

Avtomatizacija kalibratorja uporovnih mostičev

T. Podgornik¹, J. Bojkovski¹, V. Batagelj¹ and J. Drnovšek¹

¹ Laboratorij za metrologijo in kakovost, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
E-pošta: tadej.podgornik@fe.uni-lj.si

Povzetek. Kalibrator uporovnih mostičev (RBC) se uporablja za merjenje nelinearnosti uporovnih mostičev, ki se uporabljajo za precizno merjenje upornosti v primarni termometriji. Zaradi zahtevnosti ročnega upravljanja in temperaturne odvisnosti je bil RBC avtomatiziran. To je bilo storjeno s pomočjo servomanipulatorja, ki je preklapljal stikala. Servomanipulator je krmiljen z namensko izdelanim elektronskim krmilnikom, ki sprejema ukaze prek računalnika, na katerem deluje programska oprema za nadzor meritev. Z avtomatiziranim RBC je bilo narejenih več meritev, ki kažejo na zmanjšano temperaturno odvisnost v primeru, ko je RBC termično izoliran od okolice. Meritve so se izvajale na izmeničnem in enosmernem uporovnem mostiču. S pomočjo avtomatiziranega RBC je bilo mogoče potrditi ponovljivost te metode.

Ključne besede: uporovni mostič, kalibrator uporovnih mostičev, avtomatizacija

Automation of the resistance bridge calibrator

Extended abstract. In this paper we present full automation of the resistance bridge calibrator (RBC). The device is employed to calibrate AC and DC resistance bridges employed in primary thermometry. It consists of a resistor network made of 4 main resistors from which 35 different resistance values can be realized by switching 8 toggle switches on the calibrator panel. Up to 70 resistance ratios can be measured when the standard resistor and calibrator are interchanged. Literature shows that the resistor temperature coefficient may still effect measurement results. Placing the calibrator in a thermally stable environment can reduce it, but does not solve the problem of manual switching the calibrator switches.

Our objective was to ensure full automation of the calibrator in which a computer would control the calibrator and receive the measurements from the bridge. Computer operation would completely substitute manual operation during which an operator has to be present, meaning that, repeated calibration measurements would be carried out with no active involvement of the personnel (at night or during weekends).

We first set up a mechanical interface for manipulating the RBC switches. For this purpose we connected eight low torque servomotors to the switches via semi-rigid connector links, thus avoiding the switches from being mechanically harmed.

We then made an interface between the servomotors and the computer. The interface was constructed around a simple 8-bit microcontroller. It enables different levels of commands to be sent from the computer to the mechanical unit. The interface also provides power for the motors which can be switched off during measurements.

Finally we developed a control application to control the calibration process. In this application, end positions of switches are calibrated thus enabling the system to be used for different calibrators. The program switches combinations, gathers measurements from the bridge and calculates non-linearity of the bridge.

The measurements show that automation does not affect the long-term stability and mechanical repeatability of calibrator switches. Since no operator manipulation is needed, the whole system is inserted into a styrofoam enclosure. Unlike in manual switching, where the enclosure has to be opened to switch between combinations, automated switching enables the enclosure to be closed throughout the process, making the calibrator environment thermally more stable. This allows for a lower uncertainty of measurements.

Keywords: Resistance bridge, resistance bridge calibrator (RBC), automation

1 Uvod

Standardni platinasti uporovni termometri (SPRT) se v nacionalnih meroslovnih laboratorijih uporabljajo za merjenje temperature. Ta je določena s fiksnimi točkami, ki so definirane na mednarodni temperaturni lestvici ITS-90. Upornost SPRT se spreminja v odvisnosti od merjene temperature, zato točnost merjenja te upornosti diktira točnost merjenja temperature. Najboljše meritve upornosti se izvajajo z izmeničnimi (AC) in enosmernimi (DC) uporovnimi mostiči, ki primerjajo merjeno upornost z upornostjo referenčnega upora. Rezultat je razmerje med obema upornostma z relativno negotovostjo do nekaj deset milijardink (ppb = ang. »part-per-billion«). Preneseno v merjenje temperature to pomeni negotovost 5 μ K.

