

Kompozitni miliommetar za merenje preciznih strujnih šantova u industrijskim uslovima

Marjan Urekar, *Member, IEEE*, Đorđe Novaković, Bojan Vujičić, Platon Sovilj, Marina Bulat

Apstrakt—Za potrebe merenja preciznih strujnih šantova u industrijskim uslovima, razvijen je kompozitni miliommetar na bazi Kelvinovog četvorožičnog merenja malih otpornosti. Sistem se sastoji od preciznog, temperaturno stabilizovanog strujnog izvora i komercijalnog multimetra srednje klase sa rezolucijom od 4 ½ cifre, kojim se meri napon. Specifični zahtevi vezani za industrijsku proizvodnju i eksploataciju preciznih strujnih šantova, uslovljavaju da standardne metode i uređaji za merenje miliomskih otpora nije moguće primeniti. Korišćenjem kompozitnog etalonskog otpornika, obezbeđena je temperaturna stabilnost preciznog strujnog izvora baziranog na naponskoj referenci REF102. Pri merenju otpornosti strujnog šanta od 20 milioma, postignuta je tačnost od 10 mikrooma.

Cljučne reči—etalon; kalibracija; miliommetar; strujni izvor; merenje otpornosti; metrologija; četvorožično merenje; multimetar; strujni šant; kompozitni etalonski otpornik; greška merenja; Kelvinova metoda.

I. UVOD

Laboratorija za metrologiju i Katedra za Električna merenja na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu ostvaruju stalnu saradnju sa privredom u oblastima instrumentacije, metrologije i kontrole industrijskih procesa. Zahtevi korisnika često iziskuju pronalaženje nestandardnih rešenja i stalnu inovaciju u oblasti električnih merenja, kao što je opisano u [1] i [2].

Ovaj rad je nastao na osnovu iskustava u rešavanju opisanog specifičnog zadatka koji je zahtevao unikatno rešenje u okviru projektovanog budžeta i prilagođavanje uslovima rada u industrijskom okruženju.

II. OPIS PROBLEMA

Za potrebe razvoja preciznog upravljanja motorima CNC mašina i drugih uređaja gde je potrebno meriti jednosmernu (dc) struju reda ampera sa visokom tačnošću, razvijen je automatizovani 16-kanalni upravljački sistem u okviru

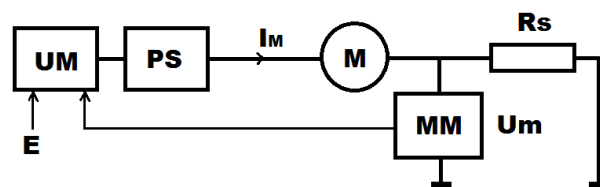
Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

Đorđe Novaković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs). Bojan Vujičić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: bojanvujic@uns.ac.rs). Platon Sovilj – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: platon@uns.ac.rs). Marina Bulat – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: marina.bulat@uns.ac.rs).

kompanije koja se bavi automatizacijom industrijskih procesa.

Centralni deo svakog od upravljačkih kanala sistema čine:

1. Upravljački modul UM sa mikroprocesorom, zajednički za svih 16 kanala.
2. Strujni drajver PS visoke rezolucije, digitalno upravljani mikroprocesorskim sistemom koji je deo UM.
3. Priključak za motor M ili drugi potrošač kojim se upravlja.
4. Redni šant otpornik R_s , otpornosti 20 m Ω sa tolerancijom od 0.5 %.
5. Modul za monitoring MM pada napona U_m na šantu sa povratnom spregom ka UM.
6. Eksterna jedinica E za upravljanje procesom (komandni pult).



Sl. 1. Blok šema industrijskog sistema za precizno upravljanje motorom.

