

Merilni tok uporovnih mostičev

Vincencij Žužek, Jovan Bojkovski, Valentin Batagelj in Janko Drnovšek

Univerza v Ljubljani-Fakulteta za elektrotehniko/Laboratorij za metrologijo in kakovost, Tržaška 25, Ljubljana
E-pošta: vincencij.zuzek@fe.uni-lj.si

Measurement current of resistance bridges

One of the important uncertainty sources at resistance thermometer calibrations is the self-heating of the thermometer's sensor. When measuring electrical resistance, it is unavoidable to use a measurement current that additionally heats the sensor for a few millikelvins and thus increases its resistance. This effect is corrected with the use of a two-current method and an extrapolation to zero measurement current. The uncertainty of the bridge measurement current therefore directly affects the uncertainty of the correction. In the article, the relative errors of the RMS values of measurement currents in the range between 0,5 mA and 20 mA were determined for two different thermometry bridges: an AC bridge ASL F900 and a DC bridge MI 6010T. Two methods for current measurement were used: with a direct method the current is measured with an ammeter and with an indirect method the current is calculated from the voltage drop on a known shunt resistor. The measured errors were approximately $-0,12\%$ for the AC bridge and $-3,2\%$ for the DC bridge over the entire range.

1 Uvod

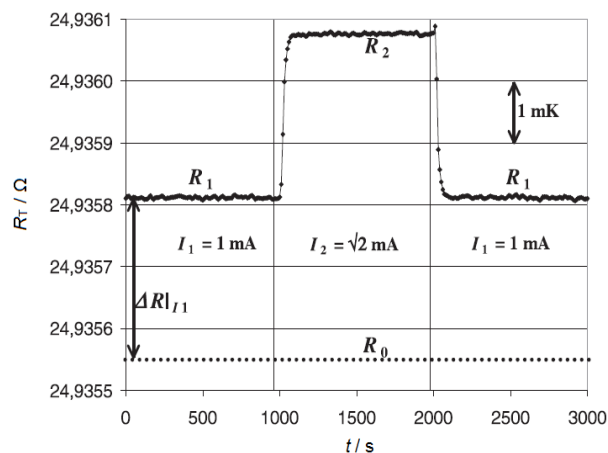
Pri umerjanju uporovnih termometrov v primarnem temperaturnem laboratoriju v sklopu Laboratorija za metrologijo in kakovost izpostavimo dva večja prispevka k merilni negotovosti, povezana z merjenjem električne upornosti z uporabo uporovnih mostičev. Ta prispevka sta referenčni upor in lastno segrevanje termometra [1]. Na upornost referenčnega upora R_S vplivajo:

- temperatura glede na temperaturni koeficient β , ki znaša do ± 5 ppm/K (angl. parts-per-million, 10^{-6}),
- tlak glede na tlačni koeficient γ ,
- lastno segrevanje glede na močnostni koeficient, ki znaša do 4 ppm/W in
- DC-AC razlika, ki znaša do 100 ppb (angl. parts-per-billion, 10^{-9}).

Lastno segrevanje senzorja termometra je neizogiben pojav, saj je pri merjenju upornosti vedno prisoten merilni tok i , ki povzroča trošenje moči na senzorju in s tem njegovo segrevanje. Sprememba temperature in hkrati upornosti senzorja ΔR_T je odvisna od kvadrata toka, upornosti senzorja in termične upornosti. Termična upornost je nadalje odvisna od zgradbe termometra in okolja, v katerem se ta uporablja [2]. Lastno segrevanje

pri temperaturi trojne točke vode ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) in pri merilnem toku 1 mA za steklene termometre tipično znaša nekaj mK. Za kovinske termometre je lastno segrevanje manjše za faktor 10.

Pri umerjanju termometrov vedno izvajamo korekcijo vpliva lastnega segrevanja senzorja termometra, običajno z uporabo metode dveh merilnih tokov ter ekstrapolacijo na ničelni merilni tok. Tokova sta pogosto v razmerju $\sqrt{2}$. Negotovost razmerij tokov neposredno vpliva na negotovost korekcije lastnega segrevanja in lahko pri določenih razmerjih znaša tudi več procentov [1].



