

NESIGURNOSTI MERENJA ELEKTRIČNE OTPORNOSTI ETALONA VELIKE OTPORNOSTI ADAPTIRANIM MOSTOM

Zoran Šofranac, Tehnički opitni centar, Beograd

Sadržaj – Proračunata je merna nesigurnost za etalone velike otpornosti Keithley 5155 ($10^8 \Omega$) i Keithley 5155 ($10^9 \Omega$) korišćenjem adaptiranog mosta. Prikazana je analiza nesigurnosti merenja - tabela proračuna.

1. UVOD

Za određivanje vrednosti električne otpornosti etalona velike otpornosti u opsegu $10^8 \Omega$ do $10^{13} \Omega$ korišćen je adaptirani most u kome su dve grane zamenjene preciznim naponskim izvorima – kalibratorima E_S i E_X (slika 1)[1][2].

Proračunate su merne nesigurnosti određivanja vrednosti fiksnih etalona velike otpornosti Keithley 5155 nominalnih vrednosti $10^8 \Omega$ i $10^9 \Omega$. Dugotrajna stabilnost ovih etalona je bolja od $\pm 0,1 \%$ promene vrednosti otpornosti u toku hiljadu časova. Naponski koeficijent je $-0,3 \%/V$, a temperaturni koeficijent je nominalno $-0,1 \%/^\circ C$. Priključci su izvedeni preko dva BNC konektora sa izolatorom od teflona. Kućište je na "guard" potencijalu.

Adaptirani most za merenje velikih otpornosti korišćen je za odnos otpornosti $R_X/R_S = 10$. Kao R_S grana korišćen je etalon otpornik GUID 9330 od $10 M\Omega$ kada je u R_X grani postavljen etalon Keithley 5155 ($10^8 \Omega$). Za određivanje vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^9 \Omega$) u R_S grani se postavlja prethodno izmereni etalon Keithley 5155 ($10^8 \Omega$). Na ovaj način moguće je odrediti sve vrednosti do $10^{13} \Omega$.

U E_S grani postavljen je kalibrator JF 335D u opsegu od 10 V sa greškom postavljanja napona od $\pm (0,001 \% + 20 \mu V)$.

Kao E_X grana korišćen je kalibrator JF 5440B u opsegu od 100 V sa greškom postavljanja napona od $\pm (0,0006 \% + 100 \mu V)$.

Nul-detektor (D) je JF 845AR.

Kod merenja velikih otpornosti mora se voditi računa da otpornost izolacije može da izazove grešku u merenju. Zbog toga se grane R_X i R_S pažljivo oklapaju, i etaloni vezuju u tri tačke, čime se izbegavaju greške kod uravnoteženja mosta [2]. Sve mase u mernom mostu spojene su u istu tačku.

2. PRORAČUN MERNE NESIGURNOSTI ZA ETALON KEITHLY 5155 ($10^8 \Omega$)

Odnos napona E_S / E_X je približno 1 : 10, pri čemu je kalibrator u E_S grani postavljen na 10 V, a kalibrator u E_X grani na 100 V. Uravnoteženje mosta ostvaruje se promenom napona kalibrатора. U trenutku uravnoteženja važi relacija:

$$E_S/E_X = R_S/R_X \quad (1)$$

Iz relacije (1) dobija se da je:

$$R_X = R_S \cdot E_X/E_S \quad (2)$$

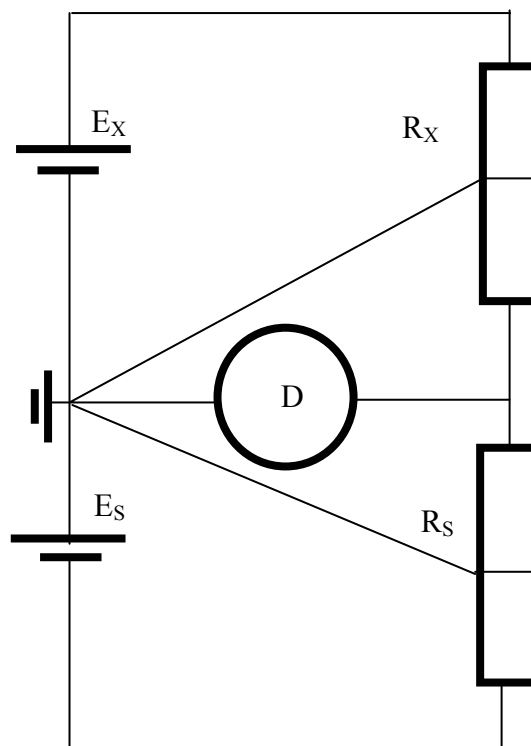
Za proračun merne nesigurnosti određivanja vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^8 \Omega$) na naponu od 100 V, matematički model je dat relacijom

$$R_{X100V} = (R_S + \delta R_{ST}) \cdot (E_X + \delta E_{XT}) / (E_S + \delta E_{ST}) - \delta R_{XT} \quad (3)$$

gde je:

R_S - otpornost etalona GUID 9330 (10 M Ω): Otpornost je poznata sa nesigurnošću od $\pm 180 \Omega$ ($k = 2$) na referentnoj temperaturi od $23^\circ C$.