Princip rada, prikazan na Sl. 1:

Upravljački modul UM prima komandu upravljačkog pulta E, podešava odgovarajuću digitalnu informaciju koja zadaje potrebnu dc struju I_M pogonskog stepena PS. Ova struja pokreće motor M (potrošač) i stvara pad napona U_m na preciznom strujnom šantu R_s , koji se meri na jednom od 16 analognih ulaza modula za monitoring MM. Ovaj napon se A/D konverzijom pretvara u digitalnu informaciju i prosleđuje ka UM, čineći naponsku povratnu spregu. Ova informacija se poredi sa zadatom vrednošću i po potrebi se podešava izlaz drajvera PS do potrebne vrednosti. Projektovana tačnost sistema je $\pm 0.1\%$ od zadate struje I_M .

III. ANALIZA PROBLEMA I STANDARDNIH REŠENJA

Kompanija je uočila problem prilikom proizvodnje preciznih strujnih šantova male otpornosti, čiju je otpornost potrebno meriti sa tačnošću boljom od 0.5 %.

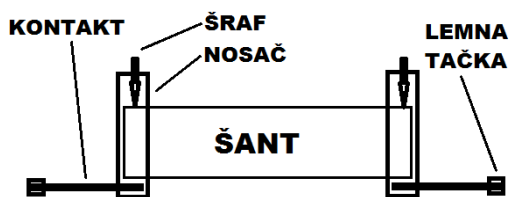
Definisan je zadatak da se realizuje instrument koji će uspešno meriti otpornost šanta prilikom njegove proizvodnje.

Naponski merni opseg modula za monitoring je 200 mV, pa je za radnu struju do 10 A potrebno proizvesti šant otpornosti $(20 \pm 0.1) \text{ m}\Omega$. Merenje otpornosti sa rezolucijom od 100 $\mu\Omega$ je izuzetno složen zahtev, čak i za najmodernije instrumente, [3] i [4].

Standardni laboratorijski multimetar visoke klase, Fluke 8846A sa 6 ½ cifara rezolucije, na najnižem omskom opsegu od 10.00000 Ω ima osetljivost od 10 $\mu\Omega$, [5].

Cena ovakvog instrumenta je preko \$2000. Nabavka ovog (ili sličnog) instrumenta nije bila opcija za kompaniju, jer je budžet za realizaciju ovog instrumenta oko 10 puta manji od te cifre.

Drugi značajan problem se nametnuo posle analize procesa proizvodnje *montažnih šantova* (šant sa pripadajućom montažom koja takođe ima svoju konačnu prelaznu otpornost). Montažni šant se sastoji od komada bakarne legure (šanta) koji se postavlja u ležišta nosača. Šant se fiksira šrafovim koji prolaze kroz vrh ležišta i pritiskaju bakar na kontakte na dnu nosača, kao na Sl. 2. Iz svakog kontakta je izvedena lemna tačka na koje se povezuje ostatak kola. Montažni šant se skraćeno naziva samo *šant*.



Sl. 2. Komponente montažnog šanta.

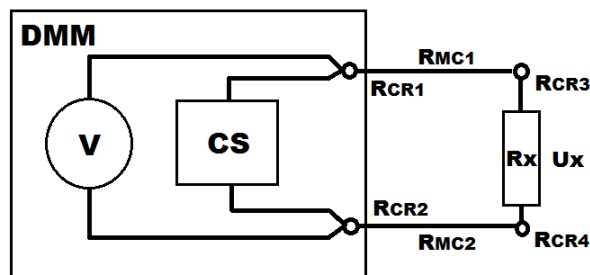
Komadi legure bakra se nabavljaju prefabrikovani na otpornost od (15 ± 5) m Ω . Moguće je nabaviti i prefabrikovane komade legure veće tačnosti, ali njihova cena se eksponencijalno uvećava. U kompaniji je odlučeno da će se nabaviti jeftiniji proizvodi, koji će se "brzo i jeftino" podesiti na željenu toleranciju. Da bi se postigla željena tačnost šanta, bakarni komad se montira u nosač i ručno mu se povećava otpornost putem zasecanja tela legure i turpijanjem površine šanta finom dijamantskom turpijom. Za vreme ove finalne obrade šanta, otpornost šanta se neprestano meri, tj. kroz njega se kontinualno propušta dc struja.