Za zagotovitev sledljivih merenj temperature je treba uporovne mostiče redno kalibrirati (vsaj enkrat na leto). Razlogi za to so v več prispevkih negotovosti uporovnih mostičev, kot so frekvenčna odvisnost, napaka razmerja, neponovljivost meritev in nelinearnost. V literaturi [1, 2] so opisane najpogostejše uporabljene metode za preverjanje delovanja uporovnih mostičev. Te so:

- Zunanji delilni transformator (RTU = ang. ratio turns unit) je naprava, ki je sposobna generirati 14 točno določenih razmerij od 0,000000000 do 1,181181182. V osnovi gre za kaskadni induktivni delilnik, ki ima delilna razmerja definirana tako, da skupaj testirajo vse dekade delilnega transformatorja v mostiču. Zaradi zahteve po veliki točnosti razmerij zunanje delilnega transformatorja, je izdelava te naprave zapletena in se zato le redko uporablja pri ovrednotenju uporovnih mostičev. Uporaben je samo za izmenične mostiče.
- Recipročno ali komplementarno preverjanje mostičev. Pri tej metodi se med seboj primerjata dva upora, priključena kot referenčni in merjeni upor, nato pa se med seboj zamenjata. Napaka razmerja ε se izračuna iz obeh izmerjenih razmerij n_1 in n_2 kot:

$$\varepsilon = \sqrt{n_1 \cdot n_2} - 1. \quad (1)$$

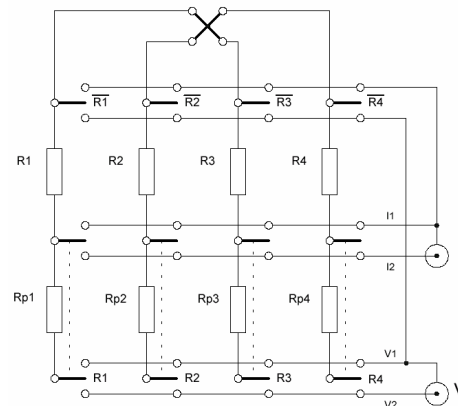
- Pri izmeničnih mostičih se ocenjuje tudi frekvenčna odvisnost mostiča (ang. AC quadrature effects/frequency dependance) s primerjavo odčitka pri nižji in višji merilni frekvenci (25 in 75 Hz).
- Merilna ponovljivost se ugotavlja s primerjavo dveh istovrstnih meritev. Pri uporovnih mostičih se to večinoma realizira s primerjavo meritev upornosti temperaturno stabilnih uporov, ki sta bili narejeni v časovnem razmiku vsaj 10 ur.
- Kalibrator uporovnih mostičev (RBC = ang. resistance bridge calibrator) je naprava, namenjena določanju nelinearnosti izmeničnih in enosmernih mostičev. Osnova naprave so štirje stabilni upori, ki jih je mogoče med seboj vezati v poljubne zaporedne in vzporedne vezave, in tako realizirati 35 različnih upornosti. Ker so dobljene upornosti vezane samo na osnovne upornosti, je iz meritev novih vrednosti mogoče sklepati o nelinearnosti mostiča.

V tem članku bo opisana avtomatizacija uporovnega kalibratorja. Opisani bodo tudi učinki avtomatizacije na meritve.

2 Kalibrator uporovnih mostičev

Kalibrator uporovnih mostičev je pasivna uporovna mreža, ki je bila namensko razvita za ovrednotenje uporovnih mostičev [3], uporabi se lahko tudi za ovrednotenje druge merilne opreme za merjenje upornosti. Komercialno dobavljive RBC25, RBC100 in RBC400 je razvil in prvotno izdelal D. R. White pod okriljem Novozelandskega nacionalnega meterološkega inštituta (Measurement Standards laboratory of New Zealand) [4]. Shema RBC je prikazana na sliki 1 [5]. Osnova RBC so štirje osnovni upori (R_1 do R_4), ki jih je

