

Dizajn ručnog mikroammetra na bazi LiPo baterija

Nenad Jovančić, Timur Delić, Saša Vučićević

Odjeljenje za razvoj elektronskih sistema

KV Team d.o.o, Sarajevo

Bosna i Hercegovina

nenad.j@kvteam.com, timur.d@kvteam.com, sasa.v@kvteam.com

Sažetak—Tokom razvoja, proizvodnje i eksploatacije elemenata elektroenergetskih sistema, kao što su energetska prekidači, javlja se potreba za mjerenjem otpornosti njegovih kontakata. Ove otpornosti su jako male, reda mikrooma, pa se za njihova mjerenja koriste posebno dizajnirani mjerni instrumenti – mikroammetri. Najčešća metoda kod mjerenja tako malih otpornosti jeste Kelvinova (4-žična) metoda. Zasniva se na mjerenju pada napona na testnom objektu prilikom proticanja poznate struje kroz taj objekat. Odnosom izmjerenog napona i poznate struje, preko Omovog zakona, dolazi se do vrijednosti otpornosti. Naveden je pregled tipičnih konstrukcija mikroammetera koji vrše mjerenja prema ovoj metodi. Poseban akcenat je stavljen na ručne, baterijski napajane instrumente, koji su bazirani na upotrebi superkondenzatora. Izložen je koncept novog izvora mjerne struje realizovanog preko LiPo baterija i linearnog strujnog regulatora, koji nudi superiornije karakteristike u odnosu na rješenja sa superkondenzatorima. Na kraju je predstavljen dizajn i ostvareni rezultati kompletnog mikroammetera baziranog na LiPo baterijama.

Ključne riječi—mikroammetri; Kelvinova metoda, LiPo baterije, (microohmmeters, Kelvin probes, LiPo batteries)

I. UVOD

Nesporna je uloga i značaj električne energije u funkcionisanju modernog društva. Sistem za proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije je veoma složen i izložen različitim, najčešće teškim, uslovima rada (klimatske promjene, elementarne nepogode, elektro-mehanička naprezanja...). Obzirom na značaj snadbijevanja električnom energijom, pred sistem za njenu proizvodnju, prenos i distribuciju, kao ključni zahtjev, stavlja se pouzdanost. Kako bi se verifikovala zahtijevana pouzdanost, definisane su norme/standardi prema kojima se vrši ispitivanje svakog elementa sistema tokom razvoja, nakon proizvodnje i posle toga, periodično, tokom eksploatacije. Imajući u vidu različit broj i vrstu elemenata EES-a, različite su i vrste sistema (uređaja) za njihovo ispitivanje.

Prilikom ispitivanja prekidnih elemenata, kao što su energetska prekidači i rastavljači ili kod priključnih elemenata kao što su sabirnice i šinski razvodi, između ostalog, vrši se mjerenje otpornosti kontakata, odnosno veza. Vrijednosti ovih otpornosti spadaju u područje mikrooma (par desetina do nekoliko stotina).

U ovom radu biće riječi o načinu tipovima instrumenata kojima se vrši mjerenje malih otpornosti. U tom cilju, biće analizirane različite izvedbe mjernih krugova. Takođe, predstavljena je realizacija ručnog, baterijski napajano mikroammetera, bazirana na tehnologiji LiPo (Litijum-Polimer) baterija, koja nudi niz prednosti u odnosu na postojeća rješenja te vrste instrumenata.

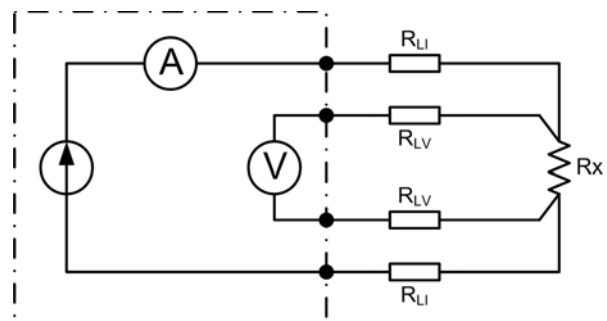
II. KELVINOVA METODA KOD MJERENJA MALIH OTPORNOSTI

Generalno, određivanje otpornosti svodi se na mjerenje napona između krajnjih tačaka mjenog elementa i struje kroz taj element. Preko Omovog zakona (1), koji definiše odnos napona (U_{mj}), struje (I_{mj}) i otpornosti (R), određuje se vrijednost otpora.

$$R = U_{mj} / I_{mj} \quad (1)$$

Zavisno od očekivane vrijednosti otpora i zahtijevane tačnosti, razlikuju se i metode mjerenja [1]. Kao što je navedeno u uvodu, oblast interesovanja ovog rada vezana je za mjerenja otpornosti u oblasti od par desetina mikrooma do jednog milioma. U te svrhe najčešće se koristi 4-žična Kelvinova metoda koja obezbjeđuje visoku tačnost i ponovljivost rezultata mjerenja. Ovu metodu je prvi put predstavio 1876. godine britanski fizičar Vilijam Thomson (engl. *William Thomson*), poznatiji kao Lord Kelvin. [2]

