

Jedno rješenje automatizacije programiranja KnowM memristora

Ivo Marković, Milka Potrebić, Dejan Tošić
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

ivo1990@gmail.com, milka_potrebic@etf.rs, tosic@etf.rs

Sažetak—Prema raspoloživim informacijama, KnowM je trenutno jedna od rijetkih kompanija koja je proizvela komercijalno dostupni memristor. Da bi se memristori mogli upotrijebiti u nekom električnom kolu, neophodno je automatizovati proces programiranja. Ovaj rad predstavlja predlog projektovanja softvera i hardvera za automatizaciju programiranja KnowM-ovog memristora. U tu svrhu se koristi mikrokontroler kome je po potrebi moguće pristupiti sa neke udaljene lokacije. Sam mikrokontroler vrši podešavanja napona koji se primjenjuju na memristor, kao i mjerenja odziva memristora.

Ključne riječi—memristor; mikrokontroler; programiranje;

I. UVOD

Memristor je četvrti osnovni element teorije električnih kola, postuliran 1971. godine od strane prof. Leona Čue [1]. Od 2008. godine, kada je prvi put proizveden u HP laboratoriji [2], postao je popularna tema za istraživače iz raznih oblasti elektrotehnike. Razlog leži u činjenici da posjeduje brojna povoljna svojstva kao što su da otpornost ostaje konstantna na RF/mikrotalasnim učestanostima, ima male dimenzije – reda nekoliko nanometara, ima kratko vrijeme tranzicije iz stanja male otpornosti (ON stanje) u stanje velike otpornosti (OFF stanje), i obratno. Takođe, ova komponenta je mali potrošač jer joj nije potrebno jednosmjerno napajanje za vrijeme radnog režima. Procjenjuje se da ima dugačak vijek upotrebe.

Sa teorijske tačke gledišta, memristori stoje veoma povoljno. U literaturi je moguće naći predloge primjena memristora u RF/mikrotalasnim pasivnim kolima kolima [3]–[6]. U oblasti projektovanja mikrotalasnih filtara, memristori su korišćeni za poboljšanje rekonfigurabilnosti i performansi [7]–[9], a postoji prostor za unaprjeđenje filtara kao što su [10] i [11]. Navedeni predlozi analizirani su korišćenjem nekoliko modela memristora, od kojih su možda najznačajniji [12] i [13]. Poređenja modela memristora za upotrebu na RF/mikrotalasnim učestanostima i tranzicija memristora između ON i OFF stanja u planarnim filtrima prikazani su u [14] i [15].

Prema informacijama dostupnim autorima, trenutno ne postoji dostupan uređaj za rad na RF/mikrotalasnim učestanostima. Iz tog razloga, autori su se odlučili da koristeći KnowM-ov [16] memristor pokažu princip rada kola sa memristorima. U tom kontekstu je i predmet ovog rada predlog jednog mogućeg rješenja za programiranje KnowM memristora.

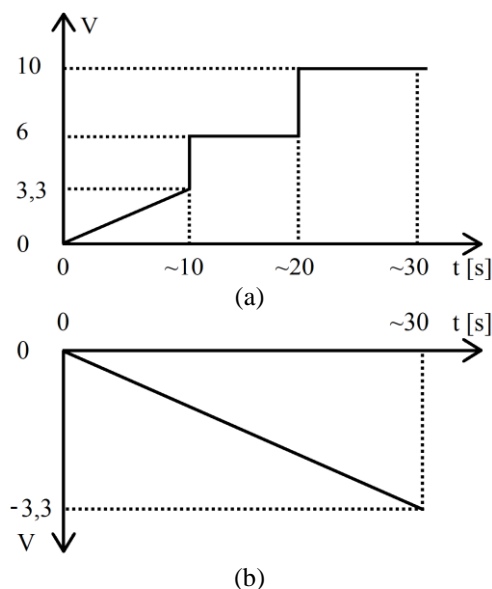
Drugo poglavlje predstavlja prikaz eksperimentalnih rezultata dobijenih analizom memristora. U trećem poglavlju je prikazan i objašnjen hardver koji se koristi za dovođenje adekvatnih naponskih nivoa, koje je neophodno primijeniti kad se memristor programira. Takođe, prikazano je kako se može pratiti promjene na memristoru. Četvrto poglavlje daje predlog algoritma za realizaciju softvera kojim se podešava otpornost memristora, odnosno memristansa. U petom poglavlju navedene su ideje za dalja unaprjeđenja sistema, kao i mogućeg povezivanja sa drugim sistemima.