mogoče med seboj vezati vzporedno ali zaporedno. Osnovni upori so na enem koncu vezani na skupno točko nizke upornosti, na drugem pa na stikalno matriko, s katero jih je možno vezati med seboj. Poleg osnovnih uporov so v vezju še štirje pomožni upori (R_{p1} do R_{p4}). Ti so vezani zaporedno z osnovnimi upori. Njihova funkcija je kompenzacija parazitnih upornosti v uporovni mreži, s čimer se zagotovi točno merjenje napetosti na osnovnih uporih. Pri merjenju s kalibratorjem je pomembno, da so povezave uporov izvedene štirižično, s čimer se izognemo pogreški zaradi upornosti povezovalnih vodnikov. S preklapljanjem osmih klecnihih stikal na čelni plošči kalibratorja je mogoče realizirati 35 različnih upornosti.



Slika 1: Električna shema RBC
Figure 1. Circuit diagram of RBC

V okviru tega članka je bil za meritve uporabljen kalibrator uporovnih mostičev RBC100 izdelovalca 2kElectronics (Aeonz), ki je prikazan na sliki 2. Z RBC 100 je mogoče realizirati upornosti v območju od 16,8 Ω do 129,9 Ω . Te upornosti se merijo z uporabo mostiča, na podlagi primerjav dobljenih vrednosti pa je mogoče določiti nelinearnost mostiča. Z zamenjavo priključitve referenčnega upora in RBC je mogoče izmeriti do 70 razmerij, kar poleg meritve nelinearnosti omogoča tudi recipročno preverjanje mostiča.



Slika 2: Kalibrator uporovnih mostičev RBC100
Figure 2. Resistance bridge calibrator RBC100

Vrednosti uporov RBC100 so predstavljene v tabeli I. Vrednosti osnovnih uporov so bile izbrane tako, da so njihove vzporedne in zaporedne kombinacije enakomerno razporejene po merilnem območju mostiča. Pomožni upori imajo majhno upornost, ki je proporcionalna upornosti osnovnih uporov.

	Osnovni upori (Ω)	Pomožni upori (Ω)
1	81,8186	2,6327
2	48,1768	1,5495
3	36,5153	1,1749
4	31,2419	1,0049

Tabela I: Vrednosti uporov RBC100

Table 1. RBC100 resistor values

3 Avtomatizacija RBC

Zaradi preproste konstrukcije in preproste uporabe predstavlja princip RBC aplikativno učinkovit način ovrednotenja uporovnih mostičev. Kljub temu so bili pri uporabljenem RBC100 ugotovljeni problemi, ki so dober razlog za avtomatizacijo te naprave.

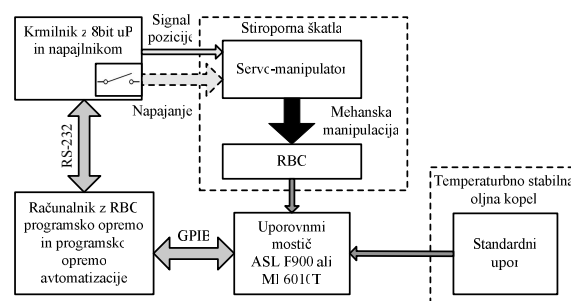
Prvi razlog za avtomatizacijo izhaja iz izvedbe merjenja z RBC. Med meritvami mora biti prisoten operator, ki preklaplja stikala na RBC. Operator mora izvesti 35 preklopov. Med preklopi se izvedejo meritve upornosti za določeno kombinacijo, ki traja približno 15 minut, kar pomeni, da se vseh 35 kombinacij pomeri v približno devetih urah. To zahteva cel delovnik operatorja in onemogoča izvedbo več merilnih setov v enem dnevu. Z avtomatiziranim RBC bi bilo mogoče izvesti več merilnih setov v enem dnevu, prav tako pa bi se lahko meritve izvajale periodično, s čimer bi se ugotavljala ponovljivost rezultatov.