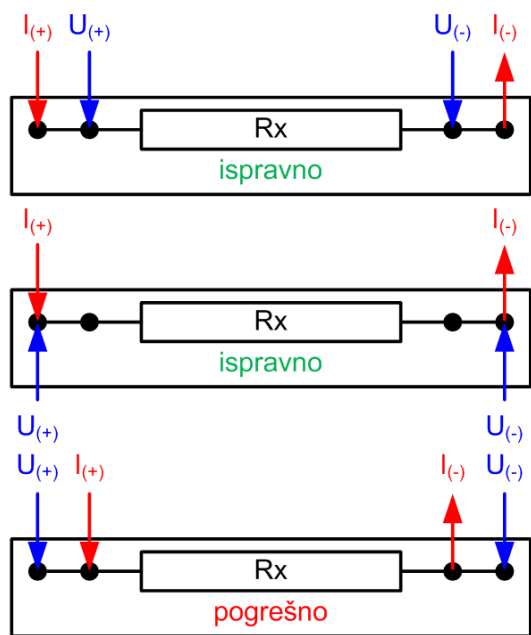
Kelvinova metoda koristi četiri odvojenavoda (linije, žice) – preko dvije se dovodi struja do mjenog elementa, druge dvije se koriste za mjerenje pada napona na krajevima mjenog elementa (sl. 1).



Slika 1. Kelvinova (4-žična) metoda mjerenja otpora

Mjerna struja, koja protiče kroz mjereni element, je konstantna i ne zavisi od otpornosti veza (R_{LI}) kojima se dovodi do testnog objekta. Preko drugog para provodnika (R_{LV}) se na ulaz naponskog mjernog kanala dovodi informacija o padu napona na krajevima mjenog elementa. Visokoomski ulaz naponskog mjernog kanala obezbjeđuje nezavisnost mjerenja od otpornosti mjernih veza (R_{LI} i R_{LV}).

Za korektnost mjerenja Kelvinovom metodom, neophodno je voditi računa o načinu spajanja priključaka na testni objekat. S „vanjske strane“ se postavljaju strujni priključci ($I_{(+)}$ i $I_{(-)}$), dok s unutrašnje treba da se nađu naponski mjerni priključci ($U_{(+)}$ i $U_{(-)}$). Ilustracija je prikazana na sl. 2.



Slika 2. Kelvinova metoda - ispravni i pogrešni načini vezivanja priključaka na testni objekat

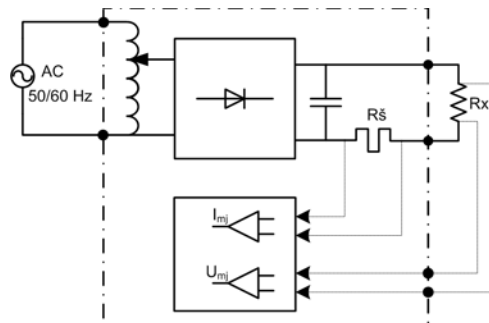
Veće vrijednosti mjerne struje obezbjeđuju veće padove napona na mjernom objektu, samim tim povećavaju kvalitet mjerenja (tačnost i ponovljivost). Kelvinovu metodu moguće je izvoditi naizmjeničnom (AC) i jednosmjernom (DC) strujom. Rezultati dobijeni mjerenjem AC strujom predstavljaju ukupnu impendansu, dok se korišćenjem DC struje dobijaju čisto omske vrijednosti otpora. Instrumenti koji vrše mjerenje malih otpora najčešće se nazivaju **mikroammometri**. U nastavku će biti više riječi o mikroammometrima koji rade na bazi DC struje i koriste Kelvinovu metodu mjerenja.

III. PREGLED VRSTA MIKROAMMETARA DOSTUPNIH NA TRŽIŠTU

Na tržištu postoji različit broj mikroammometara koji svoj rad baziraju na Kelvinovoj metodi i DC struji. Obično se rangiraju prema snazi (mjernoj struji), mjernom opsegu i tačnosti. Mjerne struje se kreću od par desetina ampera do nekoliko stotina (čak i hiljadu) ampera. Tačnost mjerenja ide od 5,0 % do 0,1%, dok mjerni opseg može biti od par mikroama do par oma. Navedeni dijapazon karakteristika posljedica je različitosti u izvedbi konstrukcije. U daljem tekstu slijedi pregled tipičnih konstrukcija sa kratkim opisom svake od njih.

A. Mikroammometri napajani iz mreže – rade na mrežnoj frekvenciji (50/60 Hz)

Ovo je najjednostavniji instrument ovog tipa. Centralni dio konstrukcije predstavlja auto-transformator sa diodnim ispravljačem na izlazu. Regulacija struje se vrši ručno, promjenom prenosnog odnosa auto-transformatora. Mjereći pad napona na šentu (R_S) i na mjenom objektu (R_x) dobijaju se podaci o struji i naponu mjenog objekta, na osnovu čega se određuje nepoznata vrijednost otpornosti R_x (sl. 3).

