

DIZAJN, IZRADA I TESTIRANJE SENZORA SILE ZAGRIŽAJA, BAZIRANOG NA JESTIVOM HIDROGELU**DESIGN, PRODUCTION AND TESTING OF A BITE FORCE SENSOR, BASED ON AN EDIBLE HYDROGEL**Lazar Milić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je prikazan način izrade i testiranja senzora sile zagrižaja baziranog na jestivom hidrogelu hidroksietilceluloza+fruktoza+voda. Akcenat je stavljen na sam hidrogel, a nakon toga i na pretvarački element. Za ostatak senzora (analogno-digitalni konvertor, konekcija sa računarom, obrada podataka) korišćen je Arduino Nano Every, modifikovan sa naponskim razdelnikom.

Ključne reči: Hidroksietilceluloza+fruktoza+voda, Instron, Arduino Nano Every, Jestiva elektronika.

Abstract – This paper describes the method of design, fabrication and testing of a bite force sensor, based on an edible hydrogel, hydroxyethylcellulose + fructose + water. The focus of this paper was primarily on the hydrogel, its role and behaviour in the sensor, after which the whole transducer. For the rest of the sensor (analog-digital converter, connection with a computer, signal processing), Arduino Nano Every was used, modified by a voltage divider.

Keywords: Hydroxyethylcellulose + fructose + water, Instron, Arduino Nano Every, Edible electronics.

1. UVOD

Od sredine 20. veka, odnosno od Drugog svetskog rata, dolazi do sve bržeg razvoja ljudskog društva, pre svega kroz elektronske uređaje. Razvoj elektronike, kao spoja inženjerstva, fizike, tehnologije i nauke o materijalima, ubrzao je i razvoj drugih značajnih disciplina u nauci, ali i svakodnevnice. Razvoj elektronskih uređaja, od kuhinjskih aparata, preko automobilske industrije, sve do interneta, elektronika je zašla u najmanje pore ljudskog društva, donoseći time mnoštvo prednosti, ali i vidnih mana [1]. Veliki razvoj elektronike u proteklih pola veka pripisuje se razvoju procesa fabrikacije monolitnih silicijumskih tehnologija, odnosno razvoju integrisanih kola, čije se dimenzione granice sve više minimizuju, povećavajući efikasnost i smanjujući zauzetost površine, odnosno omogućavajući razvoj kompleksnijih sistema na mnogo manjim tehnologijama. Od sedamdesetih godina 20. veka pa do danas, dolazi do naglog smanjenja integrisane tehnologije, sa tad široko primenjene 10 μm, sve do 7 nm tehnologije zastupljene od 2017. godine [2].

NAPOMENA:

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

Razvoj elektronike, kao i nauke o materijalima, pored velikog doprinosa ljudskom društvu, doveo je i do sve većeg zagađenja okoline.

Kao jedno od rešenja sve većeg elektronskog otpada [3], došlo je do razvoja zelene elektronike iz koje je proistekla jestiva elektronika, koja za cilj ima upotrebu jestivih materijala, kao i hrane, u fabrikaciji elektronskih komponenti i kola [4]. Na slici 1 prikazana je podela jestivih materijala prema električnim svojstvima.



Slika 1. Piramida jestive elektronike [4].

Zagrižaj, kao i proces žvakanja, zbog svoje važnosti u ljudskom zdravlju, predstavlja jedan od centralnih oblasti istraživanja i interesovanja u stomatologiji, a sve više u inženjerstvu. Nepravilno žvakanje i zagrižaj mogu biti posledica loše raspoređenih zuba u vilici. U cilju određivanja nepravilnosti zagrižaja, kao indikatora ozbiljnih problema, u punom zamahu je razvoj senzora sile zagrižaja.

Prema efektu kog koriste za konverziju informacije o sili u signal koji se kasnije može interpretirati, pretvarači sile zagrižaja se dele na pretvarače koji koriste piezorezistivni efekat, zatim piezoelektrični efekat, pretvarače napreznja, na detektore pritiska, kao i na tanke filmove osetljive na pritisak [5]. Pored ovih tipova pretvarača sile zagrižaja, zastupljeni su i kapacitivni pretvarači sile zagrižaja [6, 7]. Pretvarači sile zagrižaja bazirani na

efektu naprezanja sastoje se od rastegljivog elementa osetljivog na pritisak, kao i naprezanje. Pri promeni pritiska ili naprezanja, dolazi do promene u otpornosti datog materijala (elementa), omogućavajući spregu ove dve veličine. Promena otpornosti elementa je proporcionalna naprezanju, odnosno mehaničkoj deformaciji. Karakteriše ih velika osetljivost, preciznost, kao i dovoljno velik opseg merenja. Malih su dimenzija i lagani, omogućavajući im primenu u usnoj duplji. Na ovom principu je razvijen pretvarač Dentoforce 2. Iako ovi pretvarači poprilično precizno konvertuju vrednost sile, zbog grube površine pretvarača ne naležu na zub u potpunosti [5].

