

Jednostavni programabilni strujni izvor za kontrolisanu dostavu jontoforezom

Željko Janićijević

Apstrakt—Izvori jednosmerne struje predstavljaju ključnu funkcionalnu komponentu uređaja za jontoforezu. Dostava potentnih ili osetljivih naelektrisanih formulacija jontoforetskim pumpanjem zahteva kontrolabilnu primenu električnih struja niskog intenziteta. U ovom radu je prikazana jednostavna i jeftina realizacija programabilnog izvora konstantne jednosmerne struje niskog intenziteta zasnovana na Arduino Uno platformi. Uređaj se sastoji iz hardvera za kontinualnu generaciju i monitoring struje, dok implementirani softver omogućava dinamičku regulaciju vrednosti struje i jednostavan korisnički interfejs. Strujni izvor je pokazao zadovoljavajuće performanse u opsegu intenziteta struja od 10 do 230 μA i demonstrirana je njegova upotrebljivost u rutinskim *in vitro* laboratorijskim testovima jontoforeze. Konstruisani strujni izvor može biti koristan alat za istraživače jontoforeze različitih profila.

Ključne reči—strujni izvor; Arduino Uno; jontoforeza; kontrolisana dostava

I. UVOD

STRUJNI izvori predstavljaju jedan od značajnih alata za ekscitaciju hemijskih i bioloških sistema i jednu od najvažnijih funkcionalnih komponenti uređaja za biomedicinske primene. Konstruisanje namenskih strujnih izvora je od posebnog interesa u kontroli transporta naelektrisanih jonskih i molekulskih formulacija pod dejstvom jednosmerne električne struje koji se naziva jontoforeza. Jontoforeza pre svega nalazi primenu u kontrolisanoj transdermalnoj dostavi lekova [1], ali i u otpuštanju jako malih količina jona iz rastvora u mikropipetama (mikrojontoforeza) kod preciznih medicinskih testova [2]. Izvori jednosmerne struje niskog intenziteta imaju ključnu ulogu u jontoforetskom pumpanju osetljivih i potentnih naelektrisanih formulacija lekova kao što su peptidi, proteini, DNK fragmenti, neke klase analgetika, itd.

Laboratorijski testovi jontoforetskog transporta za kontrolisanu dostavu lekova se obično obavljaju na opterećenju male zapremine (do oko 50 ml), koje se sastoji od visokoprovodnog rezervoara (u formi membrane ili gela), provodnog receptorskog rastvora sa tečnim elektrolitom u koji se joni oslobađaju i elektroda koje ostvaruju električni kontakt sa sistemom. Ovakav sistem tipično odlikuje sporo promenljiva električna otpornost u opsegu od reda veličine Ω do reda veličine $\text{k}\Omega$ što su pokazali preliminarni eksperimenti

Željko Janićijević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: zeljkj@etf.bg.ac.rs).

autora.

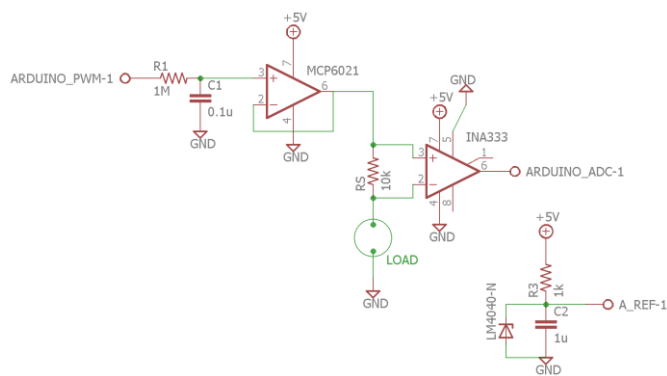
Programabilni izvori konstantne jednosmerne struje u opsegu do nekoliko stotina μA su najčešće komercijalno dostupni kao elementi kompleksnih mernih uređaja ili sistema za napajanje. Takvi uređaji se zbog svoje ograničene upotrebljivosti i relativno visoke cene retko nalaze u hemijskim, medicinskim ili farmakološkim laboratorijama. Prvo značajnije razmatranje i uprošćavanje implementacije izvora konstantne struje namenjenih jontoforezi prikazao je Park [3]. U njegovoj realizaciji je implementirana jednostavna analogna kontrola intenziteta struje potencijometrom. Sledeći značajan korak ka sniženju cene i povećanju portabilnosti strujnih izvora za jontoforetsku dostavu je ostvario Čing sa saradnicima [4]. Ova grupa autora je realizovala programabilni strujni izvor koji može isporučivati strujni signal različitih talasnih oblika. Njihov uređaj omogućava podešavanje intenziteta struje u opsegu od 1 do 300 μA sa tačnošću od $\pm 3\%$. Za *in vivo* primene jontoforeze u transdermalnoj dostavi lekova Song i saradnici su razvili minijaturni programabilni kontroler koji omogućava električnu stimulaciju u opsegu intenziteta od 16 do 512 μA u pulsnom režimu ili režimu konstantne struje [5]. Zbog specifičnih i relativno kompleksnih realizacija, ove strujne izvore nije lako rekonstruisati u manjim laboratorijama i uvesti u rutinsku primenu.