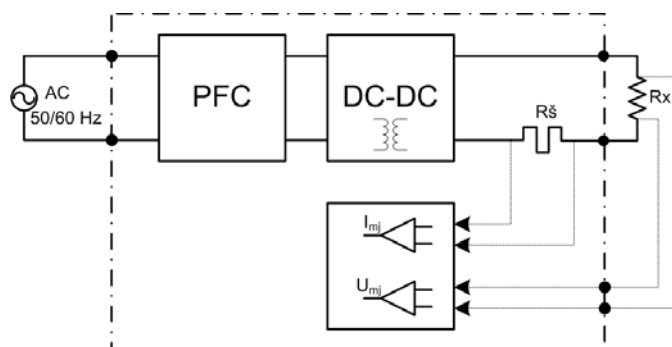


Slika 3. Pojednostavljena šema mikroammometra napajano iz mreže koji radi na mrežnoj frekvenciji

Ovaj tip mikroammometara karakteriše nepovoljan odnos težina-snaga, prisustvo 100/120 Hz talasnosti mjerne struje (koju je teško filtrirati) i ne postoji galvanska izolacija između ulaza i izlaza. Uvođenje dodatnog transformatora, koji obezbjeđuje i galvansku izolaciju, dodatno pogoršava ionako loš odnos težine i snage. Pojavom elektronskih prekidača koji rade na višim frekvencijama (iznad 20 kHz) i upotrebom visokofrekventnih transformatora, konstrukcije sa mrežnim transformatorima su potisnute i rijetko se koriste.

B. Mikroammometri napajani iz mreže – rade na višim frekvencijama (do 100 kHz)

Kod ovog tipa mrežom napajanih instrumenata struktura je složenija. Od ulaza, na mrežnoj strani, prema izlazu nalazi se niz pretvarača energetske elektronike. Obično se na ulazu nalazi snažni PFC (Power Factor Correction) blok koji obezbjeđuje univerzalno napajanje (90 – 264 VAC, 50/60 Hz) i ograničava emisiju viših harmonika struje u mrežu. Centralni dio pretvaračke elektronike zauzima DC-DC blok, koji ima ulogu da na izlazu obezbjedi što veću DC struju i učini galvansku izolaciju između ulaza i izlaza (sl. 4).



Slika 4. Pojednostavljena šema mikroammometra napajano iz mreže koji radi na višim frekvencijama (do 100 kHz)

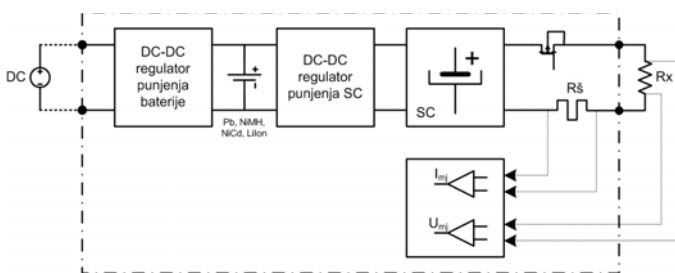
Zahvaljujući upotrebi pretvarača energetske elektronike i visokofrekventnih transformatora, ovaj tip mikroohmmetaraposeduje značajne prednosti u odnosu na prethodni - ostvaruje mnogo bolji odnos težine i snage, visokofrekventnu oscilaciju izlazne struje mnogo je lakše filtrirati i obezbjeđena je galvanska izolacija između izlaza i ulaza. Tipičan predstavnik instrumenata ove vrste jeste serija **RMO** mikroohmmetara, proizvođača **DV Power** iz Švedske. Ovi mikroohmmetri na svom izlazu isporučuju snage do 5,0 kW, struje do 800 ADC, ostvaruju tačnosti do 0,1% i pri tome težina ne prelazi 10 kg.

C. Baterijski napajani mikroohmmetri

Zahvaljujući razvoju digitalne elektronike i sistema za brzu akviziciju i obradu signala, nestala je potreba za ulaganjem velike količine energije kako bi se izvršilo mjerenje otpornosti sa mikroohmmetrima. Ljudi su sve više istraživali i razvijali sisteme za generisanje kratkih strujnih impulsa, dovoljnog intenziteta i trajanja kako bi se iskoristili u sklopu mikroohmmetara. Jedno takvo rješenje nastalo je sa pojavom superkondenzatora (ultrakondenzatori, **EDLC** – *Electrical Double Layer Capacitor*[3]), koji predstavlja nedisipativni akumulator energije. Oni su, prevashodno, razvijeni za potrebe auto-industrije, za start-stop sisteme, gdje napajaju sistema za često startanje SUS motora.

Osnovne karakteristike superkondenzatora su velika kapacitivnost (od par stotina do nekoliko hiljada farada) i jako niska unutrašnja otpornost, što omogućava generisanje struja od nekoliko stotinada par hiljada ampera – što je sasvim dovoljno za potrebe mikroohmmetara. Najčešći radni naponi superkondenzatora su između 2 i 3 VDC, pa im to predstavlja jedan od nedostataka za ovu vrstu primjene – niski naponski nivoi zahtijevaju upotrebu kraćih i/ili debljih provodnika preko kojih se struja dovodi do mjernog objekta¹. Dimenzije i težina superkondenzatora omogućavaju realizaciju ručnih uređaja, koji se baterijski napajaju.