Drugi razlog za avtomatizacijo izhaja iz največjega prispevka negotovosti RBC. Osnovni upori v RBC imajo temperaturne koeficiente približno $\pm 6 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ v temperaturnem območju od 20°C do 23°C . V laboratorijskih razmerah, kjer je temperatura regulirana v mejah $\pm 1^\circ\text{C}$, to pomeni spremembo upornosti približno $0,3 \times 10^{-6}$, kar pomeni negotovost RBC 10^{-7} . Z izboljšanjem regulacije temperature je mogoče doseči negotovosti do 10^{-8} . To je mogoče doseči z vstavitvijo RBC v termično izoliran prostor, kot je na primer zaprta stiroporna škatla. Tak prostor mora biti popolnoma izoliran pred okoliškimi temperaturnimi vplivi tudi med meritvami. To pomeni, da je treba stikala preklapljeti brez odpiranja škatle, kar je mogoče storiti z avtomatiziranim preklapljanjem stikal v škatli.

Poleg osnovnih razlogov za avtomatizacijo so bile podane še dodatne zahteve. Sistem, ki bi avtomatiziral RBC, bi moral biti univerzalen, to pomeni, da bi ga bilo mogoče pritrditi na poljuben RBC, pri tem bi se ponovno prilagodile le končne lege stikal. Vse meritve, opravljene z avtomatiziranim RBC naj bi se shranjevale

v datoteko za poznejšo obdelavo. Avtomatsko preklapljanje stikal naj ne bi vplivalo na rezultate meritev, niti naj ne bi povzročilo poškodb na RBC.

Blokovna shema avtomatiziranega RBC je prikazana na sliki 3. Proces avtomatizacije je bil razdeljen v tri faze. V prvi fazi je bil zgrajen servomanipulator, ki je preklapljal stikala RBC. V drugi fazi je bil izdelan elektronski krmilnik, ki je skrbel za komunikacijo med računalnikom in krmilil motorje na manipulatorju. Zadnja faza je bila razvoj programske opreme, ki je kontrolirala avtomatsko preklapljanje in sprejemala meritve z mostiča.



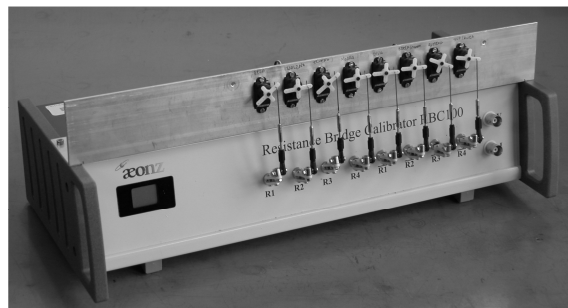
Slika 3: Blokovna shema avtomatiziranega RBC

Figure 3. Block diagram of automated RBC

3.1 Servomanipulator

Zahteve manipulatorja so bile, da naj bi ta premikal vsakega od osmih stikal RBC v poljubno od treh mogočih leg. Sile manipulatorja naj bi bile ustrezno majhne, kar bi varovalo stikala pred poškodbami. Med meritvami naj ne bi bilo sil na stikala.

Osnova za servomanipulator je aluminijast L profil dimenzij 50×50 mm (slika 4). L profil je pritrjen na RBC in deluje kot nosilec servomotorjev. Izbranih je bilo osem manjših servomotorjev (en servomotor za vsako stikalo), ki lahko proizvedejo do $0,09$ Nm navora. Tak navor ustreza sili, ki je potrebna za prekllop stikala, hkrati pa je ta sila dovolj majhna, da ga ne poškoduje.