Slika 1: metoda dveh merilnih tokov [3].

V članku bodo predstavljene meritve efektivnih vrednosti merilnih tokov dveh različnih uporovnih mostičev, ki sta v uporabi v našem laboratoriju.

2 Uporovna mostiča

Uporovna mostiča sta avtomatska in namenjena uporabi na področju termometrije:

- izmenični (angl. alternating current, AC) mostič Automatic Systems Laboratories F900, ki meri razmerja med 0 in 1,3 s točnostjo ± 20 ppb ter ima specificirano točnost merilnega toka $i \pm 0,1\%$ in
- enosmerni (angl. direct current, DC) mostič Measurements International 6010T, ki meri razmerja med 0 in 14 s merilno negotovostjo manj kot 100 ppb.

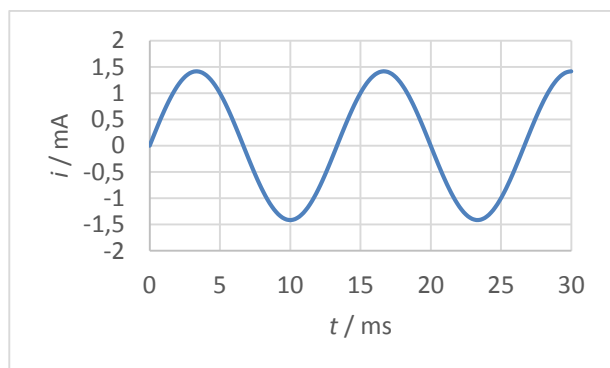


Slika 2: AC mostič ASL F900.

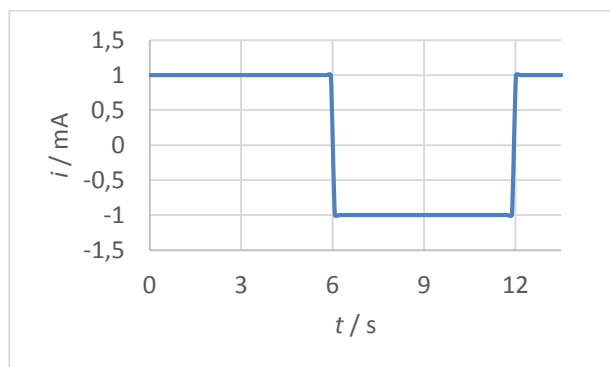


Slika 3: DC mostič MI 6010T.

Glavna razlika med mostičema je tok i . Pri AC mostiču je ta sinusne oblike s frekvenco 75 Hz (lahko tudi 25 Hz), pri DC mostiču pa pravokotne oblike s frekvenco tipično 1/12 Hz.



Slika 4: merilni tok AC mostiča.

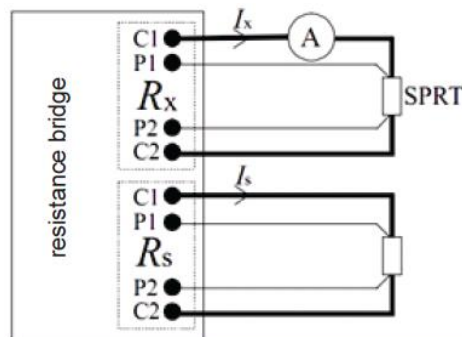


Slika 5: merilni tok DC mostiča.

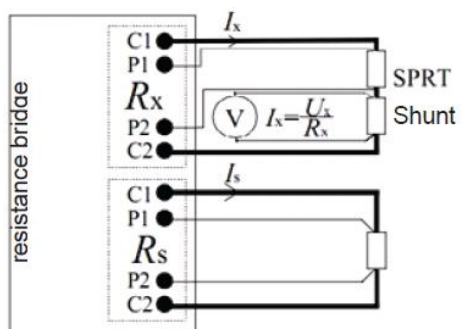
Mostiča merita razmerje neznane upornosti uporovnega termometra R_T in znane upornosti umerjenega referenčnega upora R_S . Referenčni upori se hranijo v oljni kopeli pri temperaturi $(23 \pm 0,002) ^\circ\text{C}$. Mostiča se razlikujeta tudi glede na princip delovanja. V osnovi deluje AC mostič tako, da pošilja isti tok skozi obe upornosti in meri razmerje padcev napetosti, medtem ko DC mostič pošilja znano razmerje tokov skozi upornosti, tako da sta padca napetosti enaka [4].