Najčešća konstrukcija ručnih, baterijskih napajanih mikroohmmetara, koji kao izvor struje koriste superkondenzator, prikazana je na sl. 5. Na samom ulazu nalazi se regulator punjenja baterije (koja je u pravilu punjiva, ali može biti različite tehnologije), koji energiju spoljašnjeg DC izvora prilagođava bateriji i na taj način vrši njeno punjenje. Uloga baterije je da obezbjeđi autonomiju rada za vrijeme kada instrument nije priključen na spoljni DC izvor.



Slika 5. Blok struktura mikroohmmetra koji za strujni izvor koristi superkondenzator

Od baterije, prema superkondenzatoru, postoji regulator punjenja superkondenzatora (SC). Njegova snaga se projektuje prema maksimalnom naponu SC i maksimalnoj struji pražnjenja baterije. Superkondenzator je prema izlazu (mjenom objektu) vezan preko elektronskog prekidača (najčešće **MOSFET** tranzistora).

Prvi korak u algoritmu mjerenja jeste punjenje superkondenzatora do nivoa napona koji će prema otpornosti spojnih vodova (koji su unaprijed poznati i značajno veći od otpornosti objekta) približno odrediti nivo mjerne struje. Potom se iz upravljačke elektronike komanduje uključivanje izlaznog tranzistora i vrši sinhronizovano mjerenje pada napona na objektu i struje kroz objekat (pad napona na internom šentu).

Nedostatak ove konstrukcije ogleda se u dugom vremenu punjenja superkondenzatora (ograničeno je maksimalnom strujom pražnjenja baterije) i može da potraje nekoliko minuta. Naprimjer, u jednom od najpoznatijih uređaja ove vrste, **MOM2** firme **Megger**, vrijeme za dopunjavanje superkondenzatora je 10 – 130 sekundi u zavisnosti od nivoa i vremena trajanja struje. Takođe, mjerna struja nije konstantna (mijenja se shodno promjeni napona na kondenzatoru), tako da greška u sinhronizaciji mjerenja napona i struje može da prouzrokuje grešku u rezultatu određivanja otpornosti.

Nakon što je dat pregled nekoliko različitih konstrukcija mikroohmmetara, potrebno je primjetiti dvije činjenice. Prvo, svi oni imaju zajednički dio koji se odnosi na Kelvinovu metodu mjerenja – postoji kontrolisani strujni izvor i sistem za mjerenje struje i pada napona na testnom objektu. Drugo, ono što se razlikuje, jeste konstrukcija samog izvora struje, koji igra ključnu ulogu kod ove vrste instrumenata. Što je izvor struje kvalitetniji (generiše što čišću DC struju i što većeg intenziteta) moguće je izvesti i kvalitetnije mjerenje sve manjih vrijednosti otpora.

IV. NOVI PRISTUP GENERISANJA STRUJA KOD BATERIJSKI NAPAJANIH MIKROOHMMETARA

Uvažavajući prethodnu priču, prije svega nedostatke u konstrukcijama izvora struje spomenutih instrumenata, u nastavku će biti predstavljen jedan novi pristup kod izvedbe izvora struje koji zadovoljava potrebe ručnih mikroohmmetara, a istovremeno prevazilazi nedostatke ostalih. Rješenje je bazirano na korištenju tehnologije Litijum-Polimernih (LiPo) baterija i linearnog strujnog regulatora. Razvijeno je od strane inženjera u okviru **DV Power** kompanije sa sjedištem u Švedskoj. Rješenje je u patentnoj proceduri kod Američkog zavoda za patente (**Hand-held Microohmmeter Using Lithium-Polymer Batteries**, EFS ID: 29992016, Application number: 62541435)

A. Ukratko o LiPo baterijama

Litijum-polimerna baterija (Li-Poly, LiPo, LIP) pripada grupi punjivih baterija na bazi litijuma. Spada u drugu generaciju takve vrste. Tehnološki predstavlja generaciju baterija koje su naslijedile litijum-jonsku (LiIon) bateriju.

Osobine su joj uglavnom iste kao kod prethodnice. Vrlo je lagana zbog litijumskih elektroda, vrlo velika gustoća energije koja je skoro dvostruko veća od obične NiMH baterije, veći nazivni napon od napona koji je u baterijama na bazi nikla. Za

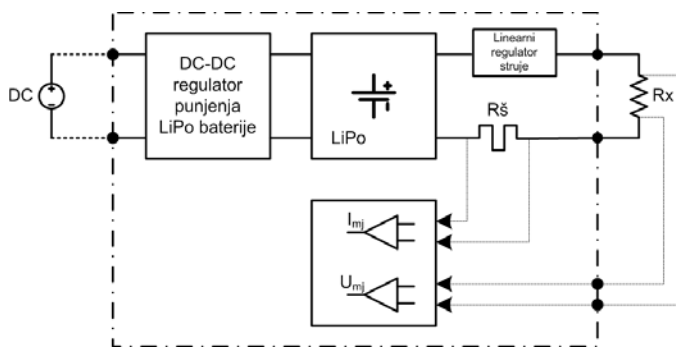
¹Obzirom na dimenzije testnih objekata, kao što su energetske prekidači, razmak između krajnjih/priključnih tačaka može biti i do nekoliko metara.