Nakon pretvarača baziranih na efektu naprezanja, primenjuju se i oni bazirani na piezorezistivnom efektu. Piezorezistivni pretvarač je sačinjen od materijala sa monokristalima silicijuma i integrisanog kola. Kad monokristal silicijuma detektuje silu, dolazi do promene otpornosti, a time i izlaznog signala. Karakterišu ga brz dinamički odziv, dobra stabilnost, preciznost i osetljivost [5]. Pored piezorezistivnih pretvarača sile zagrižaja, značajni su pretvarači koji rade na principu piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični materijal konvertuje pritisak u električni signal. Ovi pretvarači koriste kvarcne kristale, kao najrasprostranjenije piezoelektrične materijale. Pored toga, primenjuju se i razne keramike i polimeri. Odlikuju ih dobra ponovljivost i visoka stabilnost [5].

Pretvarači pritiska, sadrže komoru napunjenu fluidom. Pri dejstvu pritiska na tu komoru, dolazi do pomeranja fluida u određenom pravcu, delujući na tačno definisan zid komore, na kom se nalazi merač pritiska. Potom se ova informacija o promeni pritiska prenosi i konvertuje u adekvatan signal, kasnije pogodan za obradu. Ovaj tip pretvarača se deli na hidraulične i pneumatske pretvarače pritiska [5].

Slično ovom pretvaraču pritiska, razvijeni su i pretvarači pritiska bazirani na tankom osetljivom filmu, sačinjenom od dva polietilen-tereftalatna filma, između kojih se nalazi materijal sa mikrokapsulama, a koji su prikazani. Pri dejstvu pritiska, u ovoj tankoj strukturi oblika potkovice dolazi do istiskivanja crvenog pigmenta iz mikrokapsula. Prethodno pomenuti crveni pigment, potom boji polietilen-tereftalatne filmove. Što je veći pritisak, to je crvena boja jača [5]. Pored gore navedenih pretvarača, može se koristiti i silom zavisani otpornik (engl. Force Sensitive Resistor – FSR) [8].

Za razliku od prethodno opisanih tipova senzora sile zagrižaja, u ovom radu biće opisan razvijeni senzor sa pretvaračem sile zagrižaja baziranom na promeni udaljenosti obloga kondenzatora. Kompresijom dielektričnog materijala u kondenzatoru, smanjuje se udaljenost između obloga kondenzatora, a samim tim se povećava kapacitivnost.

Naponskim razdelnikom, ova kapacitivnost utiče na napon i time omogućava merenje date promene.

Cilj rada jeste dobijanje relacije ulaz-izlaz, kao i njene inverzne karakteristike i kvantifikacija tačnosti dobijenog senzora.

2. MATERIJALI I METODE

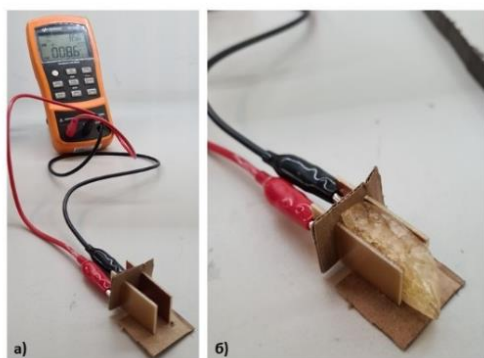
Nakon postavljene teorijske osnove potrebno je uvesti odabrane materijale pomoću kojih će biti izvršano pravljenje pretvaračkog elementa senzora zagrižaja. Potom, biće sproveden niz eksperimenata pomoću kog će biti okarakterisana pretvaračka komponenta i konačno biće razvijen hardverski deo za akviziciju.

