kontakt sa tekstilne elektrode kako bi se senzor povezao na merni instrument. Druga elektroda je realizovana u PCB tehnologiji. Elektrode su pravougaonog oblika dimenzija 50mm × 80 mm između kojih se stavlja odstoynik.

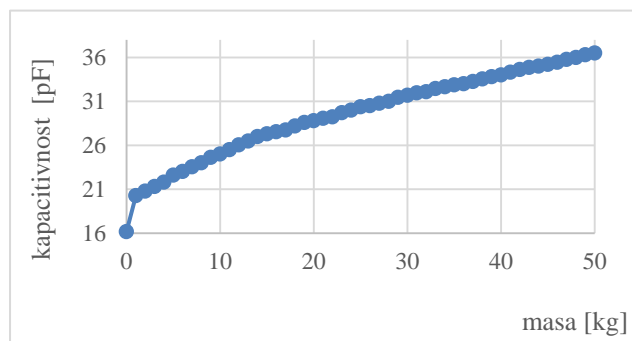
5. TESTIRANJE SENZORA

Kako bi se dobio što veći merni opseg sile, prvo se testiranje senzora vršilo nad senzorom debljine odstoynika od 5mm. Za testiranje se koristio merni instrument 4277A LCZ METER [6]. Izabrana je frekvencija 1MHz. Nakon podešavanja instrumenta, povežujemo i senzor.

Kao što je rečeno, tegove koristimo za delovanje različitih opterećenja. Pored tegova, za testiranje se koristi i šipka na kojoj se ređaju tegovi. Merenja su rađena do 50 kg.

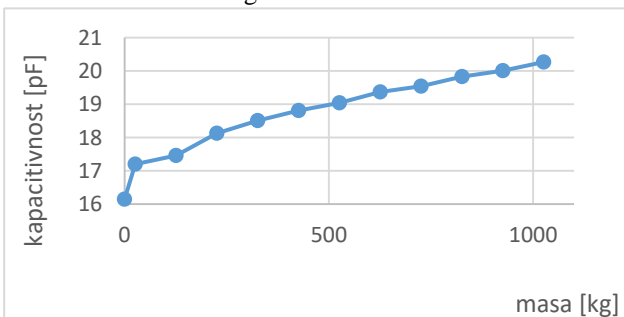
5.1. Testiranje senzora sa PCB elektrodama

Najpre je testiranje rađeno do 50kg sa različitim kombinacijama tegova kako bi se dostigla željena težina. Odrađena su merenja u 50 tačaka u koracima od 1 kg, što je prikazano na slici 7. Korišćen je odstojnik debljine od 5mm.



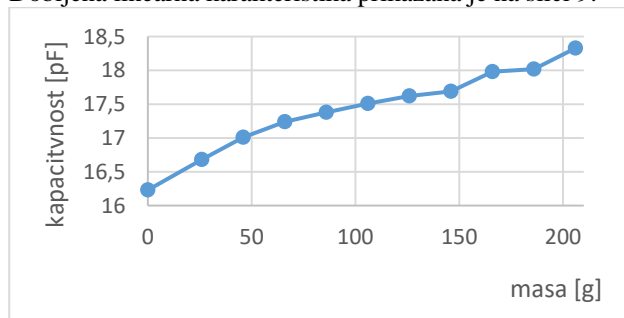
Slika 7. Zavisnost kapacitivnosti od mase do 50kg

Kao što je i očekivano, kako su se dodavali kilogrami, tako je kapacitivnost senzora rasla. Dakle, za 50kg je izmerena i najveća kapacitivnost. Primetna je brža promena u opsegu od 0kg do 1kg, te je shodno tome odlučeno da se izvrši posebno merenje u tom opsegu sa korakom od 100g. Prilikom ovog testiranja se nisu koristili tegovi iz razloga što nam njihova težina nije odgovarala, već se koristila voda. U praznoj flaši se dodavala voda od 100g.



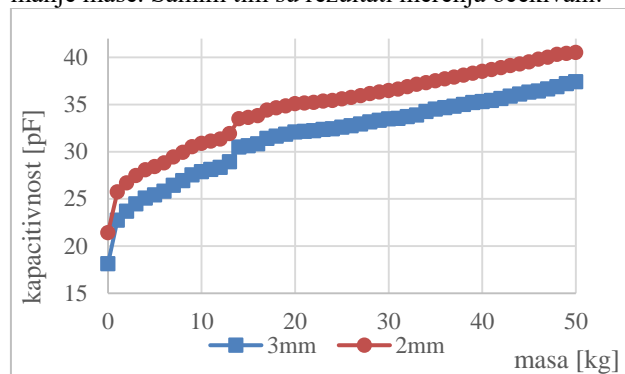
Slika 8. Zavisnost kapacitivnosti za mase do 1kg

Kako je opet pokazano na slici 8, da u jednom delu karakteristike imamo veći skok nego u ostatku, odlučeno je da se uradi još detaljnije merenje. Ovog puta je korak bio 20g, ista flaša se koristila, u opsegu od 0g do 200g. Dobijena linearna karakteristika prikazana je na slici 9.