razliku od NiMH i NiCd baterija nije je neophodno održavati, jer nije podložna efektima poput memorijskog, koji nastaje kristalizacijom usljed nekoristenja. Zbog toga nema potrebe za periodičnim pražnjenjem/punjenjem. Tehnološki pomak je i elektrolit. Čini ga polimer koji se vrlo lako oblikuje i prilagođava potrebama konstrukcije, što prethodne generacije baterija nisu imale mogućnost. Budući da ove baterije mogu biti vrlo tanke, primjenjivost se odmah pokazala kod ručnih/mobilnih uređaja (mobilni telefoni, različite električne letjelice, igračke i sl.). Ono što posebno izdvaja LiPo bateriju od ostalih, i što pruža mogućnost da se ona iskoristi za generisanje strujnih impulsa velikog intenziteta, jeste niska unutrašnja otpornost i visok stepen/koefficient preopteretivosti (obično se u literaturi označava sa N). Ovaj koefficient predstavlja cjelobrojni umnožak jednodjavne struje pražnjenja ($1C$), koja je određena nazivnim kapacitetom baterije, i na taj način definiše maksimalnu vrijednost struje koju baterija može dati. Recimo, ako je nazivni kapacitet 10 Ah, onda $1C$ struja iznosi 10 A. Kod LiPo baterija, koefficient preopteretivosti ide i do par stotina. Što bi, za dati primjer, značilo da baterija koja ima $C=10$ Ah i, recimo, $N=100$ može generisati struju od $NC=1000$ A. [4]

S druge strane nedostatak LiPo baterija je što im je životni vijek relativno kratak i podnose 500-1000 ciklusa punjenja/pražnjenja. Pored toga, ukoliko bi napon ćelije pao ispod najmanjeg dozvoljenog, usljed prekomjernog pražnjenja, takva baterija postaje neupotrebljiva i u pravilu se ne može više puniti. Najčešće se fenomen prekomjernog pražnjenja javlja kod višćeljskih baterija koje nemaju mogućnost praćenja napona pojedine ćelije, te se njihovo korištenje ne savjetuje. Pored navedenog, dodatna slabost LiPo baterija je njihova osjetljivost na fizička oštećenja i/ili nepravilno rukovanje (pretjerano punjenje, izazivanje kratkih spojeva, mehanički stres i sl.).[4]

B. Koncept generisanja struje na bazi LiPo baterija

Koristeći karakteristiku tehnologije LiPo baterija koja se odnosi na mogućnost pražnjenja velikim strujama (određeno sa NC) tim inženjera u sklopu **DV Power**-apredložio je koncept izvora struje za potrebe rada ručnih, baterijski napajanih mikroometara (sl. 6).



Slika 6. Blok struktura novog koncepta izvora struje kod mikroometara

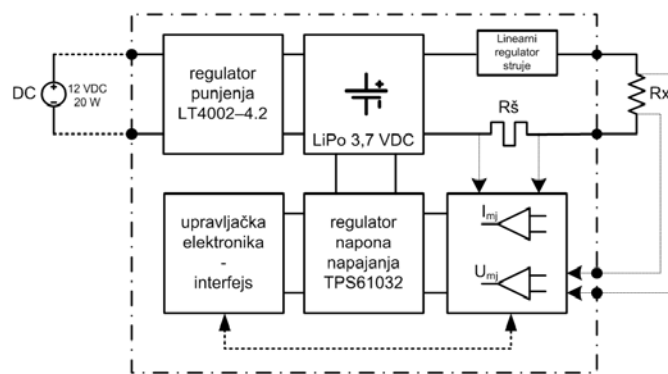
Za razliku od konstrukcije za superkondenzatorom, koncept sa LiPo baterijom je jednostavniji i ostvaruje bolje karakteristike. Ulaz je sličan, čini ga regulator punjenja baterije i baterija. Razlika je u tipu/tehnologiji baterije i činjenici da ona ima dvije uloge – obezbjeđuje autonomiju rada instrumenta

i služi kao izvor struje za potrebe mjerenja. Poboljšanje u odnosu na tipična rješenja sa superkondenzatorom je i u načinu regulacije struje – koristi se linearni strujni regulator, koji kompenzuje uticaj promjene/padanapona i na taj način održava struju konstantnom, što daje bolje uslove za izvođenje mjerenja.

Više detalja o samoj konstrukciji slijedi u nastavku, gdje će biti predstavljeni i ostvareni rezultati dizajniranog kompletnog rješenjamikroometra.

V. DIZAJN RUČNOG MIKROOMETRA NA BAZI LIPO BATERIJE

U okviru projektnog zadatka definisan je niz zahtijeva. Neki od njih, koji su interesanti za temu ovog rada, izloženi su u nastavku. Mjerni opseg od $1 \mu\Omega$ do 1Ω , garantovana tačnost 0,1 %, pri maksimalnoj mornoj struji do 300 A. Instrument treba da bude ručni, uz osmočasovnu autonomiju ili najmanje 500 mjerenja iz definisanog mjernog opsega, uz tročasovno punjenje baterije. Ukupna masa instrumenta manja od 1 kg [5]. U nastavku slijedi pregled i opis pojedinih dijelova konstrukcije, sa osvrtom na izbor elemenata kako bi se zadovoljili postavljani zahtijevi. Blok struktura realizovanog rješenja prikazana je na sl. 7.