3 Merjenje merilnega toka

Tok merimo v tokovni veji na strani termometra (termometer je na mostič priključen s štiri vodno vezavo) z uporabo dveh metod: direktne in indirektna metode. Pri direktni metodi merimo tok z ampermetrom, pri indirektni pa merimo padec napetosti na merilnem uporu, vezanim zaporedno s termometrom ter tok izračunamo iz znane upornosti merilnega upora [3].



Slika 6: direktna metoda.



Slika 7: indirektna metoda.

Kot ampermetr je bil uporabljen inštrument Batemika M100, ki je bil namensko razvit za merjenje efektivnih vrednosti merilnih tokov uporovnih mostičev. Ampermetr ima dve območji, nizko območje do 2,9 mA ter visoko območje do 15 mA, absolutna točnost je specificirana kot 500 ppm.

Pri indirektni metodi je bil kot merilni upor pri merjenju toka DC mostiča uporabljen referenčni upor v oljni kopeli z upornostjo 10Ω , pri AC mostiču pa je bil kot merilni upor uporabljen kar referenčni upor R_S , saj teče skozenj isti tok kot skozi senzor termometra. Meritev padca napetosti na merilnem uporu je potekala z modulom za zajem napetostnih signalov National Instruments USB-6211. Modul ima na najnižjem napetostnem območju 200 mV točnost 88 μV .

4 Rezultati

Pri vseh meritvah je bilo izmerjenih vsaj 60 vrednosti merilnega toka. V tabelah so podani: nastavljeni efektivni merilni tok i_N , povprečni izmerjeni efektivni merilni tok i_I , standardni odklon σ ter izračunani relativni pogrešek Δi .

4.1 AC mostič

Razmerje mostiča pri meritvah tokov je bilo v vseh primerih 0,25. V nižjem območju tokov od 1/2 mA do $2\sqrt{2}$ mA je bil uporabljen 25,5 Ω standardni platinasti uporovni termometer (angl. standard platinum resistance thermometer, SPRT) v celici trojne točke vode ter 100 Ω referenčni upor. V območju višjih tokov od 5 mA do 20 mA je bil uporabljen 0,25 Ω visokotemperaturni SPRT v celici trojne točke vode in 1 Ω referenčni upor.

4.1.1 Direktna metoda

Tabela 1. Merilni tokovi nižjega območja AC mostiča, izmerjeni z direktno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	σ / nA	Δi / %
1/2	0,4993	1,6	-0,14
$\sqrt{2}/2$	0,7062	2,1	-0,13
1	0,9983	2,6	-0,17
$\sqrt{2}$	1,4119	4,7	-0,16
2	1,9969	7,6	-0,15
$2\sqrt{2}$	2,8249	8,4	-0,12

Tabela 2. Merilni tokovi višjega območja AC mostiča, izmerjeni z direktno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	σ / nA	Δi / %
5	4,9926	27,2	-0,15
$5\sqrt{2}$	7,0611	31,3	-0,14
10	9,9885	33,3	-0,11
$10\sqrt{2}$	14,126	39,0	-0,11

4.1.2 Indirektna metoda

Tabela 3. Merilni tokovi nižjega območja AC mostiča, izmerjeni z indirektno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	σ / nA	Δi / %
1/2	0,4994	2,5	-0,12
$\sqrt{2}/2$	0,7063	1,8	-0,11
1	0,9985	2,0	-0,15
$\sqrt{2}$	1,4121	2,1	-0,15
2	1,9972	2,1	-0,14
$2\sqrt{2}$	2,8253	2,8	-0,11