Slika 9. Zavisnost kapacitivnosti za mase do 200g

U početnom trenutku pri malim silama, menja se oblik odstojnika. Samim tim će se deo vazdušnog procepa popunjavati Ecoflex-om. Nakon toga, kada odstojnik se poravna i elektrode u potpunosti nalegnu na njega, menja se samo rastojanje između elektroda pri delovanju većeg opterećenja. To je razlog zašto je senzor najosetljiviji za manje mase. Samim tim su rezultati merenja očekivani.

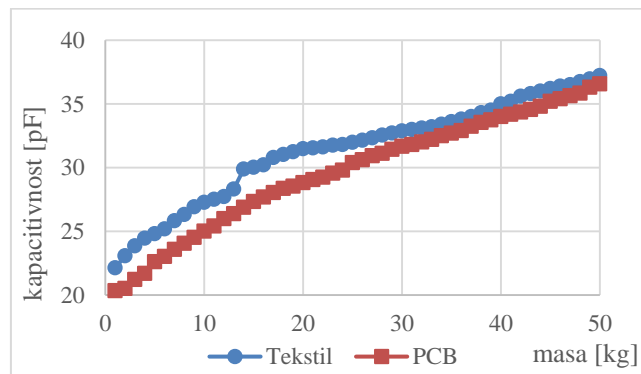


Slika 10. Zavisnost kapacitivnosti u odnosu na masu do 50kg

Takođe, i za odstojnike od 2mm i 3mm su odrađena merenja do 50kg, što je i prikazano na slici 10.

5.2. Testiranje senzora sa tekstilnim elektrodama

I kod ovog senzora, koristi se odstojnik kao i kod prethodnog senzora, samo što ovog puta na njega elektroda naleže i prati oblik odstojnika. Postupak testiranja je odrađen na identičan način kao i prilikom korišćenja PCB elektroda. Senzori su testirani za masu do 50kg, ali su pokazali najveću osetljivost za male mase do 1kg i 200g, pa se u tom opsegu mogu koristiti kod na primer, malih, preciznih vaga.



Slika 11. Zavisnost kapacitivnosti u odnosu na masu do 50kg

Na slici 11 su objedinjeni rezultati obe vrste senzora za debljinu odstojnika od 5mm. Može se uočiti da su veće vrednosti kapacitivnosti dobijene korišćenjem tekstila pri manjim silama, a nakon što odstojnik dobije isti oblik, krive se poklapaju.

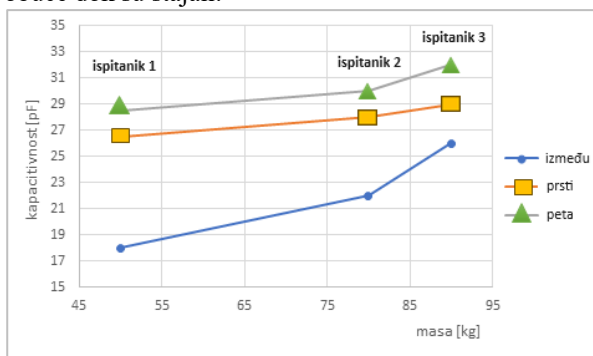
5.3. Testiranje senzora pri sedenju i stajanju

Nakon određivanja karakteristika, senzori su postavljeni ispod obuće ispitanika. Tokom testiranja su posebno razmotrene oblasti koje pružaju najviše informacija, a to

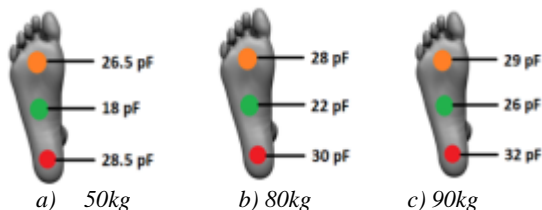
su oblasti kod prstiju, peta i regija između. Analizom raspodele opterećenja u ovim oblastima, medicinski profesionalci mogu da identifikuju i prate patologije kao što su razni deformiteti.