Ovo je i razlog zašto su u ovom slučaju nemoguća dva osnovna načina merenja otpornosti:

Prvi način, industrijskim milometrom [6], podrazumeva da se tokom rada na šantu i njegove obrade, kroz njega propušta konstantno visoka struja (do 2 A), što može ugroziti bezbednost radnika, troši se puno energije i dovodi do velike toplotne disipacije šanta.

Drugi način, Vitstonovim mernim mostom, [7] i [8], postaje nemoguć jer usled mehaničkih vibracija prilikom obrade dolazi do naglih promena prelaznih otpora koji izazivaju trenutno preopterećenje mernog opsega mosta koji ima visoku osetljivost (reda $\mu\Omega$).

Na Sl. 3 je prikazan standardni način merenja otpornosti R_x klasičnom U/I metodom integrisanom u digitalni multimetar DMM, [4]. Strujni izvor CS u instrumentu generiše konstantnu struju koja prolazi kroz mereni otpornik, pri čemu se stvara pad napona U_x koji se meri digitalnim voltmetrom V u samom instrumentu. Ovaj pad napona je proporcionalan merenoj otpornosti koja se prikazuje kao rezultat merenja, [9].



Sl. 3. Blok šema merenja otpornosti U/I metodom digitalnim multimetrom.

Problem multimetara niže cenovne klase je da je najniži merni opseg najčešće 20 Ω . Za instrument od 3 ½ cifre to znači rezoluciju od 10 m Ω , a za 4 ½ cifre je 1 m Ω , što je nedovoljno za merenje (20 ± 0.1) m Ω . Greška merenja otpornosti na ovakvim instrumentima se kreće 0.5 – 5 % u zavisnosti od mernog opsega, te su oni potpuno neadekvatni za potrebe direktnog merenja ovakvog šanta.

Ukoliko bi se upotrebio skuplji instrument laboratorijske klase, sa adekvatnim mernim karakteristikama, javio bi se problem termalnog preopterećenja instrumenta usled dužeg vremena generisanja struje CS, [10]. Miliomska otpornost predstavlja, efektivno, kratak spoj za svaki instrument, koji u tom slučaju meri na najnižem omskom području, pri čemu je i najveća struja strujnog izvora. Ako je ta struja mala, reda nekoliko mA, stvoriće se suviše mali pad napona na šantu (reda μ V) i taj napon neće moći da se izmeri instrumentom.

Ako je struja izvora rada stotina mA ili A [3], uvek postoji ograničenje koje daje proizvođač da je maksimalno vreme merenja ovako malih otpornosti 10 do 30 sekundi, kao i kod merenja velikih struja [7]. Velika struja stvara veliku toplotnu disipaciju unutar skućenog prostora kućišta instrumenta, što neminovno dovodi do termalnog preopterećenja uređaja i njegovog kvara, pri čemu se može i zapaliti.

Iz prethodno navedenih razloga, maksimalna preporučena struja za merenje otpornosti je 100 mA [11]. Ova opcija nije dostupna u većini multimetara srednje klase sa baterijskim napajanjem koje ograničava maksimalnu struju CS.

Standardni način merenja otpornosti modernim instrumentima je ratiometrijska metoda, [11] i [12]. Referentni otpornik poznate vrednosti i nepoznati otpornik (reda veličine referentnog otpornika) se vezuju redno i formiraju naponski razdelnik poznatog ulaznog napona koji je doveden na krajeve redne veze otpornika. Preciznim voltmetrom se meri pad napona na oba otpornika i odnos napona se upoređuje sa odnosom otpornosti, što se pokazuje da ima veću tačnost nego direktno merenje otpornosti klasičnom U/I metodom.