II. EKSPERIMENTALNO-ODREĐIVANJE PARAMETARA MEMRISTORA

Eksperimentalna analiza “KnowM Burn and Learn” čipova [16] je omogućila uvid u karakteristike memristora. Korišćenjem osciloskopa, signal generatora i napajanja, realizovana je automatska promjena stanja memristora.

Prije prvog programiranja memristora, neophodno ih je formirati. To je moguće postići postepenim povećavanjem primijenjenog prostoperiodičnog napona, frekvencije 100 Hz, na memristoru, u opsegu od 0 V do oko 3–4 V. Kada se dostigne maksimum, potrebno je napon postepeno smanjiti na 0 V. Cio ovaj postupak je potrebno ponoviti dva puta.

Otpornost memristora se može očitati primjenom prostoperiodičnog napona amplitude od oko 1 V, i frekvencije od 10 kHz. Memristor je potrebno vezati redno sa otpornikom, tako da se pad napona može izračunati. Uloga otpornika je i da spriječi pregorevanje memristora, ograničavajući struju koja protiče kroz memristor. Optimalna vrijednost otpornika je oko 50 kΩ. Kada se memristor programira iz stanja male otpornosti (ON stanje) u stanje velike otpornosti (OFF stanje), potrebno je postepeno povećavati napon od 0 V do oko 10 V. Redna veza otpornik – memristor može se tretirati kao naponski razdjelnik, pri čemu se mijenja vrijednost memristansa. Ta promjena utiče na promjenu napona na naponskom razdjelniku, pa se na osnovu toga može proračunati za koliko se promijenila otpornost memristora. Drugim riječima, mogu se pratiti promjene na memristoru. Memristansa u OFF stanju može imati otpornost i do oko 500 kΩ. Na Sl. 1 (a) je prikazan naponski oblik koji je potrebno dovesti na memristor da bi se izvršilo programiranje iz ON u OFF stanje.



Slika 1. Naponski oblici za programiranje memristora: (a) ON – OFF; (b) OFF – ON

Kada se memristor programira iz OFF u ON stanje, polako se mijenja primijenjeni napon od 0 V ka -3 V. Vrijednost memristansa se može odrediti na isti način kao i u prethodnom slučaju. Memristansa u ON stanju se može smanjiti ispod 1 k Ω . Na Sl. 1 (b) je prikazan naponski oblik koji je potrebno dovesti na memristor da bi se izvršilo programiranje iz OFF u ON stanje.

III. HARDVERSKA REALIZACIJA AUTOMATSKOG PODEŠAVANJA STANJA MEMRISTORA

Da bi se programiranje memristora, kao i komunikacija sa spoljnim uređajima (senzori, mikrokontroleri...), korisnicima, sprovela na što jednostavniji način, potrebno je izabrati adekvatan mikrokontroler, odnosno razvojnu ploču. Nakon analize uređaja dostupnih na našem tržištu, razvojna ploča STM32VLDISCOVERY [17] (Sl. 2) je izabrana. Ona sadrži sve potrebne komponente i periferije (unutrašnje i spoljašnje) neophodne za našu realizaciju. Neke od glavnih karakteristika razvojne ploče su :

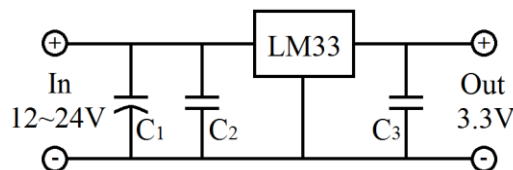
- ARM cortex M3 procesor koji radi na učestanostima do 72 MHz
- Radni naponski opseg od 0 do 3,3 V, ili od 0 do 5 V
- 2 digitalno-analoga konvertera (DAC) sa 12-bitnom preciznošću
- 1 analogno-digitalni konverter (ADC) sa 16-bitnom preciznošću
- Obilje ulaznih/izlaznih pinova (GPIO)
- Nekoliko tajmera
- Podržava više tipova komunikacionih protokola
- LED indikatori, tasteri.