Pri razvoju pretvaračkog elementa, korišćene su elektrode, obloge kondenzatora, napravljene od aluminijumske provodne trake. Pre svega zbog svoje savitljivosti. Naime, pri dejstvu sile zagrižaja, potrebno je da se obloge kondenzatora ne opiru dejstvu sile, odnosno koji su dovoljno elastični. Obloge kondenzatora su četvrtastog oblika, imajući izduženje preko kog se ostvaruje kontakt. Sa druge strane, prethodno pomenuti jestivi hidrogel, hidroksietil-celuloza-fruktoza-voda, predstavlja dielektrik postavljen između obloga. Debljina dielektrika je 5 mm. Ovaj tip organskog materijala odlikuje se velikim zadržavanjem vode, kao i velikom elastičnošću. Elastičnost ovog materijala biće razmotrena primenom napravljenih nastavaka za kompresiju, kao i onih sa modelima zuba na njima. Našli su veliku primenu u sistemima za dostavljanje lekova, kao i u sistemima za selektivno otpuštanje hranljivih supstanci. Prethodno opisani dielektrik, jestivi hidrogel, prikazan je na slici 2.



Slika 2. Hidroksietil-celuloza-fruktoza-voda.

U cilju upoznavanja korišćenog materijala, izračunata je relativna permitivnost, tako što je konstruisan pločasti kondenzator, bakarnih obloga, čija je kapacitivnost merena pre i posle dodavanja dielektričnog materijala. Relativna permitivnost predstavlja meru mogućnosti čuvanja energije nakon primene električnog potencijala na materijal. Sama postavka eksperimenta prikazana je na slici 3. Izvršeno merenje na učestanosti od 100 Hz, ponovljeno je 5 puta, primenom LCZ metra (model U1733C, država Kalifornija, Sjedinjene Američke Države, grad Santa Rosa, proizvođač Keysight). Potom je postavljen dielektrik između obloga i ceo merni postupak je ponovljen. Na kraju je primenjena relacija (1) i dobijene vrednosti relativne permitivnosti su usrednjene.



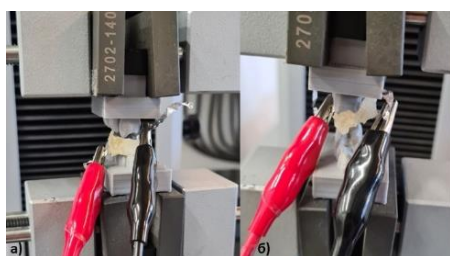
Slika 3 a) Postavka merenja pločastog kondenzatora bez dielektrika; b) Postavka merenja pločastog kondenzatora sa dielektrikom.

$$\epsilon_r = \frac{C_{hidrogel}}{C_0} \quad (1)$$

Nakon određivanja relativne permitivnosti, napravljeni su pretvarači pomoću kojih su vršena merenja.

Prenosna karakteristika, odnosno relacija ulaz-izlaz predstavlja matematičku relaciju koja povezuje izmerenu izlaznu veličinu sa ulaznom, kontrolnom veličinom. Ovaj postupak se postiže fitovanjem polinoma određenog stepena, sa ciljem da greška fitovanja bude minimalna.

Sa druge strane, povećanjem stepena polinoma može doći do pojave natprilagođenja (engl. overfitting), koja se ogleda u prekomernom poklapanju fitovane krive sa merenim vrednostima, ali i velikim, besmislenim talasanjem između dve merene tačke. Proces dobijanja krive će se ogledati polaskom od polinoma prvog reda, posmatranjem krive na grafiku, kao i računanja srednje kvadratne greške. Stepenn polinoma će se povećavati, sve dok se srednja kvadratna greška bude smanjivala i dok ne dođe do talasanja. Ova karakteristika se dobija primenom računara, korišćenjem merenih vrednosti dobijenih iz eksperimenta sa slike 4. Primenjena sila je bila u opsegu od 40 N do 540 N, sa korakom od 100 N.



Slika 4. a) Početni položaj eksperimenta; b) Krajnji položaj eksperimenta.

Krajnji položaj eksperimenta, odnosno maksimalna sila predstavlja vrednost sile pod kojom pretvarački element još uvek radi kao kondenzator, dok početni položaj predstavlja vrednost sile pri kojoj je vrednost kapacitivnosti stabilna pri konstantnom dejstvu sile. Opseg promene je meren na 5 uzoraka, nakon čega je vrednost usrednjena.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom delu rada biće izneseni rezultati i zaključci prethodno prikazanih merenja i eksperimenata.

Kao rezultat merenja relativne permitivnosti dielektrika, dobijene su vrednosti kapacitivnosti prikazane u tabeli 1.