Arduino razvojne platforme omogućavaju jeftin pristup formiranju prototipa namenskog uređaja koji se može rutinski koristiti u istraživanjima i obezbediti zadovoljavajuće performanse. Ova platforma je već uspešno iskorišćena u jednoj realizaciji programabilnog strujno kontrolisanog napajanja čija se struja izlaza može podešavati do limita intenziteta od 3 A [6]. U ovom radu su prikazani dizajn i implementacija programabilnog izvora konstantne jednosmerne struje sa stabilnim strujnim izlazom podesivim do minimalnog intenziteta od 10 μA zasnovanog na Arduino Uno platformi. Zbog robusnog dizajna i jednostavnih korisničkih interfejsa, ovaj uređaj mogu koristiti i istraživači drugih profila kojima je potrebna stabilna strujna pobuda sličnih opterećenja koja je niskog intenziteta sa dobrom tačnošću i dinamičkom stabilnošću u *in vitro* uslovima.

II. DIZAJN I IMPLEMENTACIJA HARDVERA

Električna šema hardvera strujnog izvora je prikazana na Sl. 1. Izlaz sa modulacijom širine impulsa (PWM) frekvencije 10 kHz na desetom pinu Arduino Uno [7] razvojne ploče (ARDUINO_PWM-1) se dovodi na aktivni filter niskopropusnik prvog reda sa jediničnim pojačanjem koji

obezbeđuje dc napon pobude i nisku izlaznu impedansu. Izbor frekvencije PWM signala i pasivnih komponenti filtra predstavlja kompromis između minimizacije talasnosti signala i minimizacije vremenske konstante odziva filtra. Merenje struje koja prolazi kroz granu sa opterećenjem se obavlja posredno merenjem napona na otporniku (R_S) koji se nalazi iznad opterećenja (LOAD) putem instrumentacionog pojačavača čiji se izlaz dovodi na analogni ulaz Arduino Uno razvojne ploče (ARDUINO_ADC). Pri uslovima koje diktira očekivani opseg otpornosti opterećenja, dovoljno je koristiti jedinično pojačanje instrumentacionog pojačavača. Izmerene vrednosti napona na analognom ulazu predstavljaju osnovu za softversku kontrolu strujne pobude, pa je neophodna tačna i ponovljiva konverzija izmerenog napona u vrednost struje. Kako bi se izbegao uticaj varijacije napona napajanja putem univerzalnog serijskog porta (USB-a) računara, za poboljšanje tačnosti se koristi eksterna naponska referenca (A_REF) koja ima niži napon od napona napajanja Arduino Uno razvojne ploče.



Sl. 1. Električna shema programabilnog izvora konstantne jednosmerne struje.