δR_{ST} - varijacija otpornosti etalona GUID 9330 (10 M Ω) usled temperature: Otpornik je uronjen u uljno kupatilo na referentnoj temperaturi od $23^\circ C$ čija je stabilnost $\pm 10 mK$. Temperaturni koeficijent otpornika je $5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, pa je varijacija otpornosti usled varijacije temperature $\pm 0,5 \Omega$.



Sl. 1. Adaptirani most za merenje velikih otpornosti

E_S - napon postavljen na kalibratoru JF335D: 10 V, sa greškom $\pm (0,001 \% + 20 \mu V)$, što iznosi $\pm 0,12 mV$ (specificirano na temperaturi okoline $23^\circ C \pm 1^\circ C$).

δE_{ST} - varijacija napona postavljenog na kalibratoru JF335D usled temperature : Temperaturni koeficijent je $< \pm (0,0002 \% + 1 \mu V)/K$. Merenja se obavljaju u

faradejevom kavez u kome je održavana temperatura okoline $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa je varijacija napona usled varijacije temperature $\pm 0,021\text{ mV}$.

E_X - napon postavljen na kalibratoru JF5440B: 100 V nominalno, sa greškom $\pm (0,0006\% + 100\mu\text{V})$, što iznosi $\pm 0,6\text{ mV}$ (specificirano na temperaturi okoline $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

δE_{XT} - varijacija napona postavljenog na kalibratoru JF5440B usled temperature: Temperaturni koeficijent je $\pm 0,1 \cdot 10^{-7}/\text{K}$. Pošto se merenja obavljaju u faradejevom kavez u kome je održavana temperatura okoline $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, nema varijacija napona usled varijacije temperature.

δR_{XT} - varijacija otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^8\ \Omega$) sa temperaturom: Temperaturni koeficijent otpornika je $0,1\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa je za varijaciju temperature od $\pm 10\text{ mK}$ (uronjen u uljno kupatilo) varijacija otpornosti usled varijacije temperature $\pm 1000\ \Omega$.

Korišćenjem relacije (4) za određivanje standardne nesigurnosti za nekorelisane ulazne veličine [3][4]

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (4)$$

gde je:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} - c_i, \text{ parcijalni diferencijal funkcije } y$$

$$u(x_i) - \text{standardna nesigurnost procenjene vrednosti } x_i$$

dolazi se do parcijalnih doprinosa nesigurnosti ulaznih veličina u određivanju kombinovane nesigurnosti merenja otpornosti etalona od $10^8\ \Omega$ (tabela 1).

Tabela 1. *Parcijalni doprinosi nesigurnosti $R_X(10^8\ \Omega)$*

Veličina	$u(x_i)$	Funkcija raspodele	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$
R_S	$90\ \Omega$	normalna	10	$900\ \Omega$
δR_{ST}	$0,29\ \Omega$	ravnomerna	10	$2,9\ \Omega$
E_S	$0,07\text{ mV}$	ravnomerna	$10^7\ \Omega/\text{V}$	$700\ \Omega$
δE_{ST}	$0,012\text{ mV}$	ravnomerna	$10^7\ \Omega/\text{V}$	$120\ \Omega$
E_X	$0,35\text{ mV}$	ravnomerna	$10^6\ \Omega/\text{V}$	$350\ \Omega$
δR_{XT}	$577\ \Omega$	ravnomerna	1	$577\ \Omega$
R_{X100V}				$1330\ \Omega$

Proširena merna nesigurnost određivanja vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^8\ \Omega$) iznosi $\pm 2660\ \Omega$ ($k=2$).

Sličnim postupkom može se odrediti nesigurnost određivanja vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^9\ \Omega$).

3. PRORAČUN MERNE NESIGURNOSTI ZA ETALON KEITHLEY 5155 ($10^9\ \Omega$)

Za određivanje vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^9\ \Omega$) u R_S grani se postavlja prethodno izmereni etalon Keithley 5155 ($10^8\ \Omega$) čija je vrednost određena na naponu od 100 V. Vrednost otpornosti na naponu od 10 V dobija se primenom naponskog koeficijenta koji iznosi $-0,3\%/\text{V}$.

Za proračun merne nesigurnosti određivanja vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^9\ \Omega$) na naponu od 100 V, matematički model je dat relacijom (3)

gde je:

R_S - otpornost etalona Keithley 5155 ($10^8\ \Omega$) na 10 V: Otpornost je poznata sa nesigurnošću od $\pm 2660\ \Omega$ ($k=2$) na referentnoj temperaturi od $23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

δR_{ST} - varijacija otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^8\ \Omega$) usled temperature: Otpornik je uronjen u uljno kupatilo na referentnoj temperaturi od $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ čija je stabilnost $\pm 10\text{ mK}$. Temperaturni koeficijent otpornika je $0,1\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa je varijacija otpornosti usled varijacije temperature $\pm 10\ \Omega$.