Problem ove metode nastaje kod merenja malih otpornosti, gde bi za rednu vezu dva otpornika od 20 m Ω , naponski izvor od 1 V morao da generiše struju od 25 A!

Dodatnu grešku pri merenju unosi i konačna otpornost mernih kablova kojima se šant vezuje na multimetar [7]. Ova otpornost može biti reda otpornosti šanta, ali i veća do deset puta, ako se koriste provodnici lošeg kvaliteta.

Kod merenja ovako malih otpornosti, uticaj mogu imati i prelazne otpornosti kontakata [10], na mestima gde se spajaju kabl i šant, kao i na konektoru na samom instrumentu, gde je spojen drugi kraj kabla. Ovaj problem se obično rešava tzv. "nulovanjem": kratko se spoje krajevi ispitnih kablova i podesi se da je dobijeno očitavanje nova referentna nulta vrednost u odnosu na koju se meri spoljašnji otpornik [7].

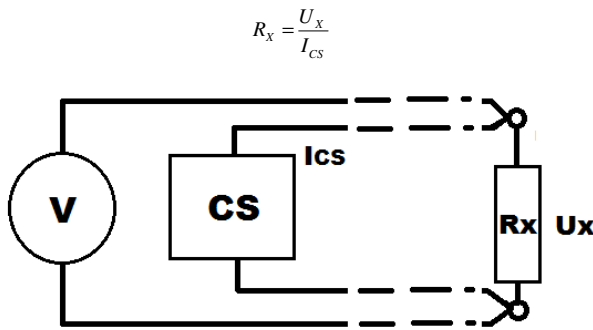
Ovime se samo donekle rešava problem, jer otpornost kablova i kontakata varira tokom vremena – menja se sa strujom, fizičkim položajem, temperaturom, itd. Za preciznost reda mikrooma, ovaj postupak takođe nije adekvatan, [4].

Rad u industrijskom okruženju, u uslovima okoline koji nisu laboratorijski, uvek postoji problem variranja spoljne temperature u širokom opsegu. Strujni izvori su osetljivi na promene temperature (često su i deo temperaturnih senzora), što se direktno odražava na tačnost rezultata [11]. Tipična greška strujnog izvora je $0.01\% / ^\circ\text{C}$, što bi sa varijacijom temperature od $\pm 5^\circ\text{C}$ učinilo izvor suviše nestabilnim za merenje malih otpornosti.

IV. OPIS TEHNIČKOG REŠENJA PROBLEMA

Analizom svih prethodnih problema i ograničenja, odlučeno je da se napravi *kompozitni miliometar KomOm* (sastavljen od nekoliko posebnih modula) na bazi Kelvinove (četvorožične) verzije U/I metode za merenje otpornosti, kao na Sl. 4. Ovaj primer je dobro poznat iz teorije merenja: strujni izvor diktira struju kroz otpornik, te se odgovarajućim voltmetrom meri napon na toj otpornosti.

Vrednost merene otpornosti R_X se dobija kao:



Sl. 4. Kelvinova četvorožična metoda merenja otpornosti.

Najvažniji uslov kod ove metode je da se koriste dva para kablova (četiri žice) – naponski (za voltmetar) i strujni (za strujni izvor). Da bi se eliminisao uticaj konačnih otpornosti kablova i kontakata, strujni i naponski krajevi moraju biti spojeni u istim tačkama sa krajevima otpornosti koja se meri.