Za implementaciju aktivnog filtra je upotrebljen operacioni pojačavač odličnih performansi MCP6021 [8]. Ovaj pojačavač se odlikuje punim naponskim opsegom ulaza i izlaza, visokom ulaznom impedansom, malim ofsetom, niskom strujom polarizacije i niskim nivoom šuma. Na ovaj način je omogućeno stabilno i ponovljivo podešavanje u čitavom opsegu napona koji se mogu ostvariti filtriranjem PWM signala.

Kao instrumentacioni pojačavač je korišćen INA333 [9], koji pruža izvanrednu tačnost i puni naponski opseg izlaza. Ova komponenta poseduje visoku ulaznu impedansu, nizak nivo šuma i mali ofset pri jediničnom pojačanju (< 0.1 mV). Sa ovakvim instrumentacionim pojačavačem je omogućeno precizno praćenje struje i dobro iskorišćenje dinamičkog opsega analognog-digitalnog (AD) konvertora.

Eksterna naponska referenca je realizovana pomoću komponente LM4040-N (A-klase) [10] sa naponom proboja od 4.096 V koja obezbeđuje tačnost naponskog izlaza bolju od $\pm 0.1\%$ pri 25 °C (koja je veoma slična u relevantnom opsegu ambijentalnih temperatura).

Hardverske komponente su odabrane imajući na umu potrebe istraživača koje obuhvataju dobru tačnost i odličnu ponovljivost mernih rezultata uz adaptibilnost strujnog izvora

na promene impedanse opterećenja. Posebna pažnja je posvećena i razmatranju potrošnje pojedinačnih aktivnih komponenti kako bi se omogućila i alternativna metoda napajanja pomoću baterija.

III. DIZAJN I IMPLEMENTACIJA SOFTVERA

Programski kod softvera je realizovan u Arduino integrisanom razvojnom okruženju (Arduino IDE-u) gde je ujedno omogućena i direktna interakcija korisnika sa Arduino Uno razvojnom pločom putem serijskog monitora. Korisniku se pruža i alternativna mogućnost interakcije sa hardverom pomoću programskog koda napisanog u programskom paketu MATLAB, a koji omogućava razmenu podataka preko serijskog porta i dinamičko iscertavanje intenziteta električne struje pogodno za praćenje intenziteta struje tokom trajanja eksperimenta.

Programski kod u Arduino IDE-u se sastoji od sekcije za podešavanje parametara i petlje za kontinualno ciklično izvršavanje. U sekciji za podešavanje parametara se prvobitno definišu ulazni i izlazni portovi i uspostavlja eksterna naponska referenca. Zatim se definišu period PWM signala i željena celobrojna vrednost struje I_s u opsegu od 10 μ A do 230 μ A na osnovu unosa korisnika.

Petlja za kontinualno ciklično izvršavanje se sastoji od segmenata za kalibraciju, proporcionalnu kontrolu i ispisivanje rezultata merenja struje. U prvom prolazu kroz petlju se obavlja kalibracija u jednoj tački za zadati faktor ispunjenosti impulsa D od oko 10%, i vrednost tako podešene struje se koristi kao polazna tačka za proporcionalnu kontrolu. Nakon merenja trenutne struje I_m , definiše se sledeća linearna relacija koja kao rezultat daje novu vrednost faktora ispunjenosti impulsa D_n ukoliko je razlika izmerenog i željenog intenziteta struje veća od zadatog apsolutnog odstupanja δ :

$$D_n = K \cdot D_p + E, \quad (1)$$

gde je D_p prethodna vrednost faktora ispunjenosti impulsa, K faktor proporcionalnosti opisan relacijom:

$$K = \frac{I_s}{I_m}, \quad (2)$$

a E odstupanje koje kompenzuje uticaj ofseta definisanog odsečkom na ordinati u trenutnoj linearnoj zavisnosti, i izračunava se prema izrazu:

$$E = \frac{I_s - I_m}{K}. \quad (3)$$

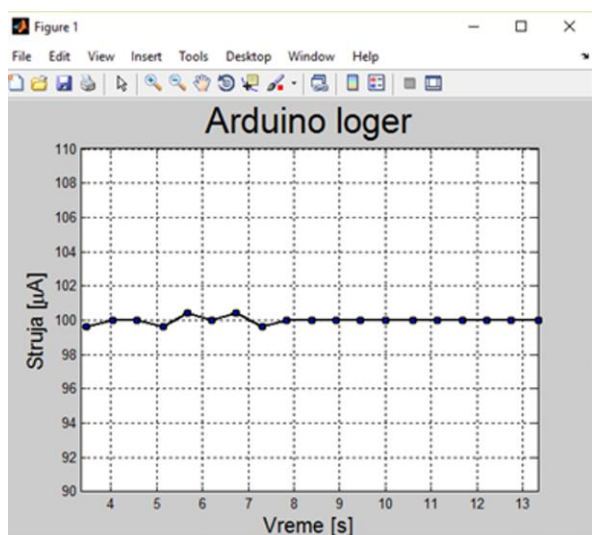
Nakon ponovnog proračuna faktora ispunjenosti impulsa, njegova vrednost se zaokružuje na najbliži ceo broj, a zatim se modifikuje i PWM izlaz na odgovarajućem pinu. Posle obavljene provere odstupanja intenziteta izmerene struje od zadatog intenziteta i eventualnog podešavanja, nova vrednost

izmerene struje se ispisuje na serijskom izlazu. Korisnik može kontinualno pratiti ispis putem serijskog monitora.

Zarad uvođenja mogućnosti odabira frekvencije PWM signala i poboljšanja rezolucije PWM izlaza sa 8-bitne na 10-bitnu, u programski kod je uključena biblioteka TimerOne.h koja manipuliše prvim 16-bitnim hardverskim tajmerom mikrokontrolera ATmega 328 i menja fabrički podešene parametre.

S obzirom na moguće poteškoće koje praćenje ispisa na serijskom monitoru i njegovo procesiranje mogu doneti korisniku, napisan je dodatni programski kod u programskom paketu MATLAB koji omogućava direktnu interakciju korisnika sa hardverom, ali i jednostavnije postupke praćenja i procesiranja mernih podataka. Naime, ovaj programski kod može da prima i šalje podatke putem serijskog porta u formi stringova ASCII formata. Korisnik dobija notifikaciju, i zatim putem komandnog prozora unosi željeni celobrojni intenzitet električne struje. Nakon registrovanja unosa, otvara se grafički prozor u kome se kontinualno iscrtava grafik sa trenutno izmerenim intenzitetom struje. Kod je podešen da očitava podatke sa serijskog porta sa zadatim periodom odabiranja (koji je ≥ 10 ms) pa se svakoj vrednosti izmerene struje može pridružiti i vremenska anotacija. Sesija očitavanja i iscrtavanja se prekida kada korisnik zatvori grafički prozor (videti Sl. 2), pri čemu sve izmerene vrednosti ostaju sačuvane u memoriji.

Ukoliko dođe do greške pri unosu podataka, korisniku se preporučuje da ponovo pokrene izvršavanje programa u Arduino IDE-u ili MATLAB-u s obzirom da postoji samo jedan korak direktne interakcije, a to je unos željenog intenziteta struje unutar definisanog opsega. Važno je napomenuti da se fizički prekid strujne pobude ostvaruje tek isključivanjem napajanja Arduino razvojne ploče.



Sl. 2. Grafički prozor za kontinualno praćenje struje u MATLAB softveru.

IV. KARAKTERIZACIJA STRUJNOG IZVORA

Serijski testovi za kalibraciju i karakterizaciju performansi strujnog izvora je sprovedena pomoću digitalnog multimetra (DT9205A) i digitalnog osciloskopa (INSTRUSTAR

ISDS205A). Karakterisane su tačnost podešavanja struje, talasnost strujnog signala i dinamička stabilnost strujnog izvora. Uređaj je testiran i na realnom eksperimentalnom opterećenju kako bi se procenila njegova upotrebljivost u laboratorijskoj praksi. Najznačajnije karakteristike uređaja su sumarno prikazane u Tabeli I.