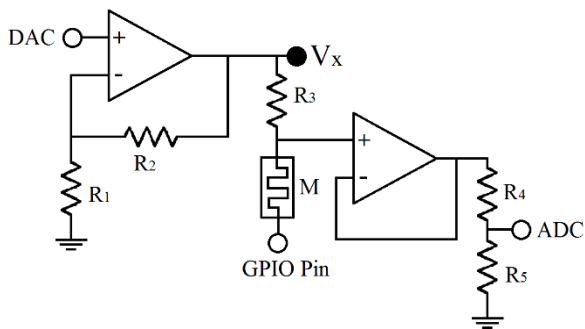
Slika 2. Razvojna ploča STM32VLDISCOVERY

Kao što je već napomenuto, prema rezultatima dobijenim u laboratoriji, naponski oblici koje je potrebno dovesti na memristor, kako bi se isti prebacio iz ON u OFF stanje, i obratno, prikazani su na Sl. 1 (a) i (b), redom. Ovdje se navodi predlog projektovanja hardvera koji omogućava postizanje tih oblika. Prije svega, potreban je izvor napajanja. To može biti AC-DC adapter, ili baterije (čiji je radni napon 10 ili više volti). Za podešavanje izlaznog napona koristi se DAC mikrokontrolera koji može raditi u opsegu od 0 do 3,3 V. Za napajanje mikrokontrolera i operacionog pojačavača, potrebni su stabilizatori napona. Na Sl. 3 je prikazan primjer za stabilizaciju na 3,3 V. Ekvivalentno se može uraditi i za druge vrijednosti napona. LM33 je regulator napona na 3,3 V. Vrijednosti ostalih elemenata sa Sl. 3: $C_1 = 100 \mu\text{F}$; $C_2 = 100 \text{ nF}$; $C_3 = 100 \text{ nF}$.

Korišćenjem neinvertujućeg pojačavača, radni napon iz opsega 0 do 3,3 V se skalira na opseg 0 do 10 V. To strujno kolo se sastoji od operacionog pojačavača i nekoliko otpornika (Sl. 4). ADC pin je povezan na mikrokontroler, čiji je naponski



Slika 3. Stabilizator napona (na 3,3V)



Slika 4. Kolo za programiranje u realizaciji sa neinvertujućim pojačavačem

opseg od 0 do 3,3 V. Koriste se otpornici $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ i $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ da bi se pojačao signal iz mikrokontrolera do naponskog nivoa od 10 V. Pošto je preciznost ADC-a 12 bita, to znači da postoji $(2^{12}-1)/3=1365$ naponskih nivoa u opsegu [0, 10] V. To je više nego dovoljna preciznost za ovu primjenu.

Drugi operacioni pojačavač se koristi kao naponski bafer, da bi se eliminisao uticaj velikih otpornosti (memristora i otpornika R_3) na očitavanje ADC-a, odnosno da bi se eliminisalo curenje struje iz grane sa memristorom u dio kola sa otpornicima R_4 i R_5 . Otpornici $R_4 = 20 \text{ k}\Omega$ i $R_5 = 10 \text{ k}\Omega$ se koriste da se napon na memristoru normira na nivo koji mikrokontrolerov ADC može da očita, a to je od 0 do 3,3 V. ADC ima 16-bitnu preciznost, tako da je još precizniji nego DAC koji se koristi.