U svim drugim slučajevima, zapravo se meri otpornost R_m (kao na Sl. 3):

$$R_m = R_X + \sum_i R_{MCi} + \sum_j R_{CRj}$$

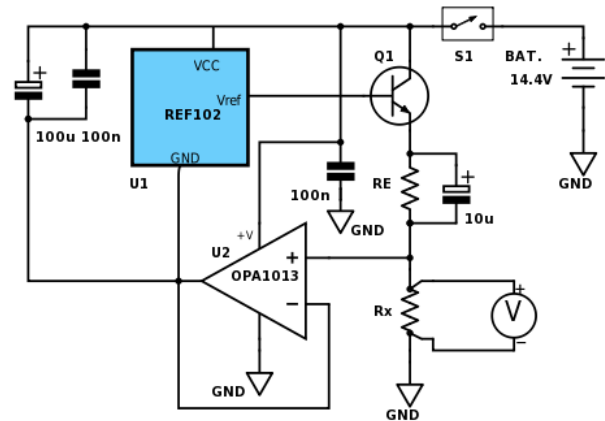
gde su R_{MC} otpornosti mernih kablova, a R_{CR} prelazne otpornosti na svim kontaktima.

Prednost Kelvinove metode je što sada kablovi mogu biti velike dužine, i po nekoliko metara, što je čest slučaj kod industrijskih uslova rada, [4] i [9].

Problemi ovakve realizacije:

1. Potrebno je realizovati strujni izvor od 100 mA sa stabilnošću (preciznošću) od 0.05 %. Ova preciznost je obično dostupna samo kod strujnih izvora integrisanih u čipu, izlaznog opsega 100 μA do 10 mA, [11]. Većina integrisanih strujnih izvora preko 10 mA ima grešku $\pm 1\%$ ili veću. Tipični predstavnici ovakvih izvora su REF200 [13] i LM334 [14] firme Texas Instruments.
2. Na otpornosti 20 m Ω , struja od 100 mA daje svega 2 mV. Da bi se postigla željena tačnost i preciznost, mora se koristiti instrument sa mogućnošću očitavanja 2 mV $\pm 0.05\%$, tj. sa rezolucijom od 1 μV .
3. Najbolji instrument koji je mogao da se nabavi za ove potrebe je Uni-T UT61E [15] sa rezolucijom od 4 ½ cifre (maksimalni prikaz od 22000 kaunta). Najniži naponski dc opseg ovog multimetra je 220 mV, sa rezolucijom od 10 μV - 10 puta lošijom od potrebne.

Najoptimalnije rešenje je pronađeno u modifikaciji Kelvinove metode u vidu kompozitnog miliometra KomOm, kao na Sl. 5.



Sl. 5. Šema kompozitnog miliometra KomOm.

Strujni izvor je podešen da daje $I_{ref} = 100\text{ mA}$, pa je za šant od $R_X = 20\text{ m}\Omega$ sa tolerancijom $\Delta R_X/R_X = 0.5\%$ moguće odrediti u kom opsegu će biti dozvoljena varijacija merenog napona U_X koji se meri voltmetrom V:

$$U_x = 100 \text{ mA} \cdot (20 \text{ m}\Omega \pm \Delta R_x) = 2 \text{ mV} \pm (100 \text{ mA} \cdot 0.1 \text{ m}\Omega) \\ = 2 \text{ mV} \pm 10 \mu\text{V}$$

Vidi se da maksimalna varijacija otpornosti šanta odgovara upravo najmanjem kvantu (rezoluciji) očitavanja dc napona na UT61E.

Ako se u obzir uzme i deklarirana greška multimetra na ovom mernom području, izražena kao 0.1% očitane vrednosti + 5 digita (najniže cifre), za 20 mV se dobija greška od 52 μV , što obesmišljava posmatranje promene od 10 μV .

Međutim, ustanovljeno je da instrument zaista poseduje osetljivost od 10 μV , tj. poslednja cifra na prikazu instrumenta se zaista menja u ovim inkrementima, što je provereno zadavanjem napona iz laboratorijskog kalibratora i merenjem napona multimetrom Fluke 8846A.

Ovo je omogućilo da se krajnje rešenje nađe u primeni izmenjene merne metode zamene, tj. u relativnom merenju prenosnog etalona, prema principima datim u [2], [7] i [16].