TABELA I
OSNOVNE KARAKTERISTIKE STRUJNOG IZVORA

Opseg struje	(10-230) μ A
Nominalna rezolucija podešavanja	1 μ A
Nominalna tačnost podešavanja	± 0.25 μ A
Talasnost struje	< 1.12% pp
Dinamička stabilnost	< ± 0.5 μ A

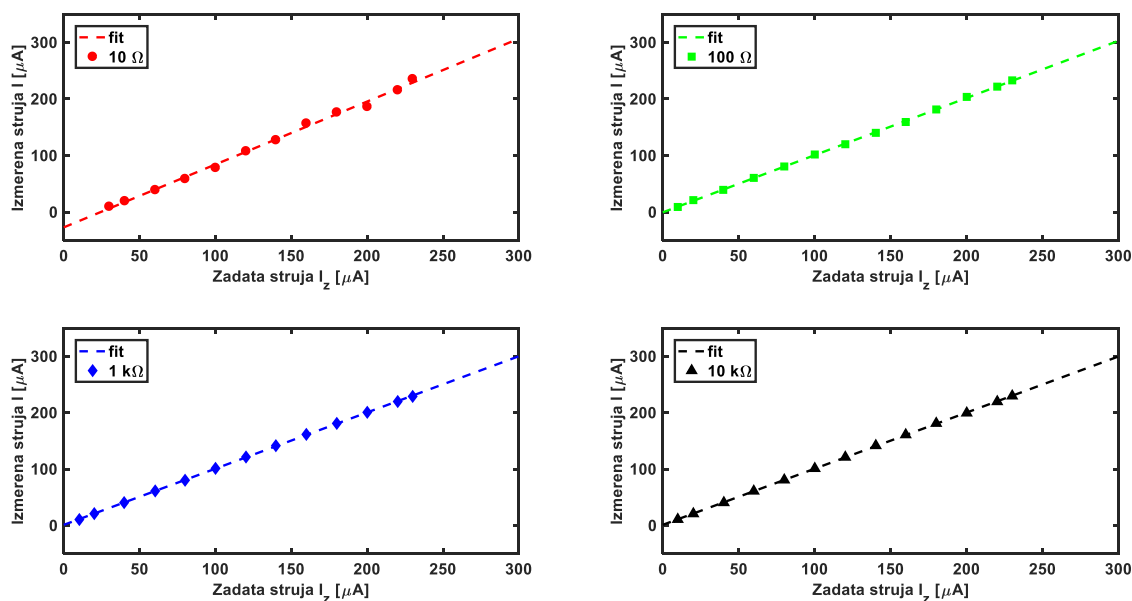
A. Tačnost podešavanja struje

Tačnost podešavanja struje je ispitivana pri različitim rezistivnim opterećenjima i praćena je posredno merenjem napona na opterećenju pomoću digitalnog multimetra. Izračunate vrednosti intenziteta struje dobijene na osnovu merenja digitalnim multimetrom su usvojene kao uslovno tačne vrednosti. Rezultati merenja zavisnosti intenziteta izmerene struje od intenziteta zadate struje su prikazani na Sl. 3. Zavisnost je evidentno linearna za opterećenja od 100 Ω , 1 k Ω i 10 k Ω . Rezultat merenja pri opterećenju od 10 Ω je neadekvatan zbog velike merne nesigurnosti usled nedovoljne rezolucije instrumenta, mada se može uočiti linearni trend. Maksimalno apsolutno odstupanje zadatog intenziteta struje od izmerenog zavisi od opterećenja i opada sa porastom njegove otpornosti. Tako je pri opterećenju od 100 Ω maksimalno apsolutno odstupanje oko 3.6 μ A, pri opterećenju od 1 k Ω oko 1.65 μ A i pri opterećenju od 10 k Ω oko 1.41 μ A. Nagib pravih se razlikuje od idealnog jediničnog nagiba za najviše 1.1% pri opterećenju od 100 Ω , dok je relativno odstupanje pri većim opterećenjima manje od 0.5%.