Da bi se analiziralo ponašanje senzora u odnosu na silu se deluje u kontrolisanim uslovima. U testiranju su učestvovala tri osobe sa različitim brojem kilograma. Uslovi ispitivanja su bili takvi da se prvo merila kapacitivnost ispitanika kada nalegne senzor na prstima, zatim u središnjem delu stopala i na peti. Postupak je podrazumevao i kada su ispitanici u sedećem položaju i u položaju stajanja.

Pri testiranju korišćen je heterogeni senzor sa PCB elektrodama. Odstojnik je debljine od 5mm. Na slici 12 je prikazano testiranje kada su ispitanici u sedećem položaju. Na slici 12 može se videti da je povećanje vrednosti kapacitivnosti direktno proporcionalno težini. Ispitanik 1 ima 50kg, ispitanik 2 ima 80kg i ispitanik 3 ima 90kg. Kao što je očekivano, najveći pritisak je na peti, zatim kod prstiju i najmanji u regiji između, slika 13. Nakon toga, ispitanicima su senzori postavljeni ispod obuće dok su stajali.

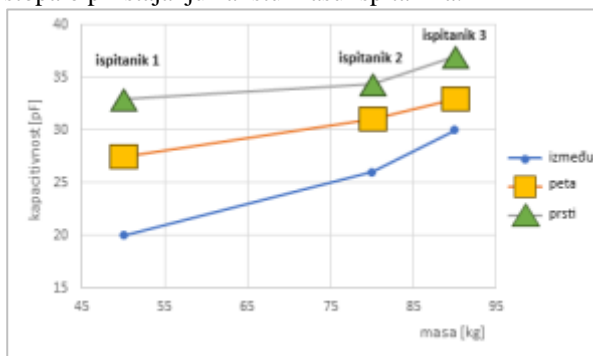


Slika 12. Zavisnost kapacitivnosti za mase do 90kg prilikom sedenja

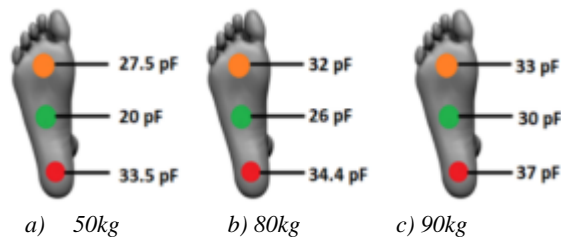


Slika 13. Prikaz kapacitivnosti u ključnim tačkama

Kao što se sa dobijenih rezultata može videti na slikama 14 i 15, i kao što je očekivano, veći pritisak deluje na stopalo pri stajanju za istu masu ispitanika.



Slika 14. Zavisnost kapacitivnosti za mase do 90kg prilikom stajanja



Slika 15. Prikaz kapacitivnosti u ključnim tačkama

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je razvoj senzora za merenje sile na stopalima. Projektovani su senzori koji se mogu primeniti u različitim sferama života, naročito u medicini i sportu.

Senzori su testirani za masu do 50kg, ali su pokazali najveću osetljivost za male mase do 200g i 1kg, pa se mogu u tom opsegu koristiti na primer, kod malih, preciznih vaga.

Senzori predstavljeni u ovom radu mogu biti sastavni delovi sistema za mapiranje sile na stopalima. Slanjem podataka sa senzora na celoj površini uložaka, mogu se dobiti 2D ili 3D prikazi raspodela sile. Ovi podaci mogu pomoći stručnjacima za dijagnostifikovanje i lečenja raznih stanja povezanih sa stopalima, kao i za dizajniranje prilagođenih uložaka i obuće.

7. LITERATURA

- [1]<https://www.hbproducts.dk/en/about/the-capacitive-measurement-principle>, pristupljeno dana 05.01.2023.
- [2]https://www.fasserbia.com/wp-content/uploads/2019/03/analiza_hoda_literatura.pdf, pristupljeno dana 10.01.2023.
- [3] <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/> pristupljeno dana 13.01.2023.
- [4]<https://builtin.com/3d-printing>, pristupljeno dana 25.01.2023.
- [5]<https://www.keysight.com/us/en/product/85070E/dielectric-probe-kit.html>, pristupljeno dana 07.02.2023.
- [6]<https://www.elektronika.ftn.uns.ac.rs/blog/laboratorija-za-mikroelektroniku-elektrotehnicke-materijale-i-cad/hp-model-4277a-lcz-meter/>, pristupljeno dana 12.02.2023.

Kratka biografija:



Teodora Kostić rođena je u Pirotu 1998. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Primenjena elektronika, odbranila je 2021. godine.