Izrađen je prototip šanta (etalon R_{XE}) čija otpornost je podešena korišćenjem Fluke 8846A na 20 m Ω \pm 10 $\mu\Omega$. Ovaj etalon zatim služi da se odredi koliki napon UT61E pokazuje kao referentni (U_{Vref}) kada je otpor šanta "tačno" 20 m Ω .

Kada se ovim instrumentom meri u kompozitnom miliometru, za promenu otpornosti šanta u opsegu $\pm 0.1 \text{ m}\Omega$, dobija se promena očitavanja napona od ± 1 digita, tj. $U_{Vref} \pm 10 \mu\text{V}$, u odnosu na vrednost dobijenu za R_{XE} .

Može se zaključiti da multimeter ovde služi samo kao *indikator*: mereni otpor jeste ili nije u granicama tolerancije. Ako jeste, ne može se tačno odrediti koliko iznosi. Pokazuje se da je ovo dovoljna funkcionalnost instrumenta za tražene performanse, kao i da je dovoljno jednostavno za rukovanje od strane metrološki neobučenog tehničkog kadra u proizvodnji.

V. PRAKTIČNA REALIZACIJA

Prilikom projektovanja uređaja, korišćeni su materijali iz [11], [12], [17], [18], [19], [20] i [21].

Opis šeme sa Sl. 5

Strujni izvor: U1 - Precizna naponska referenca REF102 [19] ima izlazni napon 10 V \pm 2.5 mV, sa temperaturnim koeficijentom od 2.5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, što daje zanemaruivu promenu struje čak i pri velikim fluktuacijama spoljne temperature, karakterističnim za industrijsko okruženje. Naponski izlaz reference se vodi na tranzistor Q1 koji služi kao strujni pojačavač, [17] i [18], pošto naponska referenca ima maksimalnu izlaznu struju od 10 mA. U2 – operacioni pojačavač OPA1013 spojen kao sleditelj napona, forsira napon na GND pinu reference da bude isti sa naponom koji se javlja na potrošaču R_x , tj. sa naponom između neinvertujućeg ulaza i mase, [20] i [21]. Posledica ovoga je da je struja I_{ref} kroz R_x konstantna i određena kao:

$$I_{ref} = \frac{V_{ref} - V_{BEQ1}}{R_E}$$

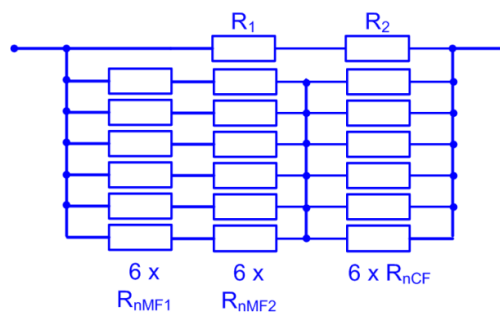
V_{ref} je izlazni napon reference, V_{BEQ1} je napon baza-emiter tranzistora Q1 (0.7 V pri provođenju), a R_E je otpornik kojim se podešava željena struja.

Oдавde je jasno da od tačnosti otpornika R_E zavisi tačna vrednost struje, a od njegove temperaturne stabilnosti zavisi koliko će se struja menjati tokom merenja.

Procenjena je vrednost $R_E = 93 \Omega$, što sa strujom od 100 mA stvara disipaciju od skoro 1 W na ovom otporniku. Ovako velika toplota neminovno dovodi do efekta samozagrevanja i promene otpornosti kao posledice toga, [1]. Usled ovog efekta, eventualne promene temperature okoline ne dolaze do izražaja zbog dominantnosti efekta samozagrevanja.

Kako bi se očuvala stabilnost strujne reference, R_E je izveden kao kompozitni etalonski otpornik, opisan u [1]. Ovime je zavisnost promene otpornosti usled samozagrevanja svedena na nulu.