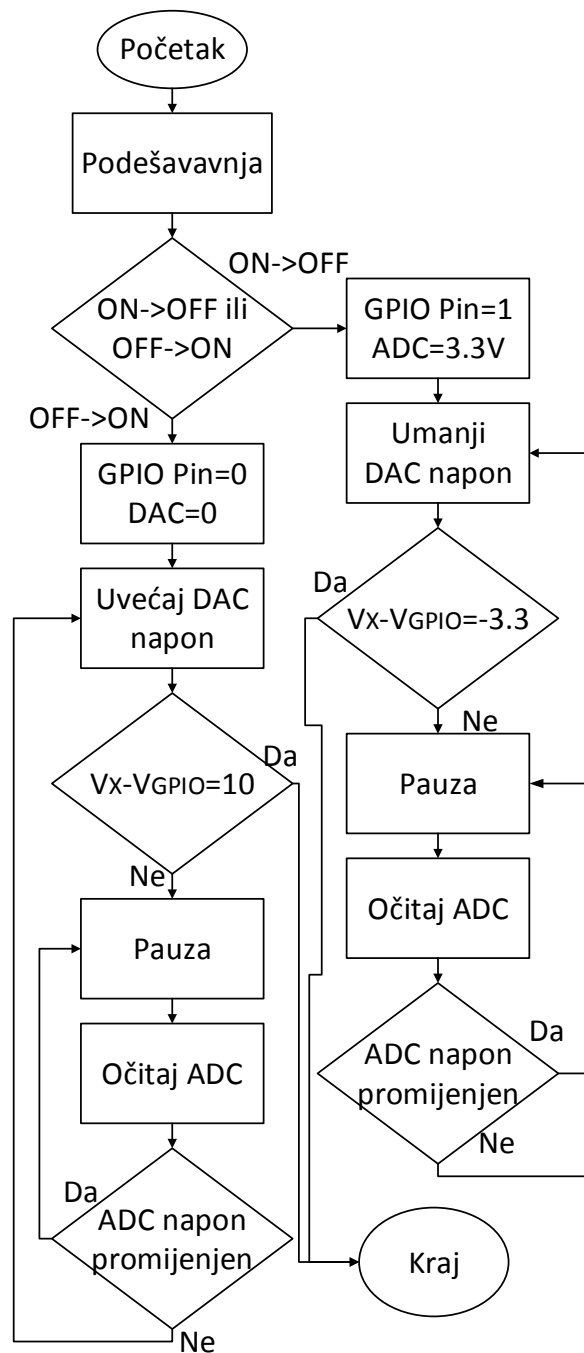
Operacioni pojačavači se napajaju iz stabilizatora napona, sa 10 V. Otpornik $R_3 = 50 \text{ k}\Omega$ se koristi za ograničavanje maksimalne struje kroz memristor. On čuva memristor od pregrijavanja.

GPIO pin je postavljen na 0 V (za programiranje iz OFF u ON stanje), odnosno na 3,3 V (za programiranje iz ON u OFF stanje). Na ovaj način, eliminiše se potreba za dodatnim, negativnim izvorom napajanja. Kada je GPIO pin podešen na 0 V, ponaša se kao masa (GND), i tada je prisutan pozitivan napon na memristoru. Kada je GPIO pin podešen na 3,3 V, i DAC signal je u opsegu [0; 1,1] V, odnosno [0; 3,3] V na izlazu neinvertujućeg pojačavača, tada je prisutan negativan napon na memristoru.

IV. SOFTVERSKA REALIZACIJA AUTOMATSKOG PODEŠAVANJA STANJA MEMRISTORA

STM32VLDISCOVERY podržava mnogo komunikacionih protokola, pa može biti lako podešena za upotrebu. Najjednostavnije rješenje za pokretanje programiranja je korišćenje tastera. LED lampice mogu biti indikatori koji ukazuju u kom je statusu programiranje. Nije teško napraviti korisnički interfejs koji omogućava lakše upravljanje i praćenje stanja memristora. U sledećem poglavlju će biti predložen jedan način za unaprjeđenje sistema. Bez obzira na interfejs koji se koristi da bi se započeo jedan od dva režima programiranja memristora, algoritam programiranja je isti.

Na Sl. 5 je prikazan dijagram toka programa. Prvo se podešavaju sve unutrašnje i spoljašnje periferije. Sledeći korak je čekanje spoljašnjih instrukcija: da li će se izvršiti programiranje iz ON u OFF stanje, ili iz OFF u ON stanje.



Slika 5. Algoritam za automatski režim programiranja memristora

Kada je pristigla inicijalna instrukcija, GPIO pin i DAC se postavljaju na odgovarajuće vrijednosti. Prije čitanja vrijednosti na ADC-u, umeće se kratka pauza, da se ostavi vremena da primijenjeni napon na memristoru ostvari promjenu.

Otpornost memristora se očitava preko ADC-a. Redna veza otpornik R_3 - memristor predstavlja naponski razdjelnik. Pošto je otpornost R_3 poznata, može se izračunati otpornost memristora. Takođe, u obzir se uzima i činjenica da naponski

razdjelnik koji čine otpornici R_4 i R_5 umanjuje očitani napon na ADC-u tri puta u odnosu na napon na rednoj vezi otpornik R_3 - memristor.

Nakon očitavanja vrijednosti na ADC-u, provjerava se da li je naponski nivo između izlaza neinvertujućeg pojačavača (tačka V_x sa Sl. 4) i GPIO pina dostigao maksimum (10 V) ili minimum (-3.3 V), zavisno od režima programiranja. Ako je neka od ekstremnih vrijednosti dostignuta, to znači da je ciklus programiranja završen. Ako nije dostignuta ekstremna vrijednost napona, nastavlja se sa programiranjem.