E_S - napon postavljen na kalibratoru JF335D: 10 V, sa greškom $\pm (0,001\% + 20\ \mu\text{V})$, što iznosi $\pm 0,12\text{ mV}$ (specificirano na temperaturi okoline $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

δE_{ST} - varijacija napona postavljenog na kalibratoru JF335D usled temperature: Temperaturni koeficijent je $< \pm (0,0002\% + 1\ \mu\text{V})/\text{K}$. Merenja se obavljaju u faradejevom kavez u kome je održavana temperatura okoline $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa je varijacija napona usled varijacije temperature $\pm 0,021\text{ mV}$.

E_X - napon postavljen na kalibratoru JF5440B: 100 V nominalno, sa greškom $\pm (0,0006\% + 100\mu\text{V})$, što iznosi $\pm 0,6\text{ mV}$ (specificirano na temperaturi okoline $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

δE_{XT} - varijacija napona postavljenog na kalibratoru JF5440B usled temperature: Temperaturni koeficijent je $\pm 0,1 \cdot 10^{-7}/\text{K}$. Pošto se merenja obavljaju u faradejevom kavez u kome je održavana temperatura okoline $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, nema varijacija napona usled varijacije temperature.

δR_{XT} - varijacija otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^9\ \Omega$) sa temperaturom: Temperaturni koeficijent otpornika je $0,1\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa je za varijaciju temperature od $\pm 10\text{ mK}$ varijacija otpornosti usled varijacije temperature $\pm 10000\ \Omega$.

U tabeli 2 dati su parcijalni doprinosi nesigurnosti ulaznih veličina u određivanju kombinovane nesigurnosti merenja otpornosti etalona od $10^9\ \Omega$.

Tabela 2. *Parcijalni doprinosi nesigurnosti $R_X(10^9 \Omega)$*

Veličina	$u(x_i)$	Funkcija raspodele	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$
R_S	1330 Ω	normalna	10	13300 Ω
δR_{ST}	5,77 Ω	ravnomerna	10	57,7 Ω
E_S	0,07 mV	ravnomerna	$10^8 \Omega/V$	7000 Ω
δE_{ST}	0,012 mV	ravnomerna	$10^8 \Omega/V$	1200 Ω
E_X	0,35 mV	ravnomerna	$10^7 \Omega/V$	3500 Ω
δR_{XT}	5773 Ω	ravnomerna	1	5773 Ω
R_{X100V}				16520 Ω

Proširena merna nesigurnost određivanja vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^9 \Omega$) iznosi $\pm 33040 \Omega$ ($k = 2$).

4. ZAKLJUČAK

Izvršen je proračun merne nesigurnosti određivanja vrednosti električne otpornosti etalona velike otpornosti Keithley 5155 ($10^8 \Omega$) i Keithley 5155 ($10^9 \Omega$) korišćenjem adaptiranog mosta za merenje velikih otpornosti u kome su dve grane zamenjene preciznim naponskim izvorima – kalibratorima (JF335D i JF5440B). Kod merjenja električne otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^8 \Omega$) kao R_S grana korišćen je etalon otpornik GUID 9330 (10 M Ω). Kod merjenja električne otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^9 \Omega$) kao R_S grana korišćen je prethodno izmereni etalon Keithley 5155 ($10^8 \Omega$).

Analiza nesigurnosti merjenja pokazala je da proširena merna nesigurnost određivanja vrednosti otpornosti etalona Keithley 5155 ($10^8 \Omega$) iznosi $\pm 2660 \Omega$ ($k = 2$), a etalona Keithley 5155 ($10^9 \Omega$) $\pm 33040 \Omega$ ($k = 2$).

LITERATURA

- [1] Z. Šofranac and V. Graetsch, "Improved technique and Standard Resistors for the Measurement of High Value Resistance", *CPEM 90 Digest – Zbornik radova, s.118–119*, Ottawa, Canada
- [2] Z. Šofranac i S. Vukanić, "Ograničenja kod merjenja velikih otpornosti", *XLII ETRAN – Zbornik radova, sveska I, s.449–450*, Vrnjačka banja 1998.
- [3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (corrected and reprinted) – *GUM*
- [4] European cooperation for Accreditation: 1999, *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration – EA-4/02*

Abstract – Uncertainty of measurement of the high ohm resistance standards Keithley 5155 ($10^8 \Omega$) and Keithley 5155 ($10^9 \Omega$) by means of adapted bridge have been calculated. The uncertainty analysis of measurement – uncertainty budget is shown.

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT OF HIGH OHM RESISTANCE STANDARD VALUE BY MEANS OF ADAPTED BRIDGE

Zoran Šofranac