Tačnost Arduino Uno AD konvertora je određena apsolutnom tačnošću od ± 2 LSB (*Least Significant Bit*) i apsolutnom tačnošću naponske reference od $\pm 0.1\%$. U opisanoj implementaciji uređaja, najveća merna nesigurnost AD konvertora je $\pm (8 \text{ mV} + 0.1\%)$. Tačnost multimetra je ekvivalentna u svim mernim opsezima napona i iznosi u najgorem slučaju $\pm (0.5\% + 1)$. Dakle, multimetar je tačniji pri merenju manjih napona, dok je njegova tačnost slična kao i tačnost AD konvertora pri merenju većih napona od interesa. Ukoliko postoji potreba za boljom tačnošću isporučene struje, neophodna je kalibracija uređaja pomoću laboratorijskog multimetra visoke tačnosti.

B. Talasnost strujnog signala

Talasnost strujnog signala je određena digitalnim osciloskopom na osnovu merenja pada napona na poznatim rezistivnim opterećenjima. Ovaj parametar je srazmeran vrednosti jednosmerne struje kroz opterećenje i njegova amplituda iznosi oko 1% pp (*peak-to-peak*) od intenziteta strujnog signala. Vrednost ovog parametra ukazuje na dobru efikasnost filtriranja PWM signala.



Sl. 3. Tačnost podešavanja struje pri različitim opterećenjima u opsegu od 10 do 230 μA . Idealno poklapanje zadatog i izmerenog intenziteta struje predstavlja prava sa jediničnim koeficijentom pravca koja prolazi kroz koordinatni početak ($I = I_z$).

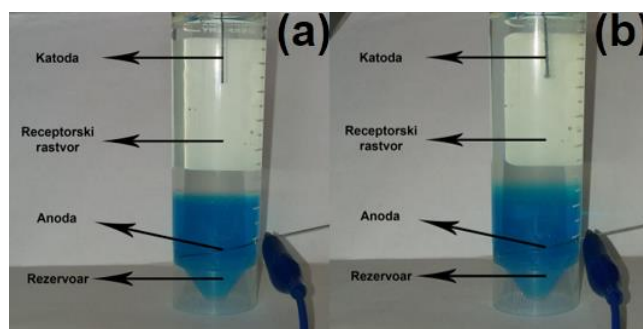
C. Dinamička stabilnost struje

Dinamička stabilnost struje je merena je tokom 1 h na rezistivnom opterećenju od 1 k Ω sa periodom odabiranja od 1 s pri zadatoj struji od 100 μA . Izmereni podaci su snimljeni i naknadno statistički obrađeni. Prosečni intenzitet struje u ovom intervalu je $(100.01 \pm 0.11) \mu\text{A}$ sa pridruženom mernom nesigurnošću u vidu standardne devijacije. Maksimalno apsolutno odstupanje od zadatog intenziteta je bilo 0.38 μA . Pokazuje se da kontrolna petlja dobro održava zadati intenzitet struje, a da su odstupanja u velikoj meri definisana rezolucijom promene intenziteta usled jedinične promene faktora ispunjenosti impulsa na PWM izlazu. Ova rezolucija promene intenziteta struje je zavisna od otpornosti opterećenja. Preliminarni testovi su pokazali da pri otpornosti opterećenja od oko 1 Ω rezolucija promene intenziteta struje iznosi približno 0.5 μA što okvirno predstavlja i limit dinamičke nestabilnosti.

D. Laboratorijski test na realnom opterećenju

Performanse strujnog izvora su testirane u laboratorijskom okruženju pomoću eksperimentalne postavke prikazane na Sl. 4. Opterećenje se sastoji od rezervoara u formi hidrogela ispunjenog rastvorom neorganske soli, receptorskog rastvora elektrolita i cilindričnih grafitnih elektroda prečnika 0.5 mm pomoću kojih se ostvaruje električni kontakt sa uređajem. Rezervoar se sastoji od 10 ml geliranog goveđeg želatina (3% w/v) u kome je rastvoreno 3.318 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. CuSO_4 disosuje u vodenom rastvoru čime se stvaraju katjoni Cu^{2+} koji predstavljaju naelektrisanu formulaciju i njihovo prisustvo se ogleda u plavoj boji rastvora. Receptorski rastvor sadrži 30 ml 1 M rastvora KCl. Anoda se uranja u rezervoar, dok se katoda uranja u receptorski rastvor. Jontoforetsko pumpanje Cu^{2+} pod dejstvom ekscitacije konstantnom

