

FABRIKACIJA I ANALIZA ELEKTRIČNIH KARAKTERISTIKA E-TEKSTILNIH UREĐAJA NA BAZI CO-PANI MATERIJALA**FABRICATION AND ANALYSIS OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF E-TEXTILE DEVICES BASED ON CO-PANI MATERIALS**Sergej Vukelić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu su fabrikovani e-tekstilni uređaji, merene su i analizirane njihove električne karakteristike. Kao materijali za elektrode, korišćene su dve vrste provodnih pamučnih tkanina (CO-PANI1 i CO-PANI2) između kojih se nanosi dielektrični materijal kako bi se formirala MIM (metal-izolator-metal) struktura. Struktura se postavlja unutar plastičnog kućišta (P-tipa i D-tipa) za mehaničku zaštitu. Strujno-naponske karakteristike tri od četiri vrste realizovanih uređaja pokazuju uštinutu histerezisnu petlju, tipičnu za rezistivne prekiđačke uređaje- memristore. Rad prikazuje rezultate i detaljnu analizu odziva uređaja na promenljivu naponsku pobudu, promenu električnih karakteristika sa temperaturom kao i cikličnu-voltometrijsku analizu.

Ključne reči: e-tekstilni uređaji, memristor, CO-PANI materijal, električne karakteristike.

Abstract – In this paper, e-textile devices were fabricated and their electrical characteristics were measured and analysed. Two cotton fabrics were used as electrode materials (CO-PANI1 and CO-PANI2), while dielectric material was deposited in between in order to obtain MIM (metal-insulator-metal) structure. Structure is placed in plastic housing (P-type and D-type) for mechanical protection. Current-voltage characteristics three out of four realized type of devices show pinched hysteresis loop, typical for resistive switching devices-memristors. Paper presents results and detailed analysis of devices' response for variable actuation voltage waveform, modification of electrical characteristics with temperature as well as cyclic-voltammetry analysis.

Keywords: e-textile devices, memristor, CO-PANI material, electrical characteristics.

1. UVOD

Elektronski tekstilni (e-tekstilni) uređaji se odlikuju mogućnošću integracije elektronskih funkcionalnosti unutar tkanine uz pomoć mehaničke modifikacije konvencionalnih komponenti [1-2].

Komponente se mogu direktno implementirati u strukturu tkanine ili se povezati preko interfejsa sa fleksibilnim delom sistema [1].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Nataša Samardžić, docent.

Memristor (*engl. memory resistor*) predstavlja četvrtu osnovnu pasivnu komponentu teorije električnih kola, sa nelinearnom zavisnošću između fluksa i količine naelektrisanja [3]. Ovakvo svojstvo je najpre eksperimentalno prepoznato u HP laboratorijama u okviru *crossbar* arhitekture Pt/TiO₂/Pt, 2008. godine što je predstavljao začetak intenzivnih istraživanja u oblasti materijala i primene memristora [4].

Cilj ovog rada je realizacija jednostavnih e-tekstilnih uređaja, na bazi provodnih pamučnih tkanina (CO-PANI1 i CO-PANI2), ispitivanje uticaja zaštitnih slojeva na odziv kao i ispitivanje električnih svojstava uređaja detaljnom analizom strujno-naponskih, otpornost-naponskih karakteristika zajedno sa ciklično-voltometrijskom analizom.

Ostatak teksta organizovan je na sledeći način: U drugoj glavi su opisani korišćeni materijali i postupak fabrikacije e-tekstilnih uređaja kao i merne metode. U trećem poglavlju su prikazani značajniji rezultati merenja strujno-naponskih karakteristika, karakteristika zavisnosti otpornosti i kapacitivnosti u funkciji napona kao i promena jačine struje u vremenu. Upoređivane su i diskutovane karakteristike za četiri tipa realizovanih e-tekstilnih uređaja. U glavi četiri je dat zaključak rada, a spisak korišćene literature je prikazan u poglavlju 5.