Tabela 1 Dobijene vrednosti merenja kapacitivnosti

	C [pF]	C_{hidrogel} [pF]
Merenje 1	10.4	642.5
Merenje 2	9.1	643
Merenje 3	9.7	654.2
Merenje 4	9.2	657.9
Merenje 5	10.3	660.1
Srednja vrednost	9.74	651.54
Standardna devijacija	0.5388877	7.4222907

Nakon dobijanja srednje vrednosti, izračunata je relativna permitivnost materijala primenom relacije (1). Dobijena je relativna permitivnost od 67.

Rezultati merenja kapacitivnosti u opsegu primene kontrolisane sile od 40 N do 540 N sa korakom od 100 N prikazana je u tabeli 2.

Tabela 2 Dobijene vrednosti merenja kapacitivnosti

Sila [N]	Srednja vrednost [pF]	Standardna devijacija [pF]
40	135.9	2.6
140	249.3	3
240	770.4	6.3
340	1324.6	3.6
440	1975.6	9.9
540	2126.7	12.4

Potrebno je dobiti adekvatnu prenosnu karakteristiku, u posmatranom opsegu. Za ove potrebe korišćen je MATLAB, gde su krive fitovane polinomima prvog, drugog i trećeg reda i rezultati su prikazani preko greške fitovanja u tabeli 3, za koju je računata srednja apsolutna greška fitovanja.

Tabela 3 Srednja apsolutna greška fitovanja

Stepenn polinoma	Srednja apsolutna greška
1	123.2
2	123.2
3	24.9
4	23.1

Ukoliko se posmatraju prve dve kolone u tabeli 3, vidi se odstupanje od oko 123 pF, kad se fituje polinomom prvog i drugog reda, što kad se prevede u vrednost sile, dobija se oko 35 N odstupanja, što je poprilično velika razlika. Za razliku od toga odstupanja polinoma trećeg i četvrtog stepena, iako se graniče sa natprilagođenjem, koje nastupa sa polinomom petog stepena, srednja apsolutna greška od

25 pF i 23 pF predstavlja prosečnu grešku od 7.4 N. Ponašanje opisano polinomom trećeg reda prikazano je relacijom (2).

$$C = -4.03 * 10^{(-5)} * F^3 + 0.0363 * F^2 - 4.363 * F + 258.2 \quad (2)$$

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu detaljno je opisan i okarakterisan senzor sile zagrižaja, a akcenat je stavljen na pretvarački deo. Pored toga, data je adekvatna teorijska osnova za ulazak u ovu oblast.

5. REFERENCE

- [1] Woessner MN, Tacey A, Levinger-Limor A, Parker AG, Levinger P and Levinger I (2021) The Evolution of Technology and Physical Inactivity: The Good, the Bad, and the Way Forward. *Front. Public Health* 9:655491. doi: 10.3389/fpubh.2021.655491
- [2] SINGH, Amrik; SINGH, Sukhwinder. Evolution of CMOS technology. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2016, 5.02.
- [3] Brett H. Robinson, E-waste: An assessment of global production and environmental impacts, *Science of The Total Environment*, Volume 408, Issue 2, 2009, Pages 183-191, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>.
- [4] Sharova, A. S., Melloni, F., Lanzani, G., Bettinger, C. J., Caironi, M., Edible Electronics: The Vision and the Challenge. *Adv. Mater. Technol.* 2021, 6, 2000757. <https://doi.org/10.1002/admt.202000757>
- [5] Gu Y, Bai Y and Xie X (2021) Bite Force Transducers and Measurement Devices. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9:665081. doi: 10.3389/fbioe.2021.665081
- [6] Sibong Cheng, Baohong Chen, Yuan Zhou, Minglong Xu, Zhigang Suo, Soft sensor for full dentition dynamic bite force, *Extreme Mechanics Letters*, Volume 34, 2020, 100592, ISSN 2352-4316, <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100592>.
- [7] Keng-Ren Lin, Chih-Han Chang, Tzu-Hsuan Liu, Shi-Wei Lin, Che-Hsin Lin, Experimental and numerical estimations into the force distribution on an occlusal surface utilizing a flexible force sensor array, *Journal of Biomechanics*, Volume 44, Issue 10, 2011, Pages 1879-1884, ISSN 0021-9290, <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.04.032>.
- [8] Cláudio P Fernandes, Per-Olof J Glantz, Stig A Svensson, Anders Bergmark, A novel sensor for bite force determinations, *Dental Materials*, Volume 19, Issue 2, 2003, Pages 118-126, ISSN 0109-5641, [https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(02\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(02)00020-9).

Kratka biografija:



Lazar Milić rođen je u Subotici 1997. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Biomedicinskog inženjstva - Medicinska elektronika, odbranio je 2022. godine.

kontakt: lmilic@uns.ac.rs