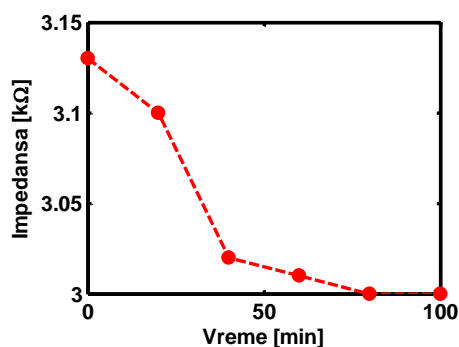
jednosmernom strujom intenziteta 200 μA praćeno je tokom 100 min. Vizuelni efekti jontoforetskog pumpanja se mogu uočiti na Sl. 4.



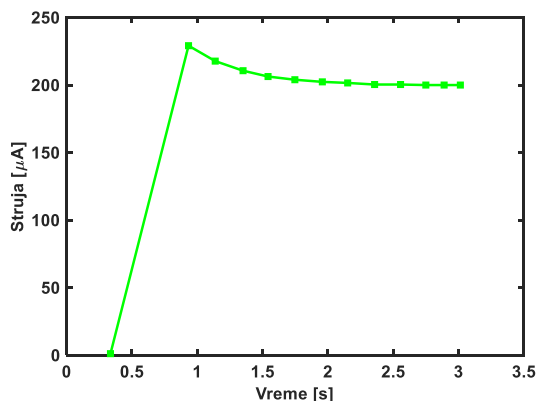
Sl. 4. Izgled eksperimentalne postavke laboratorijskog testa za jontoforetsko pumpanje u početnom i krajnjem trenutku eksperimenta ((a) 0 min i (b) 100 min)

Na Sl. 4 (a) je prikazana postavka pre inicijalizacije jontoforetskog pumpanja, na kojoj se ne uočava obojenost receptorskog rastvora. S druge strane, na Sl. 4 (b) se uočava plava obojenost po čitavoj zapremini receptorskog rastvora, dok je najizraženija u blizini međupovršine hidrogela i receptorskog rastvora. Izdvajanje gasa na elektrodama usled elektrolize potvrđuje postojanje protoka električne struje. Tokom trajanja eksperimenta je povremeno proveravana i impedansa opterećenja i njena vremenska evolucija je ilustrovana na Sl. 5. Dinamička stabilnost strujnog izvora je nakon perioda stabilizacije bila veoma slična kao pri testiranju rezistivnog opterećenja. Period stabilizacije trajao je nešto manje od 3 s posle priključenja opterećenja (videti Sl. 6).

Rezultati testa na realnom opterećenju ukazuju na upotrebljivost konstruisanog strujnog izvora za rutinsko jontoforetsko pumpanje u laboratorijskim *in vitro* uslovima.



Sl. 5. Vremenska evolucija impedanse opterećenja tokom jontoforetskog pumpanja u laboratorijskom testu.



Sl. 6. Stabilizacija intenziteta struje nakon priključivanja realnog opterećenja na strujni izvor. Vreme stabilizacije na osnovu merenja je 2.68 s.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazani dizajn, implementacija i eksperimentalna demonstracija rada programabilnog izvora konstantne jednosmerne struje. Ovakav strujni izvor predstavlja koristan i jeftin alat za *in vitro* laboratorijska ispitivanja u biomedicini koja zahtevaju strujnu pobudu niskog intenziteta. Strujni izvor odlikuju odlična dinamička stabilnost, solidne tranzijentne karakteristike, dobra regulacija pri promeni opterećenja i izvanredna linearnost podešavanja u zadatom opsegu struja.