Odabrani su metal-film otpornici R_{nMF} od 370 Ω (redna veza otpornika $R_{nMF1} = 270 \Omega$ i $R_{nMF2} = 100 \Omega$) i ugljeni otpornici od $R_{nCF} = 186 \Omega$ (redna veza otpornika 86 i 100 Ω), spojeni prema ekvivalentnoj šemi na Sl. 6, kao zamena za R_E . Ovime je obezbeđena temperaturna stabilnost strujnog izvora. R_1 i R_2 su otpornici velike vrednosti kojima se vrši precizno podešavanje struje izvora na (100 \pm 0.05) mA.



Sl. 6. Kompozitni etalonski otpornik R_E , ekvivalentna šema povezivanja.

Kondenzatori u kolu služe za filtriranje smetnji i dodatnu stabilizaciju napona.

Strujni izvor je komponenta miliometra koja mora imati svoj posebni izvor napajanja, koji treba da omogućiti stabilan napon (preko 12 V) potreban za rad REF102, kao i da ima mogućnost davanja struje od minimalno 100 mA tokom jednog radnog dana.

Za naponski izvor odabrana je baterija za lap-top marke Siemens. Baterija sastavljena od osam punjivih litijum-jonskih ćelija, ima napon od 14.4 V i kapacitet od 4400 mAh, što je dovoljno za potrebe rada miliometra.

Baterija je kompaktnog dizajna i sličnih je dimenzija sa multimetrom, što omogućava lakši rad i transport.

Prekidač S1 uključuje i isključuje napajanje miliometra.

Na naponskim priključcima Kelvinovog spoja, kao druga komponenta miliommetra, nalazi se multimetar UT61E, sa sopstvenim baterijskim napajanjem.

KomOm je podešen i kalibrisan u Laboratoriji za metrologiju. Strujni izvor je podešen na (100 ± 0.05) mA trimovanjem R_E i merenjem uz pomoć Fluke 8846A, koji je potvrdio tačnost i stabilnost izvora u granicama ispod $1 \mu A$. Podešen je i overen referentni šant R_{XE} .

VI. REZULTATI MERENJA

Miliommetar je postavljen i upotrebljen u fabričkoj hali gde je proizvedena prva serija od 16 šantova. U hali je zabeležena temperatura za $5^\circ C$ veća od temperature u referentnoj laboratoriji.

Svi izrađeni šantovi su posle premešteni u laboratoriju, gde su overeni posle 24 h stabilizovanja.

Rezultati merenja sa terena pomoću UT61E (R_{m1}) i iz laboratorije sa Fluke 8846A (R_{m2}), dati su u Tabeli I.

Vidi se da se rezultati dobro slažu, i da samo R_4 i R_{14} izlaze iz potrebnog opsega. Ova mala neslaganja rezultata se mogu pripisati promeni otpornosti bakarne legure usled razlike u temperaturi fabričke hale i laboratorije, te grešci merenja samog laboratorijskog multimetra.

TABELA I
PREGLED REZULTATA MERENJA

R_x	R_{m1} m Ω	R_{m2} m Ω	R_x	R_{m1} m Ω	R_{m2} m Ω
1	19.99	19.9976	9	20.01	20.0084
2	20.00	20.0045	10	20.01	20.0069
3	20.01	20.0073	11	19.99	19.9902
4	20.01	20.0191	12	20.00	20.0035
5	20.00	20.0031	13	19.99	19.9922
6	20.01	20.0165	14	19.99	19.9807
7	19.99	19.9919	15	20.00	19.9981
8	20.00	19.9998	16	20.01	20.0092

VII. ZAKLJUČAK

Realizovani sistem kompozitnog miliommetra (KomOm) zadovoljava postavljene zahteve stabilnosti, tačnosti, pouzadnosti i niske cene. Komplet multimetra, strujnog izvora i etalonskog šanta košta oko \$100, što je oko 20 puta manje od komercijalnog laboratorijskog instrumenta.