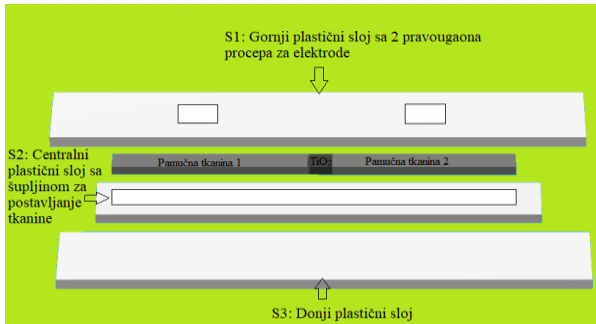
2. MATERIJALI I METODE

Tekstilne elektrode su formirane od dve vrste materijala: a) pamuk sa manjom količinom polianilina (CO-PANI1), b) pamuk sa većom količinom polianilina (CO-PANI2). Detaljan opis materijala za elektrode prikazan je u radu [5]. Za dielektrični/izolatorski sloj korišćen je 5% nanokristalni rastvor TiO₂ u etanolu. Depozicijom TiO₂ između tekstilnih elektroda formira se metal-izolator-metal struktura e- uređaja.

Realizovani uređaji su smešteni u dva tipa kućišta (P-tip i D-tip), koja će biti opisana u nastavku. Pored funkcije vezivanja, kućište pruža mehaničku zaštitu uređaja.

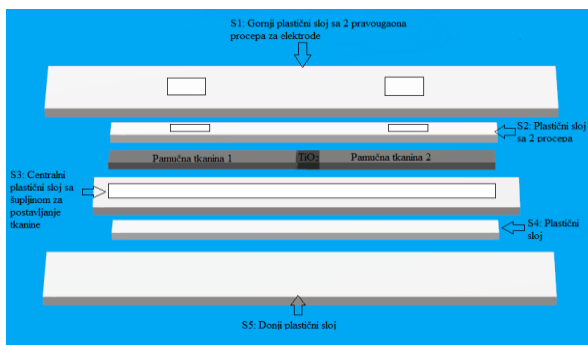
Prvobitno je realizovano kućište (tip P) sačinjeno od tri plastična sloja (gornji sloj sa dva pravougaona procepa za elektrode 3 mm x 5 mm, S1; središnji sloj sa procepom za tkaninu 1 cm x 4 cm, S2 i donji sloj, S3), debljine 125 μm, od PVC (polivinil-hlorid) materijala, slika 1. Laminacija slojeva sa MIM stukturuom vrši se na temperaturi od 180°C, (*Card Laminator*). P-tip kućišta vremenom gubi svoju čvrstinu, nakon ponovljenih merenja dolazi do

odvajanja materijala MIM strukture što rezultuje velikom otpornošću finalnog uređaja.



Slika 1. Šematski prikaz pojedinačnih slojeva uređaja sa P-tipom kućišta

Drugo kućište (tip D) se sastoji od 5 plastičnih slojeva PVC materijala debljine 125 μm , slika 2. Za razliku od kućišta tipa P, ono sadrži dva dodatna plastična sloja (S2 i S4), sa gornje i donje strane pamučnih tkanina što doprinosi većoj robusnosti. Obeležavanje uređaja je izvršeno na sledeći način: uređaji u prvom kućištu su obeleženi velikim slovom P i zatim rednim brojem 1 ili 2 po analogiji sa oznakom materijala od kojih su sačinjene elektrode (CO- PANI1 \rightarrow P1, CO-PANI2 \rightarrow P2). Ista logika se koristi i za uređaje smeštene u drugom kućištu, oznaka D (CO- PANI1 \rightarrow D1, CO-PANI2 \rightarrow D2).



Slika 2. Šematski prikaz pojedinačnih slojeva uređaja sa D-tipom kućišta

Na slici 3 je prikazan realizovan e-tekstilni uređaj na bazi CO-PANI1 elektroda unutar drugog plastičnog kućišta, uređaj D1.



Slika 3. E-tekstilni uređaj na bazi CO-PANI1 elektrode unutar drugog plastičnog kućišta (D1)

Na slici 4 je prikazan realizovan e-tekstilni uređaj na bazi CO-PANI2 elektrode unutar drugog plastičnog kućišta, uređaj D2.

Strujno-naponske karakteristike ($I-V$) i karakteristike zavisnosti otpornosti u funkciji napona ($R-V$) su snimane sa mernim instrumentom *Keithley 2410 High Voltage*

Source Meter [6]. Merenja su vršena na sobnoj temperaturi, ali i na povišenim temperaturama 40°C, 60°C i 80 °C. Za merenja na povišenoj temperaturi je upotrebljen sistem za zagrevanje *Fisherbrand Isotemp Hot Plate* [7]. Za cikličnu voltometrijsku analizu i snimanje promene jačine struje u vremenu ($I-t$) korišćen je potencijostat *PalmSens4* [8].