Kada se očita napon na ADC-u, provjerava se da li se vrijednost promijenila u odnosu na prethodnu očitano vrijednost. Ako nema promjene, nastavlja se sa povećavanjem (odnosno smanjivanjem) napona. U slučaju da se očitani naponski nivo razlikuje u odnosu na prethodno očitani nivo, čeka se dok se ne stabilizuje.

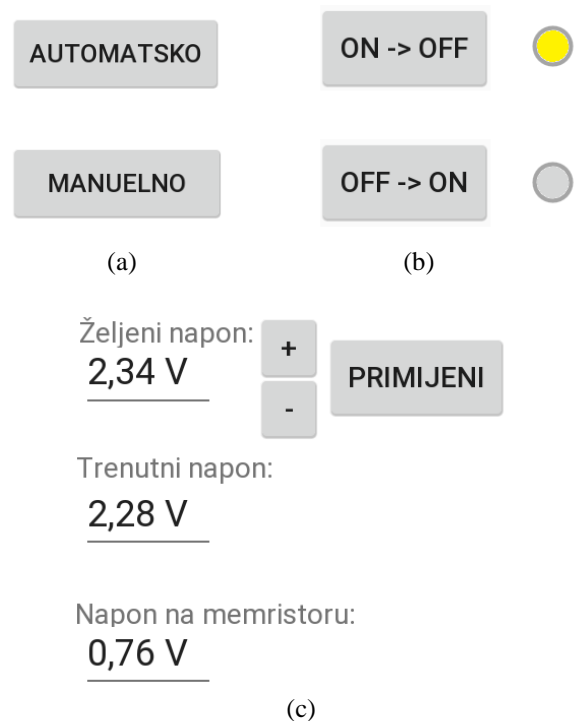
V. MOGUĆA UNAPRIJEĐENJA SISTEMA ZA AUTOMATSKO PODEŠAVANJE MEMRISTANSE

Jedno od mogućih unaprjeđenja sistema za programiranje i praćenje stanja memristora odnosi se na poboljšanje korisničkog interfejsa. Ovdje će se kao primjer uzeti povezivanje sa Android mobilnim uređajem. Povezivanje sa postojećim sistemom je jednostavno. Sa strane Android uređaja, može se koristiti Bluetooth modul, dok se na STMVLDISCOVERY razvojnu ploču može dodati spoljašnji Bluetooth modul (kao npr HC-05 [18]). Komunikacija može da se obavlja preko USART-a.

Ideja je da se Android uređaj konfigurira kao *master*, a STMVLDISCOVERY kao *slave*. Korisnik preko jednostavnog interfejsa na svom mobilnom uređaju zadaje komande koje se proslijeđuju razvojnoj ploči. Komande mogu biti naredbe da se pokrene neki od režima rada, podese neka od periferija razvojne ploče, ili da razvojna ploča proslijedi Android uređaju podatak o stanju memristora.

Korisnički interfejs na Android uređaju mogao bi izgledati kao na Sl. 6. Redom su pokazani glavni meni za izbor režima rada – automatski i manualni, izgled interfejsa za automatski i manualni režim rada. U automatskom režimu korisnik bira polje ON->OFF, ili OFF->ON, i na indikatorskim lampicama vidi da li je programiranje u toku, odnosno da li je uspješno završeno. U manualnom režimu rada, korisnik može da vidi koji trenutni napon je primijenjen, da provjeri napon na samom memristoru, kao i da podese novi primijenjeni napon.

Logičan nastavak ogledao bi se u mogućnosti očitavanja vrijednosti memristansa preko Android uređaja. Kao što je ranije napomenuto, memristansu je moguće očitati primjenjujući prostoperiodični napon učestanosti 10 kHz. Razvojna pločica se može isprogramirati tako da generiše prostoperiodični napon, čak i na mnogo višim frekvencijama [19]. Takođe, bilo bi neophodno dovoljno često uzimati odbirke napona na memristoru. Pošto je otpornost R_5 poznata, može se izračunavati struja memristora. Na taj način je moguće formirati Lisažuovu figuru, koja bi bila prikazana na Android uređaju.



Slika 6. Interfejs za programiranje memristora korišćenjem Android uređaja: (a) glavni meni; (b) automatski režim; (c) manualni režim.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta TR 32005.