Slika 7. Blok struktura realizovanog mikroometra baziranog na LiPo baterijama

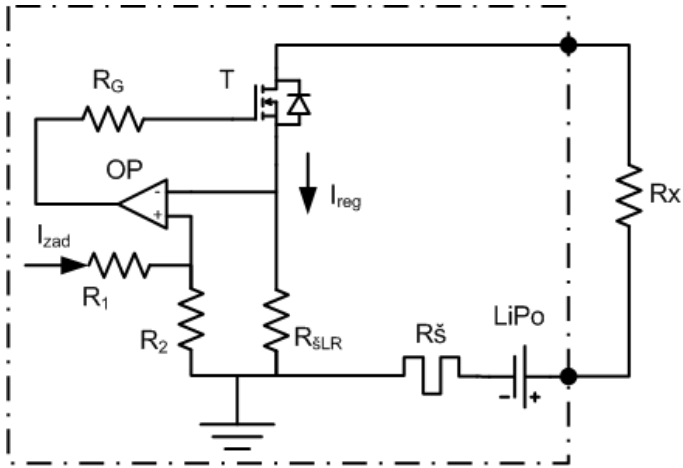
A. Konstrukcija i izbor osnovnih elemenata

Osnovni element u konstrukciji predstavlja LiPo baterija. Na osnovu zahtjevanje širine mjernog opsega i maksimalne mjerne struje, postavljena su ograničenja u vezi poprečnog presjeka i dužine mjernih kablova (25 mm^2 , 1,3 m) i izabrana baterija nazivnog napona 3,7 VDC. Uz ograničenje trajanja testa i na osnovu zahtjevanje autonomije i minimalnog broja testova, izabran je kapacitet baterije od 5600 mAh. Na kraju, kako bi se zadovoljila i maksimalna vrijednost mjerne struje (300 A) odabrana je baterija koja podnosi strujno preopterećenje od 50C. [6]

Regulator punjenja izabrane baterije realizovan je preko upravljačkog kola LT4002-4.2 [7]. Kolo je konfigurisano tako da bateriju može puniti strujom do 2,0 A, čime se zadovoljava zahtjev o tročasovnom punjenju. Za efikasan rad preporučuje se korištenje 12 VDC izvora, minimalne snage 20 W.

Kako bi se ostvarila što kvalitetnija mjerna struja (čist DC signal), što se direktno odražava na kvalitet mjerenja, izbjegnuto je korištenje regulatora (pretvarača) koji rade u

prekidačkom režimu. Tako je realizovan linearni strujni regulator preko N -kanalnog MOSFET tranzistora (T) i operacionog pojačala (OP). Preko upravljačke elektronike vrši se zadavanje referentne vrijednosti struje (I_{zad}), nakon čega se uspostavlja analogna regulacija mjerne struje (I_{reg}). Detaljna električna šema strujnog regulatora obuhvata i kompenzacione elemente povratne sprege, koji na blok šemi (Sl. 8) nisu prikazani, a uloga im je da obezbijede stabilnost regulatora, tj. mjerne struje.



Slika 8. Pojednostavljena el.šema linearnog strujnog regulatora

Elementi regulatora projektovani su tako da je zapuni opseg napona baterije (3,2 VDC do 4,2 VDC), uzimajući u obzir ukupnu otpornost mjerne konture (spojni vodovi + Rx), moguće regulisati struju u opsegu od 1 do 300 A. Kako bi se, zbog prisustva parazitnih induktivnosti, izbjegla pojava prenapona usljed nagle promjene struje, uspostavljanje i pad struje se vrši prema kontrolisanoj rampi.