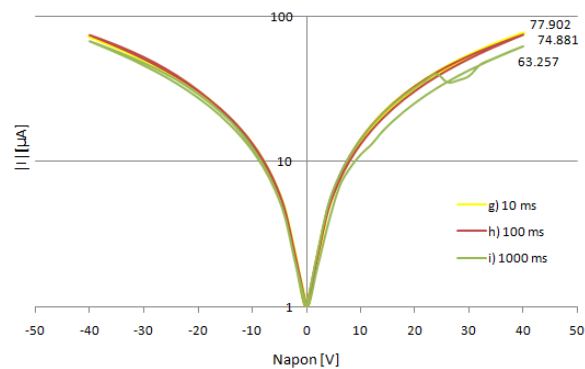
Slika 4. E-tekstilni memristor na bazi CO-PANI2 elektrode unutar drugog plastičnog kućišta

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Rezultati i analiza $I-V$ karakteristika P1 i P2 uređaja

Dobijene strujno-naponske karakteristike (*Keithley 2410*) e-tekstilnih uređaja sa CO-PANI1 elektrodama u prvom kućištu, P1 uređaj, su nelinearne, ali bez histerezisa tj. uređaj se ponaša kao nelinearni otpornik. Otpornost P1 uređaja je $\sim 5,9 \text{ G}\Omega$ i pri maksimalnim vrednostima primenjenog napona (40 V).

Na slici 5 su prikazani rezultati merenja tri $I-V$ karakteristike P2 uzorka sa promenljivim vremenskim odbircima: 10 ms, 1000 ms i 10 000 ms.



Slika 5. $I-V$ karakteristika P2 uzorka sa promenljivim t_s , amplituda naponske pobude 40 V

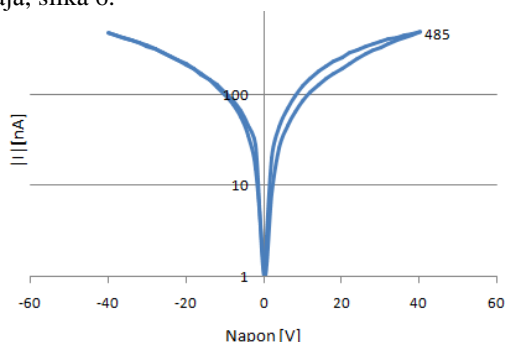
Amplituda trougaone naponske pobude je konstantna (40 V), ali se ukupna jačina struje sa ponovljenim merenjima smanjuje. Uštinut histerezis se javlja u sva tri slučaja, ali je najširi za vremenski odbirak od 1000 ms, tj. za najmanju frekvenciju pobudnog napona, što je tipično ponašanje memristora.

3.2. Rezultati i analiza $I-V$ i $R-V$ karakteristika D1 i D2 uređaja

Na slici 6 je prikazana $I-V$ karakteristike D1 uređaja snimljena sa vremenskim odbirkom od 10 ms i amplitudom naponske pobude od 40 V. U poređenju sa rezultatom za uzorak P1, ukupna prosečna otpornost je značajno smanjena (~ 70 puta) i iznosi 80 $\text{M}\Omega$, čime je

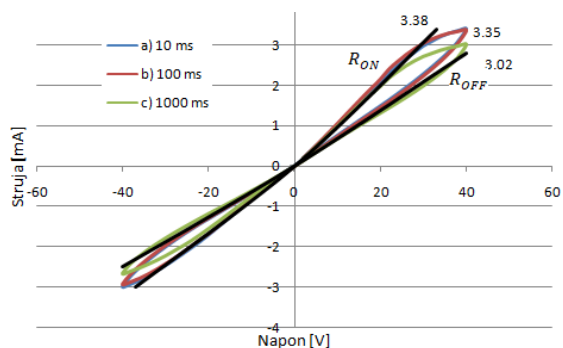
potvrđen uticaj kućišta tipa D na provodne karakteristike uređaja.

Nesimetričnost površine obuhvaćene histerezisnom petljom, u pozitivnom i negativnom ciklusu naponske pobude ukazuje na značajne električne gubitke ovog tipa uređaja, slika 6.