LITERATURA

- [1] L. Chua, "Memristor – "The missing circuit element"", IEEE Transactions on Circuit Theory, vol. CT-18, no. 5, pp. 507–519, 1971.
- [2] D. Strukov, G. Snider, D. Stewart, R. Williams, "The missing memristor found", Nature, vol. 453, no. 7191, pp. 80–83, 2008.
- [3] M. Potrebić, D. Tošić, "Application of memristors in microwave passive circuits", Radioengineering, vol. 24, no. 2, pp. 408–19, 2015.
- [4] M. Potrebić, D. Tošić, D. Biolek, RF/microwave applications of memristors. In: S. Vaidyanathan, C. Volos, editors. Advances in memristors, Memristive Devices and Systems. Cham, Switzerland: Springer; 2017. pp. 159–185, chapter 7.
- [5] M. Potrebić, D. Tošić, "Potential applications of memristors in microwave circuits", Proceedings of the 13th International Conference on Applied Electromagnetics (PES), Niš, Serbia, 12 1–4, 2017.
- [6] I. Marković, M. Potrebić, D. Tošić, "Main-line memristor mounted type loaded-line phase shifter realization", Microelectronic Engineering. vol. 185, pp.48-54, 2018.
- [7] M. Potrebić, D. Tošić, A. Plazinić, "Reconfigurable multilayer dual-mode bandpass filter based on memristive switch", International Journal of Electronics and Communications (AEÜ), vol. 97, pp. 290-297, 2018.
- [8] K. Xu, Y. Zhang, L. Wang, M. Yuan, Y. Fan, W. Joines, i dr., "Two memristor SPICE models and their applications in microwave devices". IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. 13, no. 3, pp. 607–16, 2014.
- [9] M. Potrebić, D. Tošić, D. Biolek, "Reconfigurable microwave filters using memristors". International Journal of Circuit Theory and Application, vol. 46, pp. 113–21, 2018.

- [10] A. Plazinić, M. Potrebić, D. Tošić, “Compact microwave multilayer dual-band bandpass filter with folded dual-mode resonators”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 19, no. 5, pp. 352–8, 2017.
- [11] A. Plazinić, M. Potrebić, D. Tošić, M. Plazinić, “Compact microwave triple-mode bandpass filter in planar technology”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 217–28, 2017.
- [12] D. Birolek, M. Di Ventra, Y. Pershin, “Reliable SPICE simulations of memristors, memcapacitors and meminductors”, *Radioengineering*, vol. 22, no. 4, pp. 945–968, 2013.
- [13] S. Pi, M. Ghadiri-Sadrabadi, J. Bardin, Q. Xi: “Nanoscale memristive radiofrequency switches”, *Nature Communications*, vol. 7519, no. 6, pp. 1–9, 2015.
- [14] I. Marković, M. Potrebić, D. Tošić, Z. Cvetković, “Comparison of memristor models for microwave circuit simulations”, *Proceedings of the 13th International Conference on Applied Electromagnetics (PES)*, Niš, Serbia, P10 1–4, 2017.
- [15] I. Marković, M. Potrebić, D. Tošić, “Memristor state transition in reconfigurable microwave filter”, *Proceedings of the 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL)*, Niš, Serbia, pp. 71–74, 2017.
- [16] KnowM, Inc., Santa Fe, NM, 87502–4698, USA. <http://knowm.org>.
- [17] STMVL Discovery, <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32vldiscovery.html>.
- [18] HC-05 datasheet, Itread Studio ftp://imall.itreadstudio.com/Modules/IM120723009/DS_IM120723009.pdf
- [19] Predrag Rudić, “Programabilni generator talasnih oblika”, 32-bitni mikrokontroleri i primena, Katedra za elektroniku, ETF Beograd, 2013.

ABSTRACT

According to available information, to the present day, KnowM is one of a few companies that has produced commercially available memristor. In order to apply memristors in some electrical circuitry, it is required to automate process of its programming. This paper proposes design of software and hardware required for automatization of programming of KnowM’s memristors. For that purpose, microcontroller which could be remotely accessed is used. Microcontroller sets adequate voltage levels that should be applied on memristor, and measures memristor responses.

ONE SOLUTION OF AUTOMATISATION OF KNOWM’S MEMRISTOR PROGRAMMING

Ivo Marković, Milka Potrebić, Dejan Tošić