Slika 4: Servomanipulator montiran na RBC

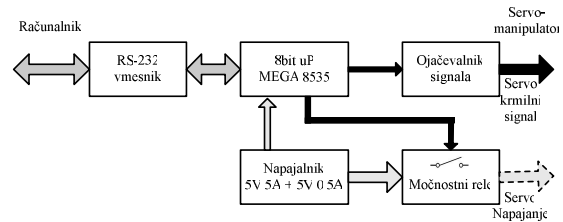
Figure 4. Servo-manipulator on top of RBC

Servomotorji so pritrjeni v L-profil in povezani na stikala s pomočjo upogljivih povezovalnih členov. Upogljivost povezovalnih členov zagotavlja dodatno varnost. V primeru, ko bi servomotor hotel premakniti stikalo čez njegovo končno lego, bi se povezovalni člen upognil in obvaroval stikalo pred poškodbo. Ponovljivost premika stikala je bila izmerjena na približno 0,2 mm. Nastavki, ki so pritrjeni na stikala, so bili namensko izdelani in omogočajo hitro odstranitev, s čimer postane RBC spet ročno upravljiv. Napajanje in kontrolni signali do servomotorjev so bili pripeljeni po večžilnem kablu, dolgem 2 m. To omogoča, da je poleg RBC v izolirani škatli prisoten le servomanipulator, preostali del avtomatizacije pa je postavljen zunaj škatle. Uporaba servomotorjev omogoča izklop napajanja med merjenjem, saj servomotorji zadržijo lego in ne proizvajajo sile, ko niso napajani.

3.2 Elektronski krmilnik

Glavna naloga elektronskega krmilnika je interpretacija ukazov, prejetih z računalnika. Ti ukazi se pretvorijo v signale, ki krmilijo servomanipulator. V elektronskem krmilniku je vgrajeno tudi napajanje za servomotorje, ki ga je mogoče izklopiti, s čimer se zagotovi, da servomotorji ne proizvajajo kakršnihkoli električnih signalov med merjenjem.

Na sliki 5 je prikazana blokovna shema krmilnika. Jedro krmilnika je Atmelov 8-bitni mikrokrmilnik Mega8535, ki deluje z urno frekvenco 16 Mhz. Ta mikrokrmilnik je bil izbran zaradi ustreznega števila vhodno/izhodnih vrat, ki omogočajo priključitev vseh krmilnih in napajalnih signalov ter komunikacijo z računalnikom. Povezava mikrokrmilnika z računalnikom je izvedena preko serijskega RS-232 vmesnika. Na izhodih mikrokrmilnika je generiranih osem krmilnih signalov za servomotorje. Ti gredo skozi ojačevalno stopnjo do servomotorjev, s čimer se zagotovi večja odpornost signalov na motnje, ki bi lahko nastale na kablu do manipulatorja. Za napajanje krmilnika skrbi dvoizhodni 5 V napajalnik. Prvi izhod napajalnika je močnejši (tok 5 A) in je namenjen napajanju servomotorjev, kjer so večje potrebe po toku (do 0,5 A na servomotor med premikanjem). Drugi izhod napajalnika je namenjen le napajanju mikrokrmilnika. Poraba energije s strani servomotorjev ne vpliva na delovanje mikrokrmilnika. V krmilnik je vgrajen tudi rele, s katerim se prekine napajanje servomotorjev. Za vklopiljanje releja skrbi mikrokrmilnik.



Slika 5: Blokovna shema elektronskega krmilnika
Figure 5. Block diagram of electronic controller

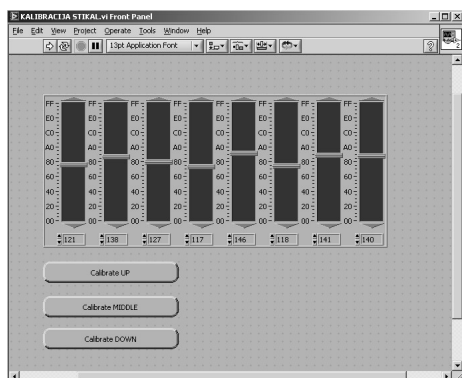
Krmilnik je izdelan na treh tiskanih vezjih, s čimer se zagotovi modularnost izdelave in olajšajo servisni postopki. Ta tiskana vezja so vezje z mikrokontrolerjem in vmesnikom RS-232, vezje z napajalnikom in vezje z izhodno stopnjo (na kateri so ojačevalnik za servosignale in rele za vklop napajanja servomotorjev).