Slika 6. *I-V karakteristika D1 uzorka za $t_s=10$ ms, amplituda naponske pobude 40 V*

Značajno poboljšanje odziva identifikovano je za uzorak D2, slika 7. Ukupna jačina struje je \sim mA, prosečna otpornost \sim 15 k Ω . Sa povećanjem vrednosti parametra t_s dobija se širi histerezis, a ponovljena merenja dovode do smanjenja jačine struje. U prvom slučaju (a) maksimalna struja iznosi $I_a=3,38$ mA, u drugom slučaju (b) $I_b=3,35$ mA i u trećem slučaju (c) $I_c=3,02$ mA. Prelazak iz ON u OFF stanje nastupa pri pozitivnoj naponskoj pobudi (\sim 40 V), u prvoj poluperiodu aknuacionog napona, dok prelazak iz OFF u ON stanje nastupa pri negativnim vrednostima aknuacionog napona (\sim -40V).



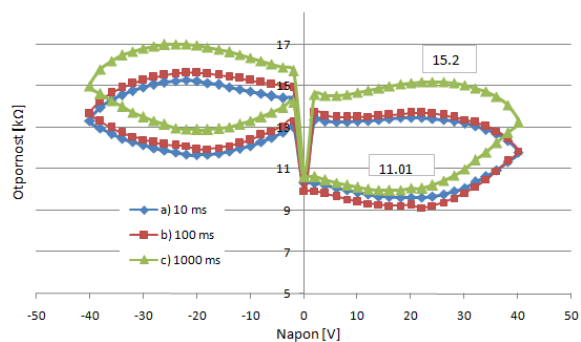
Slika 7. *I-V karakteristika D2 uzorka za tri različita vremenska odbirka (10 ms, 100 ms, 10 000ms), amplituda naponske pobude 40 V*

Na slici 8 je prikazana zavisnost otpornosti od napona D2 uzorka za tri različite vrednosti vremenskih odbiraka (10 ms, 100 ms i 1000 ms) kao i odgovarajuće vrednosti R_{ON} i R_{OFF} otpornosti.

Za vremenski odbirak naponske pobude od 1000 ms, kada je histerezis najširi dobija se (u pozitivnoj poluperiodi): $R_{ON}=11,01$ k Ω i $R_{OFF}=15,2$ k Ω , odnos otpornosti $R_{ON}/R_{OFF}\approx 1,4$. Prosečna otpornost, u novom kućištu, e-tekstilnog memristora sa CO-PANI2 elektrodom (D2) iznosi 16 k Ω . Smanjenje ukupne otpornosti u odnosu na uređaje klase D1 se objašnjava boljim provodnim karakteristikama CO-PANI 2 elektroda [5].

Pored poboljšanja provodnih karakteristika, uočava se i poboljšana simetričnost površine obuhvaćene histerezisom

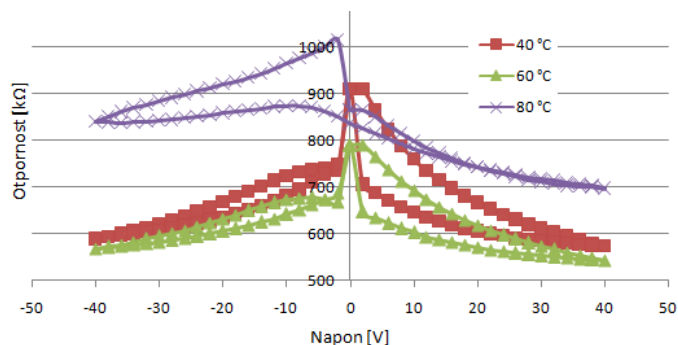
u prvom i trećem kvadrantu (slika 7) uređaja D2 u odnosu na prethodne strukture, što ide u prilog većoj efikasnosti, tj. manjim Džulovim gubicima dobijene strukture.



Slika 8. *R-V karakteristika D2 uzorka za tri različita vremenska odbirka (10 ms, 100ms, 1000 ms), amplituda naponske pobude 40 V*

3.2. Rezultati i analiza I-V karakteristika uređaja D2 na povišenim temperaturama

Nadalje, merenja na povišenim temperaturama (*Fisherbrand Isotemp Hot Plate*) su izvršena za uzorak D2, koji je imao najizraženiji memristivni efekat. Uređaj je zagrevan do 80 °C uz snimanje *I-V* karakteristika merним instrumentom *Keithley 2410*. Rezultati promene otpornosti u funkciji napona pri različitim temperaturama do maksimalnih 80 °C su prikazani na slici 9.