Tabela 4. Merilni tokovi višjega območja AC mostiča, izmerjeni z indirektno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	σ / nA	Δi / %
5	4,9986	34,1	-0,03
$5\sqrt{2}$	7,0659	27,7	-0,07
10	9,9919	30,7	-0,08
$10\sqrt{2}$	14,129	22,8	-0,10
20	19,977	26,9	-0,12

4.2 DC mostič

Pri meritvah tokov nižjega območja je bilo razmerje mostiča 1. Uporabljen je bil 25,5 Ω SPRT v celici trojne točke vode in 25 Ω referenčni upor. V višjem območju je bilo razmerje 0,25. Uporabljen termometer je bil 0,25 Ω visokotemperaturni SPRT v celici trojne točke vode in 1 Ω referenčni upor.

4.2.1 Direktna metoda

Tabela 5. Merilni tokovi nižjega območja DC mostiča, izmerjeni z direktno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	Δi / %
1/2	0,4843	-3,14
$\sqrt{2}/2$	0,6847	-3,17
1	0,9687	-3,13
$\sqrt{2}$	1,3688	-3,21
2	1,9367	-3,17
$2\sqrt{2}$	2,7319	-3,41

Tabela 6. Merilni tokovi višjega območja DC mostiča, izmerjeni z direktno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	Δi / %
5	4,8438	-3,12
$5\sqrt{2}$	6,8479	-3,16
10	9,6805	-3,20
$10\sqrt{2}$	13,689	-3,20

4.2.2 Indirektna metoda

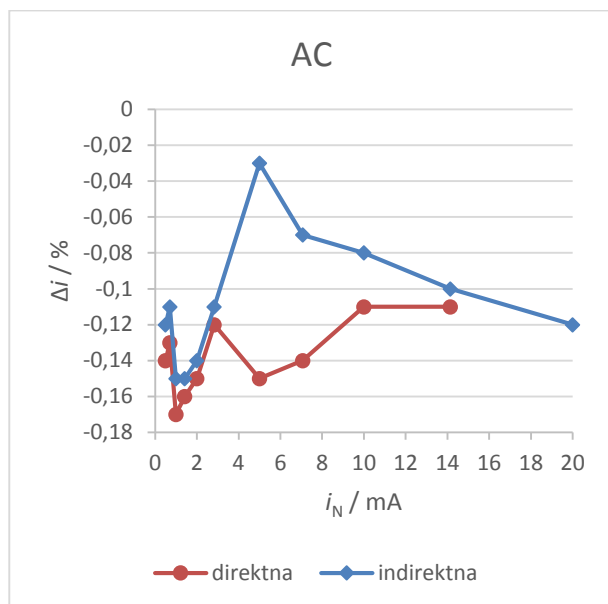
Tabela 7. Merilni tokovi nižjega območja DC mostiča, izmerjeni z indirektno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	σ / nA	Δi / %
1/2	0,4850	12,4	-3,00
$\sqrt{2}/2$	0,6853	6,2	-3,08
1	0,9683	16,8	-3,17
$\sqrt{2}$	1,3693	26,6	-3,18
2	1,9363	22,8	-3,19
$2\sqrt{2}$	2,7418	19,6	-3,06

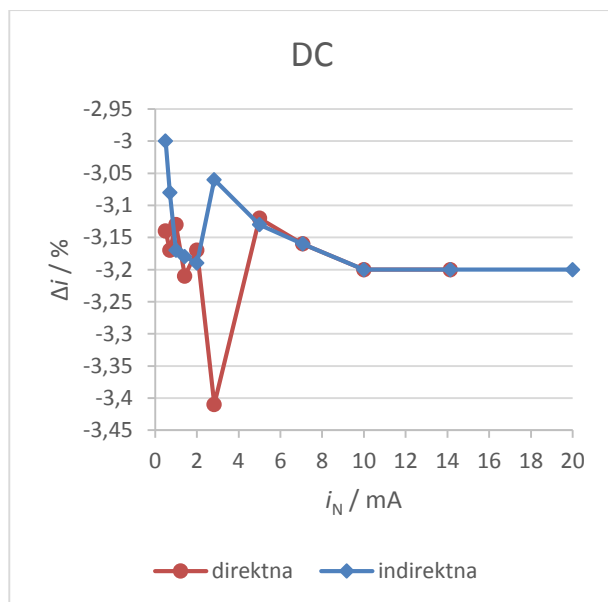
Tabela 8. Merilni tokovi višjega območja DC mostiča, izmerjeni z indirektno metodo.