Pomembno vlogo ima tudi program, ki se izvaja v mikrokrmilniku. V EEPROM mikrokrmilnika so shranjene končne lege stikal. Končne lege je mogoče nastaviti prek računalniških ukazov. S pomočjo shranjenih leg stikal lahko mikrokrmilnik sprejema ukaze o premiku na več nivojih. Mogoče je premikanje posameznega servomotorja, premikanje več servomotorjev ali celo premik vseh servomotorjev v določeno kombinacijo končnih leg, ki so shranjene v mikrokrmilniku.

3.3 Programska oprema

Zahteva avtomatizacije RBC je bila, da naj jo krmili računalnik. V ta namen je bila izdelana namenska programska oprema. Zahteve za programsko opremo so bile, da naj bi bila ta sposobna krmiliti avtomatiziran RBC, zajemati meritve z mostiča in jih hraniti v datoteko za poznejše procesiranje.

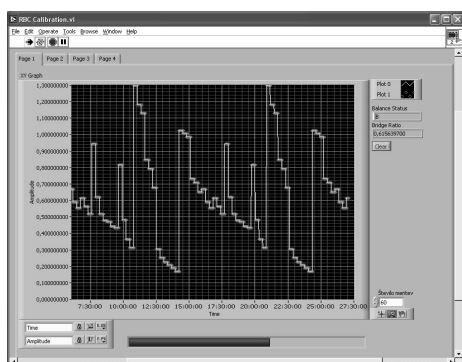
Programska oprema je bila izdelana v okolju LabVIEW. Razdeljena je na dva dela. Prvi del skrbi za nastavitve končnih leg stikal, z uporabo drsnikov (slika 6). S premikanjem drsnikov se premikajo servomotorji na manipulatorju, s čimer se premikajo tudi stikala na RBC. Tako se vsa stikala premaknejo v zgornjo, srednjo in spodnjo končno lego. Končne lege se definirajo s pritiskom na tipko »calibrate«, nato se shranijo v EEPROM mikrokrmilnika. Končne lege stikal je treba nastaviti le takrat, ko se manipulator predstavlja z ene RBC enote na drugo.



Slika 6: Uporabniški vmesnik za nastavev servomanipulatorja

Figure 6. User interface for configuration of servo-manipulator

Po nastavitvi končnih leg stikal se lahko začne merjenje. Merjenje nadzoruje drugi del programske opreme. Na sliki 7 je prikazan uporabniški vmesnik. Ta je razdeljen na štiri okna, ki prikazujejo proces merjenja. Prikazane so izmerjene vrednosti ter srednje vrednosti in standardne deviacije posameznih kombinacij. Odčitki se z mostiča zajemajo prek vmesnika GPIB. V uporabniškem vmesniku je mogoče nastaviti število odčitkov za posamezno kombinacijo. Iz zajetih odčitkov se prva polovica zavrže, s čimer se izloči vpliv prehodnega pojava mostiča. Iz preostalih odčitkov se izračunata srednja vrednost in standardna deviacija za posamezno kombinacijo. Te vrednosti so prikazane v grafih uporabniškega vmesnika in se shranjujejo v tekstovno datoteko, nato pa se iz njih preračunavajo parametri mostiča z uporabo programske opreme RBC. Z uporabo avtomatizacije se lahko zajame več merilnih setov zaporedoma, ki se pozneje obdelajo.



Slika 7: Uporabniški vmesnik za krmiljenje preklapljanja in zajemanje meritev

Figure 7. User interface for control and data acquisition

4 Meritve

V sklopu tega članka je bilo opravljenih več nizov meritev z uporabo RBC. Meritve so bile izvedene pri različnih temperaturah in z avtomatskim in ročnim preklapljanjem RBC. Izmerjeni so bili vplivi avtomatizacije RBC na meritve ter vpliv izolacije RBC s stiroporno škatlo.