Slika 9. *R-V karakteristike D2 uzorka pri različitim temperaturama (40 °C, 60 °C, 80 °C), amplituda naponske pobude 40V,*

Uočava se da se porastom temperature smanjuje vrednost otpornosti do granice od 60 °C, slika 9. U narednoj iteraciji zagrevanja do 80 °C dolazi do naglog skoka otpornosti. Prosečna otpornost na temperaturi od 80 °C (\sim 900 k Ω) premašuje i vrednosti otpornosti na sobnoj temperaturi.

Vrednosti odnosa R_{OFF}/R_{ON} otpornosti za povišene temperature je dat u nastavku: $R_{OFF}/R_{ON}(40^\circ\text{C})=1,18$; $R_{OFF}/R_{ON}(60^\circ\text{C})=1,15$ i $R_{OFF}/R_{ON}(80^\circ\text{C})=1,03$. Evidentno je i sužavanje histerezisa sa porastom temperature okruženja, što se objašnjava postepenim isparavanjem tečnog rastvora nanočestica TiO₂ u etanolu, dielektrika koji je nanešen između tekstilnih elektroda.

3.3 Rezultati ciklično-voltometrijske analize uređaja D1 i D2

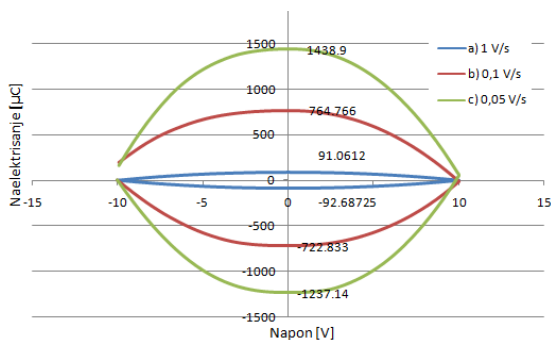
Uz pomoć *PalmSens4* potenciostata su merene *q-V* i *I-t* karakteristike memristora smešteni u kućište tipa D (D1 i

D2 uzorci). U nastavku su prikazani odabrani rezultati e-tekstilnog uređaja D2 sa izraženijim memristivnim svojstvima. Parametri merne postavke prikazani su u tabeli 1.

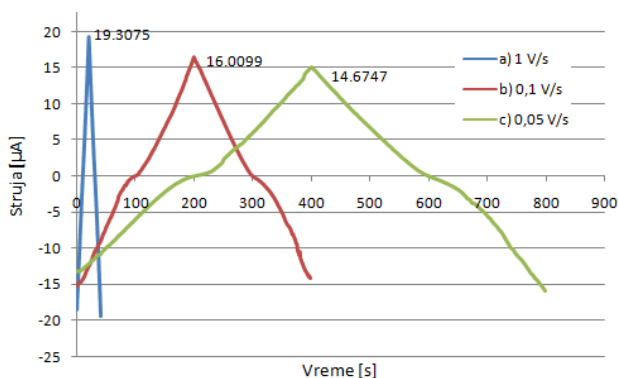
Tabela 1. Parametri merne postavke za ciklično-voltometrijsku analizu uređaja D2

| Oznaka | Napon [V] | Naponski korak [V] | Brzina skeniranja [V/s] |
|--------|-----------|--------------------|-------------------------|
| a | 10 | 0.1 | 1 |
| b | 10 | 0.1 | 0.1 |
| c | 10 | 0.1 | 0.05 |

Na slici 10 su prikazane tri različite q - V karakteristike (tabela 1: postavka a), b) i c)) D2 uzorka kako bi se ispitalo uticaj promene brzine skeniranja, S_r , na karakteristike uređaja. Sa slike 10 se uočava da se dobijaju veće vrednosti ukupnog naelektrisanja što je manji parametar S_r . Minimalna vrednost ukupne količine naelektrisanja slučaja pod a) $q_a = -92,68725 \mu C$, slučaja pod b) $q_b = -722,833 \mu C$ i slučaja pod c) $q_c = -1237,14 \mu C$. Sa druge strane, maksimalne vrednosti naelektrisanja su: $q_a = 91,0612 \mu C$, postavka b) $q_b = 764,766 \mu C$ i postavka c) $q_c = 1438,9 \mu C$.