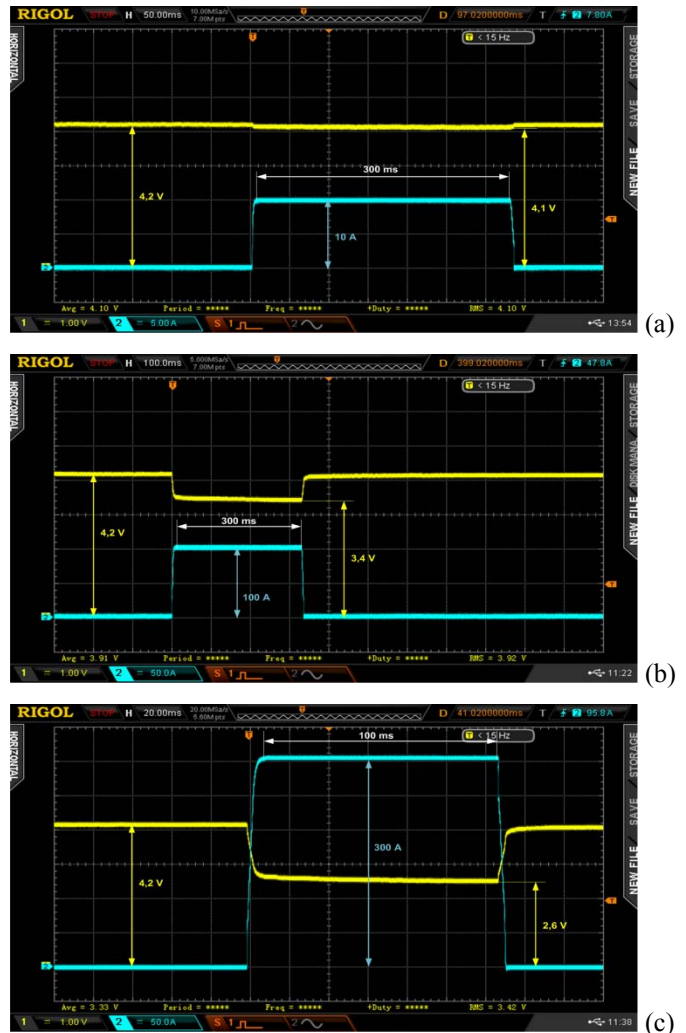
Mjerenje struje, koje se vrši na šentu unutar aparata i pada napona na testnom objektu vrši se sinhronizovano, preko dva mjerna kanala, koja su realizovana putem 24-bitnih AD konvertora. Uzorkovanje se vrši svake milisekunde (1 kS/s). Maksimalna vrijednost koju naponski mjerni kanal može da mjeri je 2,5 VDC.

Naponski regulator TPS61032 [8] je prilagođen da napon LiPo baterije podiže na naponski nivo od 5 VDC i na taj način obezbjeđuje stabilno napajanje ostatka elektronike (upravljački dio, sistem za mjerenje i interfejs – displej i tastatura).

B. Postignuti rezultati

Prikazanim rezultatima, kao što su talasni oblici i nivoi mjerne struje i ostvarene tačnosti mjerenja otpora u nekoliko tačaka mjernog opsega, verifikovane su navedene karakteristike aparata.

Na sl. 9, prikazani su talasni oblici napona na krajevima LiPo baterije i mjerne struje od 10 A, 100 A i 300 A. Svaki put je mjerena otpornost šenta iznosila 100 $\mu\Omega$. Važno je primjetiti da za vrijeme mjerenja, pored toga što postoji promjena/pad napona LiPo baterije, mjerna struja ima konstantnu vrijednost, koja ne zavisi od njenog intenziteta.

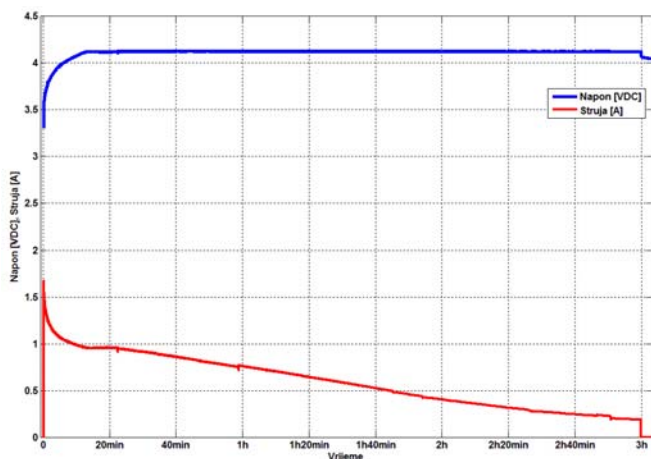


Slika 9. Talasni oblici napona LiPo baterije (1) i mjerne struje (2) pri 10 A (a), 100 A (b) i 300 A (c) kod mjerenja 100 $\mu\Omega$

Vrijeme uspostavljanja i pada struje je kontrolisano, kako bi se eliminisala pojava prenapona usljed nagle promjene struje zbog prisustva parazitnih induktivnosti vodova.

Takođe, kako bi se obezbjedila bolja efikasnost u pogledu iskorištenja energije baterije (sve u cilju ostvarenja zahtjevanje autonomije rada), ograničeno je vrijeme trajanja impulsa struje i zavisi od njenog intenziteta. Algoritmom rada je definisano da struje do 100 A imaju trajanje od 300 ms, dok za struje preko 100 A vrijeme trajanja je 100 ms. Ovakav način rada ograničava maksimalnu potrošnju jednog mjerenja na 30 amper-sekundi i na taj način zadovoljava autonomiju u pogledu izvršenog broja mjerenja. Ispitivanjem se pokazalo da se sa potpuno napunjenom baterijom može izvršiti više od 500 uzastopnih mjerenja otpora.

Kao što je ranije navedeno, punjenje baterije se vrši strujom do 2,0 A. Na sl. 10, gdje je prikazana strujno-naponska karakteristika procesa punjenja, jasno se vidi da proces punjenja traje 3 časa, čime je zadovoljen i zahtjev o vremenu punjenja.