Pri meritvah sta bila uporabljena izmenični mostič ASL F900 in enosmerni mostič MI 6010T. Z obema je bilo opravljenih več nizov meritev pod različnimi pogoji. Zaradi primerljivosti je bil pri vseh meritvah uporabljen merilni tok 2 mA. V sklopu vsakega merilnega niza je bilo izmerjenih vseh 35 upornosti (kombinacij) RBC. Za vsako kombinacijo je bilo opravljenih 60 odčitkov, s čimer je bila zagotovljena ustrežna stopnja zaupanja. Odčitki so se zajemali z vzorčevalnim časom 15 s z mostičem ASL in vsakih 10 s z mostičem MI. Nastavljena vzorčevalna časa sta najmanjša možna v katerih je mogoče dobiti odčitke mostiča z najmanjšo negotovostjo. Merilni čas enega niza je bil približno 9 ur z mostičem ASL in 6 ur z mostičem MI. Izmed 60 odčitkov za vsako kombinacijo je bilo zavrženih prvih 30, s čimer se je izognilo vplivu prehodnega pojava mostiča. Med prehodnim pojavom mostič z metodo približevanja išče merjeno vrednost, zato so izmerjene vrednosti v tem času nepravilne. Iz preostalih 30 odčitkov, ki predstavljajo izmerjeno kombinacijo, sta se izračunala srednja vrednost in standardna deviacija. Dobljeni rezultati so se uporabili v namenski programski opremi RBC (Resistance Bridge Calibrator, verzija 1.51 [6]), ki je izračunala nelinearnost ter z njo povezano standardno deviacijo mostiča, poleg pa še priporočeno kompenzacijo in njeno absolutno negotovost.

Meritve so bile opravljene pri različnih temperaturah. Prve meritve so bile opravljene z ročnim preklapljanjem RBC. Opravljene so bile v laboratorijskih razmerah s temperaturo 23 °C in stabilnostjo ± 1 °C. Naslednje meritve so bile opravljene z avtomatskim preklapljanjem, kjer je bil RBC vstavljen v zaprto stiroporno škatlo s temperaturo 23 °C in stabilnostjo $\pm 0,1$ °C. Pri meritvah so bili uporabljeni standardni upori 100 Ω z mostičem ASL in 25 Ω z mostičem MI. Oba standardna upora sta bila uporabljena v temperaturno stabilni kopeli s stabilnostjo $\pm 0,002$ °C.

Rezultati meritev so prikazani v tabeli II. Prvi seti meritev so bili izvedeni v laboratorijskih razmerah z ročnim preklapljanjem RBC. Z vsakim od obeh mostičev so bili ročno opravljeni trije seti meritev; zaradi zamudnega dela to pomeni en set na dan. Vse naslednje meritve so bile izvedene z avtomatskim preklapljanjem in RBC, vstavljenim v stiroporno škatlo. Z vsakim mostičem je bilo tako zaporedno opravljenih še štiri setov meritev znotraj škatle. Pri primerjavi meritev, izvedenih zunaj in znotraj škatle, je jasno

razvidno, da so dobljene standardne deviacije mostičev manjše. Standardna deviacija za mostič ASL znaša pod 3×10^{-8} in okoli 5×10^{-8} za mostič MI. Obe dobljeni vrednosti ustrezata specifikacijam mostičev. Poudariti je treba, da je kombinacija z vrednostjo $129,9 \Omega$ na meji merilnega dosega mostiča ASL in je zato izmerjena z večjo negotovostjo. Ob neupoštevanju te vrednosti se standardna deviacija za mostič ASL spusti na okoli 2×10^{-8} .

Pri prejšnjih poskusih merjenja z RBC je bilo malo poudarka na ponovljivosti te metode. Razlog za to je v dolgotrajnemu ročnem upravljanju RBC. Pri prvih meritvah tabele II je razvidno, da ima pomembno vlogo stabilnost temperature RBC. Pri uporabi RBC v temperaturno stabilnejšem okolju so dobljene standardne deviacije mostiča podobne. Pri obeh uporovnih mostičih se standardne deviacije meritev le malo razlikujejo, kar prikazuje ponovljivost meritev in daje večje zaupanje v uporabo RBC.