Ukoliko postoje dodatni i rigorozniji zahtevi kada su u pitanju specifikacije uređaja, postoji više aspekata koji se mogu unaprediti i biće predmet budućih istraživanja. Značajna poboljšanja tačnosti i regulacije rada uređaja mogu se postići dodavanjem digitalno-analognog (DA) i AD konvertora visoke rezolucije što je od posebnog značaja pri regulaciji veoma niskih struja. Uz određene modifikacije, uređaj se može učiniti potpuno prenosivim i nezavisnim od računara (na primer dodavanjem LCD (*Liquid Crystal Display*) ekrana i baterijskog napajanja). Kao dodatak postojećem softveru, može se napraviti i nezavisna aplikacija sa jednostavnim grafičkim interfejsom koja bi služila za korišćenje uređaja na računarima koji nisu opremljeni namenskim softverima kao što su MATLAB ili Arduino IDE.

Zbog svoje jednostavnosti, modularnosti i niske cene, opisani programabilni strujni izvor može postati popularna alternativa komercijalnim preciznim strujnim izvorima, pre

svega u biomedicinskim laboratorijama gde primarna delatnost ne obuhvata električna merenja, već opštiju karakterizaciju odziva hemijskih ili bioloških sistema na električne pobude.

ZAHVALNICA

Autor se zahvaljuje Institutu tehničkih nauka SANU na obezbeđivanju uslova za sprovođenje preliminarnih testova i eksperimentalne demonstracije rada uređaja.

LITERATURA

- [1] A. K. Banga, *Transdermal and Intradermal Delivery of Therapeutic Agents: Application of Physical Technologies*, Boca Raton, United States of America: CRC Press, 2011.
- [2] R. W. Invernizzi and E. Esposito, "Microiontophoresis and Related Methods," in *Encyclopedia of Psychopharmacology*, pp. 775–781, Germany: Springer, 2010.
- [3] M. R. Park, "Constant current source for iontophoresis," *J. Neurosci. Methods*, vol. 29, no. 1, pp. 85–89, Jul. 1989.
- [4] C. T. S. Ching, I. Camilleri, and P. Connolly, "A low-cost, programmable device for versatile current delivery in iontophoresis applications," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 106, no. 2, pp. 534–540, 2005.
- [5] K. Song, U. Ha, J. Lee, K. Bong, and H. J. Yoo, "An 87-mA · min Iontophoresis Controller IC with Dual-Mode Impedance Sensor for Patch-Type Transdermal Drug Delivery System," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 1, pp. 167–178, 2014.
- [6] "Arduino programmable constant current power supply." [Online]. Available: <http://henrysbench.captfatz.com/henrys-bench/arduino-projects-tips-and-more/arduino-programmable-constant-current-power-supply/>. [Accessed May 23, 2017].
- [7] "Arduino UNO & Genuino UNO," 2017. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>. [Accessed May 23, 2017].
- [8] Microchip, "Rail-to-rail input/output, 10 MHz op amps," MCP6021 datasheet, Nov. 2001 [Revised Jan. 2017].
- [9] Texas Instruments, "INA333 micro-power (50 μA), zero-drift, rail-to-rail out instrumentation amplifier," INA333 datasheet, Jul. 2008 [Revised Dec. 2015].
- [10] Texas Instruments, "LM4040-N/-Q1 precision micropower shunt voltage reference," LM4040-N datasheet, Oct. 2000 [Revised June 2016].

ABSTRACT

Direct current sources are the key functional components of iontophoretic devices. Delivery of potent or sensitive charged formulations by means of iontophoretic pumping requires a controllable application of low-intensity electric currents. Realization of the simple and low-cost programmable constant current source based on the Arduino Uno platform is presented in this contribution. Device comprises the hardware for continuous current generation and monitoring, while the implemented software enables dynamic regulation of current intensity and provides the basic user interface. The current source performed well in the current intensity range between 10 and 230 μA, and its applicability for routine *in vitro* laboratory tests of iontophoresis was demonstrated. Constructed current source can be a useful tool for iontophoresis researchers with different backgrounds.

Simple programmable current source for controlled delivery via iontophoresis

Željko Janićijević