i_N / mA	i_I / mA	σ / nA	Δi / %
5	4,8435	23,9	-3,13
$5\sqrt{2}$	6,8478	27,9	-3,16
10	9,6798	66,0	-3,20
$10\sqrt{2}$	13,689	197,1	-3,20
20	19,359	164,0	-3,20

4.3 Grafični prikaz pogreškov



Slika 8: relativni pogrešek merilnega toka AC mostiča.



Slika 9: relativni pogrešek merilnega toka DC mostiča.

5 Komentar

Pri obeh merilnih metodah sta bila signala, pri direktni metodi tokovni, pri indirektni metodi pa napetostni signal, vzorčena z visoko frekvenco. Iz vzorcev je bilo nato možno na osebнем računalniku v okolju LabVIEW točno rekonstruirati periodičen merilni tok obeh mostičev in določiti njegovo efektivno vrednost.

Glede na sliko 8 so bili pri AC mostiču z obema metodama izmerjeni podobni pogreški merilnega toka v nižjem območju, med $-0,1 \%$ in $-0,18 \%$, v višjem območju toka pa se pogreški nekoliko razlikujejo. Skoraj vsi izmerjeni pogreški pa presegajo specificirano mejo $\pm 0,1 \%$.

Pri DC mostiču (slika 9) so izmerjeni pogreški po obeh metodah primerljivi v celotnem območju, razen pri toku $2 \cdot \sqrt{2} \text{ mA}$, kjer je odstopanje izrazito. To meritev bi bilo potrebno ponoviti in ugotoviti, ali je izmerjena razlika ponovljiva. Pogreški se gibljejo okrog $-3,2 \%$, kar je bistveno več kot pri AC mostiču in je posledica precejšnjega dvižnega časa merilnega toka, kar zmanjšuje efektivno vrednost pravokotnega signala.

Za negotovost korekcije lastnega segrevanja senzorja termometra je bolj od vrednosti pogreškov pomembno, da so ti v celotnem območju merilnega toka čimbolj konstantni. Če želimo korekcijo izvajati najtočneje, pa je potrebno merilni tok mostiča meriti in v izračunih namesto nazivnih vrednosti uporabiti dejanske merjene vrednosti tokov. Seveda pa z merjenjem toka ne smemo vplivati na delovanje mostiča. Glede na izmerjene tokove bi bila negotovost korekcije lastnega segrevanja, če bi za njen izračun uporabili nazivne vrednosti tokov v razmerju $\sqrt{2}$, pri AC mostiču pod $1 \mu\text{K}$ in pri DC mostiču pod $4 \mu\text{K}$.

Rezultati, objavljeni v članku, so nastali v okviru EMRP (angl. European Metrology Research Programme) projekta NOTED (angl. Novel techniques for traceable temperature dissemination) z oznako JRP-s12.

Literatura

- [1] Consultative Committee for Thermometry – Working Group 3: Uncertainties in the Realization of the SPRT Subranges of the ITS-90, 2009.
- [2] V. Batagelj, J. Bojkovski, J. Drnovšek in I. Pušnik, „Influence of SPRT Self-Heating on Measurement Uncertainty in Fixed Point Calibration and Calibration by Comparison,“ v Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Chicago, 2003.
- [3] V. Batagelj, J. Bojkovski in J. Drnovšek, Measurement Science and Technology **14**, 2151 (2003).
- [4] D. Brown, „Resistance Measurements Systems w/Sub PPM Accuracy - $1\mu\Omega$ to $1\text{G}\Omega$,“ Measurements International.