Slika 10. Ciklično-voltometrijska analiza D2 uzorka za različite vrednosti brzine skeniranja ($S_{ra} = 1 V/s$, $S_{rb} = 0,1 V/s$, $S_{rc} = 0,05 V/s$)



Slika 11. I - t karakteristike D2 uzorka za različite vrednosti brzine skeniranja ($S_a = 1 V/s$, $S_b = 0,1 V/s$, $S_c = 0,05 V/s$)

Na slici 11 su prikazane I - t karakteristike (tabela 1: postavka a), b) i c)) snimljene na uređaju D2. Za naponski korak od 0.1 V maksimum struje se dostiže (a) na ~ 20 s, u drugom slučaju (b) ~ 200 s i u trećem (c) ~ 400 s. Maksimalna vrednost jačine struje za postavku (a) od $I_a = 19,3075 \mu A$, (b) ta vrednost iznosi $I_b = 16,0099 \mu A$ i postavku (c) $I_c = 14,6747 \mu A$ (slika 11). Ponovljena merenja utiču na smanjenje ukupne jačine struje, sličan

zaključak je izveden i iz strujno-naponskih karakteristika, ali se takođe potvrđuje i tipično ponašanje memristora u vidu proširenja histerezisne petlje sa smanjenom frekvencijom pobude (slika 10).

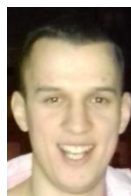
4. ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak realizacije e-tekstilnih uređaja sa CO-PANI elektrodama u metal-izolator-metal arhitekturi sa tečnim nanočestičnim TiO_2 dielektrikom. Uređaji su smešteni u dve različite strukture kućišta od kojih ona se dodatnim zaštitnim slojevima (D-tip) obezbeđuje bolju robusnost i čvrstoću finalnih uređajaja, što značajno utiče na električne karakteristike. Strujno-naponski odziv i ciklična-voltometrijska analiza uređaja u D tipu kućišta pokazuje memristivno svojstvo. Uzorci čije su elektrode dopirane sa većom količinom polianilina (CO-PANI2), uzorak D2 poseduje znatno veću ukupnu provodnost i približno simetričan histerezis, tj. manje gubitke u odnosu na ostale klase uređaja Memristivni efekat je prisutan i na povišenim temperaturama, do temperature od $80^\circ C$. Rezistivni prekidački efekat sa očljivim prelazima između visokootpornog R_{OFF} i niskootpornog R_{ON} stanja, pri promenu polariteta napona zabeležen je za tri klase realizovanih uređajaja.

5. LITERATURA

- [1] L. Buechley, M. Eisenberg, "Fabric, PCBs, electronic sequins, and socket buttons: techniques for etextile craft", *Pers Ubiquit Comput*, Vol. 13, pp. 133–50, 2009.
- [2] M. Rothmaier, M. Luong, F. Clemens, "Textile pressure sensor made of flexible plastic optical fibres", *Sensors*, Vol. 8, pp. 4318–29, 2008.
- [3] L. Chua, "Resistance switching memories are memristors", *Appl Phys A*, Vol. 102, pp. 765–783, 2011.
- [4] D. Strukov, G. Snider, D. Stewart, R. Williams, "The missing memristor found", *Nature*, Vol. 423, pp. 80–83, 2008.
- [5] G. M. Stojanović, M. M. Radetić, Z. V. Šaponjić, M. B. Radoičić, M. R. Radovanović, Ž. V. Popović and S. N. Vukmirović, "A Textile-Based Microfluidic Platform for the Detection of Cytostatic Drug Concentration in Sweat Samples". *Appl. Sci*, Vol. 10, 4392, 2020.
- [6] <https://www.newark.com/keithley/2410/source-meter-dc-voltage-current/dp/19K4451#> (pristupljeno u junu 2020.)
- [7] <https://www.fishersci.com/shop/products/fisher-scientific-isotemp-hotplate-7/hp88857200> (pristupljeno u junu 2020.)
- [8] https://www.palmsens.com/product/palmsens4/?gclid=Cj0KCQjw0YD4BRD2ARIsAHwmKVmUMN3X0dSzoPP7bN50oGO6aqRylAi73edlr8PrUz42H6RayodnX6MaAuAHEALw_wcB (pristupljeno u julu 2020.)

Kratka biografija:



Sergej Vukelić rođen je u Kosovskoj Mitrovici 1996. godine. Fakultet tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu je upisao 2015. godine. Diplomski B.Sc. rad je odbranio 2015. godine.
kontakt: sergej.vukelic@gmail.com