Pokazuje se da se rezultati merenja na terenu i u laboratoriji slažu u dovoljnoj meri za navedene potrebe.

Prikazano je rešenje specifičnog industrijskog problema sa brojnim ograničenjima. Pažljiva analiza problema, sagledavanje svih uticajnih parametara, optimalni dizajn elektronskog kola i poznavanje načina funkcionisanja svih relevantnih blokova sistema, omogućavaju nestandardna rešenja specifičnih problema, sa povoljnim odnosom cena/korist.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u sklopu projekta TR-32019.

LITERATURA

- [1] M. Urekar, M. Bulat, B. Vujičić, D. Pejić, *Composite Resistor Standard for Calibration of Measuring Transducers in Laboratory Conditions*, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 13, No. 1, Feb 2016.
- [2] M. Urekar, N. Gazivoda, *The Transfer Voltage Standard for Calibration Outside of a Laboratory*, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 14, No. 1, Feb 2017.
- [3] *A Guide to Low Resistance Testing*, Megger, Mar 2004.
- [4] *Low Level Measurements Handbook*, 7th ed., Keithley, 2014.
- [5] *Fluke 8845A/8846A Digital Multimeters Extended Specifications*, Fluke Corporation, 2008.
- [6] *EXTECH Models 380560 and 380562 High Resolution Benchtop Milliohm Meter User's Guide*, EXTECH Instruments, 2010.
- [7] V. Bego, *Mjerenja u elektrotehnici*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [8] A.S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [9] D. Placko ed., *Fundamentals of Instrumentation and Measurement*, ISTE USA, 2007.
- [10] *Calibration: Philosophy in Practice*, 2nd ed., Fluke Corp., 1994.
- [11] P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed., Cambridge University Press, 2015.
- [12] Robert A. Pease, *Troubleshooting Analog Circuits*, EDN Series for Design Engineers, Newnes, Jul 1991.
- [13] *REF200 - Dual Current Source and Current Sink Datasheet*, Rev. B, Texas Instruments, Jul 2015.
- [14] *LM134/LM234/LM334 - 3-Terminal Adjustable Current Sources Datasheet*, Rev. B, Texas Instruments, May 2013.
- [15] *Digital Multimeter UT61E Manual*, Uni-T, 2011.
- [16] A.E. Fridman, *The Quality of Measurements - A Metrological Reference*, Springer, 2012.
- [17] N. Zhao, R. Malik, W. Liao, *Difference Amplifier Forms Heart of Precision Current Source*, Analog Dialogue Vol. 43, Analog Devices, Sep 2009.
- [18] B. Ing, *Using a Linear Regulator to Produce a Constant Current Source*, Application Note 4404, Maxim Integrated, Jun 2009.
- [19] *REF102 - 2.5ppm/ $^\circ C$ Drift, 10-V Precision Voltage Reference Datasheet*, Rev. B, Texas Instruments, Jun 2009.
- [20] R. M. Stitt, *MAKE A PRECISION CURRENT SOURCE OR CURRENT SINK*, Application Bulletin, Burr-Brown, Feb 1994.
- [21] R. M. Stitt, *IMPLEMENTATION AND APPLICATIONS OF CURRENT SOURCES AND CURRENT RECEIVERS*, Application Bulletin, Burr-Brown, Mar 1990.

ABSTRACT

A composite milliohm meter, based on standard 4-wire Kelvin resistance measurement method, was developed for measurement of precision current shunts used in an industrial environment. The system is comprised of a precise, temperature compensated current source and a 4 ½ digit commercial multimeter for voltage measurement. Due to the set of specific demands and conditions concerning the industrial applications of precision current shunts, standard measurement equipment and methods could not be implemented. The composite resistor standard was used for temperature stabilization of the precision current source based on the voltage reference REF102. The measurement accuracy of 20 milliohms is observed during measurement of 20 milliohm current shunts.

A composite milliohm meter for measurement of precision current shunts in industrial environment

Marjan Urekar