Slika 10. Strujno-naponska karakteristika punjenja LiPo baterije unutar RMO-H3 aparata

Na kraju, u tabeli 1 predstavljeni su rezultati mjerenja otpornosti koja su vršena na šentovima garantovane tačnosti ($R_{\text{tačno}}$). Radi boljeg praćenja, u tabeli je prikazano vrijeme trajanja mjerenja (T_{mjerenja}), izmjerena vrijednost mjerne struje (I_{mj}), izmjereni pad napona na testnom šentu (U_{mj}), očitana vrijednost otpornosti na displeju (R_{rezultat}) i odstupanje rezultata mjerenja (ϵ), koje je izraženo u procentima od tačne vrijednosti.

TABELA I. REZULTATI MJERENJA OTPORNOSTI SA RMO-H3

$R_{\text{tačno}}$	T_{mjerenja}	I_{mj}	U_{mj}	R_{rezultat}	ϵ
30,4 u Ω	100 ms	300,02 A	9,13 mV	30,43 u Ω	0,10 %
101,8 u Ω	100 ms	249,72 A	25,42 mV	101,8 u Ω	0,00 %
302,3 u Ω	100 ms	199,88 A	60,40 mV	302,2 u Ω	0,03 %
1,007 m Ω	100 ms	149,97 A	150,99 mV	1,007 m Ω	0,00 %
10,07 m Ω	300 ms	99,99 A	1,007 V	10,07 m Ω	0,00 %
99,80 m Ω	300 ms	10,07 A	1,005 V	99,88 m Ω	0,08 %

VI. ZAKLJUČAK

Pouzdanost rezultata ispitivanja, na osnovu kojih određujemo stanje elemenata elektroenergetskog sistema, indirektno određuje i pouzdanost samog sistema. Zbog toga je, tamo gdje se vrše mjerenja, (npr. mjerenje otpornosti kontakata energetskog prekidača), veoma važno obezbijediti pouzdanost tih mjerenja. U ovom radu su predočene metode i sistemi (instrumenti) koji se najčešće koriste kod mjerenja niskih otpornosti (oblast mikroooma). Ukazano je na značaj izvora struje kao posrednika u radu mikrooommetara. Predstavljeno je rješenje izvora struje na bazi LiPo baterija i linearnog strujnog regulatora. Prikazani rezultati ispitivanja realizovanog mikrooommetra, sa izvorom struje na bazi LiPo baterije, ukazuju na niz prednosti koje ovo rješenje nudi u odnosu na slična rješenja te vrste (ručni, baterijski napajani mikrooommetri). Realizovana konstrukcija omogućava proširenja mogućnosti, u smislu mjerenja u oblastima manjim od mikroooma (povećanjem mjerne struje upotrebom LiPo

baterija većeg nazivnog napona i koeficijenta preopterećenja), što je zadatak za budući rad. Takođe, planira se realizacija sistema regulacije koji pruža mogućnost mjerenja dinamičkog otpora (promjena otpora kontakata prekidača za vrijeme njegove tranzicije/manipulacije).

LITERATURA

- [1] P. E. Langan, J. R. Jowett, S. G. Thomson, D. O. Jones, "A Guide to low resistance testing – Understanding and Measuring Low Resistance to Ensure Electrical System Performance", Application Note, Megger (www.megger.com), USA, 2004.
- [2] J. Dreier, "High-accuracy resistance measurement results with the Kelvin measurement method", Application note, KoCoS Messtechnik AG (www.kocos.com), Germany, 2008.
- [3] Product Guide – Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors– Doc. No. 1014627.1, Maxwell Technologies, Inc., 2009
- [4] <http://batteryuniversity.com/>, januar 2018.
- [5] http://www.dv-power.com/wp-content/uploads/2017/12/RMO-H-brochure_B-RMOHN00-307-EN.pdf, januar 2018.
- [6] <http://www.gensace.de/gens-ace-5600mah-3-7v-50c-1s2p-hardcase-lipo-battery11-efra-brc-approval.html>, januar 2018.
- [7] Datasheet, "LTC4002 - Standalone Li-Ion Switch Mode Battery Charger", Linear Technology Corporation (www.linear.com), 2003.
- [8] Datasheet, "TPS6103x 96% Efficient Synchronous Boost Converter With 4A Switch", Texas Instruments (www.ti.com), 2017.

ABSTRACT

During the development, production and exploitation of elements in electric power systems, such as power circuit breakers, there is a need for measuring the ohmic resistance of its contacts. These resistance values are usually very small, even several microohms, and therefore the measurements are done using specially designed measuring instruments – Micro Ohmmeters. The most common method for measuring such low resistance values is the Kelvin (4-wire) method. It is based on the measurement of voltage drop across the test object when a current of known value flows through that object. The ratio of measured voltage and known current, by Ohm's law, gives the value of ohmic resistance. In this paper, a review of the typical structures of Micro Ohmmeters, that perform measurements according to the Kelvin's method, is given. A special emphasis is placed on hand-held, battery-powered instruments, which are based on the use of supercapacitors. The concept of a new current source, implemented with LiPo batteries, is presented, offering superior performance compared to the solutions with supercapacitors. Finally, the design of the complete Micro Ohmmeter based on LiPo batteries and the obtained results are presented at the end of this paper.

DESIGN OF HAND-HELD MICROOHMMETER BASED ON LiPo BATERIES

Nenad Jovančić, Saša Vučićević, Timur Delić