Nastavitve meritev	
Niz meritev / #	Izračunana standardna deviacija meritev / $\times 10^{-8}$
Ročno, ASL F900, 2 mA, laboratorij	
1	6,2
2	3,3
3	4,5
Ročno, MI6010T, 2 mA, laboratorij	
1	12,8
2	17,6
3	14,3
Avtomatsko, ASL F900, 2 mA, stiroporna škatla	
1	2,5
2	2,4
3	3,0
4	2,5
Avtomatsko, MI6010T, 2 mA, stiroporna škatla	
1	4,7
2	4,9
3	4,6
4	4,6

Tabela II: Rezultati meritev, opravljenih z ASL F900 in MI 6010T

Table II. Results of measurements done with the ASL F900 and MI 6010T

5 Sklep

Cilj tega članka je predstaviti izboljšave, ki jih je mogoče doseči z avtomatizacijo RBC. Poglavitne težave, ki so se predstavile v prejšnjih poskusih, kjer je bil RBC ročno upravljan, so bile vezane na rezultate kalibracije, saj so bili ti slabši in neponovljivi. Z uporabo avtomatiziranega RBC, je sedaj možno opraviti več zaporednih serij meritev znotraj temperaturno stabilnega okolja, brez potrebe po operatorju. Rezultati

takih meritev so ponovljivi, s čimer se potrjuje uporaba te metode. Z vstavitvijo RBC v stiroporno škatlo s temperaturno stabilnostjo $\pm 0,1^\circ\text{C}$, je bilo tako mogoče ponovljivo doseči standardno deviacijo mostiča ASL pod 3×10^{-8} . Dobljene vrednosti so na meji negotovosti omenjenega mostiča in dajejo zaupanje v pravilno delovanje RBC in mostiča. Učinek bi bilo mogoče izboljšati s konstrukcijo temperaturno stabilizirane škatle. To bi bilo mogoče narediti s segrevanjem obstoječe škatle na temperaturo, ki je nekaj $^\circ\text{C}$ višja od temperature okolice. S kakovostno zvezno regulacijo te temperature bi bilo mogoče doseči stabilnost v rangi $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Kljub temu pa je izdelava takega okolja dvomljiva, saj so izvedene meritve že na meji negotovosti RBC (2×10^{-8}).

Prihodnje delo zajema gradnjo popolnoma avtomatiziranega RBC. Stikala bi zamenjali releji, ki bi jih lahko direktno prožil računalnik. Uporaba relejev ostaja sporna zaradi višje kontaktne upornosti v primerjavi s stikali. Največja izboljšava gradnje popolnoma avtomatskega RBC je sposobnost potopljivosti naprave v temperaturno stabilno kopel ($\pm 0,002^\circ\text{C}$), s čimer bi se učinek temperaturne odvisnosti uporov lahko zanemarljivo.

6 Literatura

- [1] G. F. Strouse, K. D. Hill; *Proceedings of the 8th Temperature Symposium: Performance Assessment of Resistance Ratio Bridges Used for the Calibration of SPRTs*, (2002), pp. 327-332.
- [2] S. Rudtsch, G. Ramm, D. Heyer in R. Vollmert; *Proceedings of TEMPMEKO 2004, The 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science: Comparison of Test and Calibration Methods For Resistance Ratio Bridges*, (2004), pp. 773-780.
- [3] D. R. White; *Proceedings of TEMPMEKO '96, The 6th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science: A Method for Calibrating Resistance Thermometry Bridges*, (1996), pp. 129-135.
- [4] D. R. White D R in K. Jones; *High Accuracy Four-Terminal Standard Resistor for Use in Electrical Metrology*, US Patent Number 5 867 018 (1999).
- [5] Industrial research limited; *Operator Manual for Resistance Bridge Calibrators, Version May 2006* (2006), pp. 1-39.
- [6] Internet: <http://msl.irl.cri.nz>