

15. Měření malých odporů srovnávací metodou a pomocí převodníku $R \rightarrow U$

15.1. Teoretický rozbor

15.1.1. Sériová srovnávací metoda

Při měření odporů srovnávací sériovou metodou je obvod zapojen podle obr. A. Číslicovým voltmetrem změříme napětí U_{N1} na odporovém etalonu, pak napětí U_X na neznámém rezistoru a znovu napětí U_{N2} na odporovém etalonu. Tímto postupem omezíme chybu způsobenou nestálostí měřicího proudu. Za předpokladu, že použitý číslicový voltmetr má velký odpor $R_{CV} \gg R_{X1}$, bude platit

$$\frac{R_{X1}}{R_N} = \frac{U_X}{U_N} \Rightarrow U_N = \frac{U_{N1} + U_{N2}}{2}, \quad R_{X1} = \frac{U_X}{U_N} R_N$$

Protože měříme malé odpory a tím i malá napětí, je nutné použít *čtyřsvorkové zapojení*, tzn., že napětí měříme na napěťových (potenciálních) svorkách odporového etalonu i neznámého rezistoru. Tím vyloučíme chybu způsobenou úbytkem napětí na proudových svorkách.

Pro vyloučení vlivu termoelektrických napětí, která se mohou projevit jako přídavná chyba (napětí měřené na neznámém rezistoru je řádově srovnatelné) provedeme měření pro obě polarity zdroje proudu a velikost neznámého odporu stanovíme jako aritmetický průměr výsledků obou měření.

15.1.2. Měření malého odporu s pomocí převodníku $R \rightarrow U$

Převodník $R \rightarrow U$ je pro malé odpory realizován zapojením se zdrojem proudu řízeným napětím podle obr. B. Jako zdroj referenčního napětí je v přípravku zabudován stabilizátor MAC 01 s odporovým děličem. Tranzistor KD 337 zapojený za operačním zesilovačem posiluje pro kladnou polaritu koncový stupeň OZ a umožňuje odběr proudu I_2 řádově 10^{-1} A.

Je-li velikost referenčního napětí U_r , platí pro proud I_2 vztah

$$I_2 = \frac{U_r}{R_1}$$

Kromě chyb přístrojů se v celkové chybě měření uplatní také vliv termoelektrických napětí vzniklých na potenciálních svorkách a offset operačního zesilovače. Tyto vlivy nelze v tomto zapojení zjistit, protože to přípravek s převodníkem $R \rightarrow U$ neumožňuje.

Pro malé hodnoty odporu a tím i malé hodnoty napětí je nutné použít opět čtyřsvorkové zapojení, tzn. napětí měřit na napěťových svorkách neznámého rezistoru. Pokud napětí měříme na svorkách proudových, změříme navíc úbytky napětí vzniklé průchodem proudu přechodovými odpory svorek.

15.2. Naměřené a vypočtené hodnoty

15.2.1. Společné hodnoty

- Nejistota měření napětí U_X na číslicovém přístroji M1T 330 s chybou $\delta_1 = \pm 0,01\%$ z údaje a $\delta_2 = \pm 0,01\%$ z rozsahu $M = 300$ mV:

$$u(U_2) = \frac{\frac{\delta_1}{100} U_X + \frac{\delta_2}{100} M}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0,01}{100} U_X + \frac{0,01}{100} \cdot 0,3}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

15.2.2. Sériová srovnávací metoda

- Standardní nejistota měření odporu

$$R_X = \frac{U_X}{U_N} R_N, \quad u^2(R_X) = \left(\frac{\partial R_X}{\partial U_X} u(U_X) \right)^2 + \left(\frac{\partial R_X}{\partial U_N} u(U_N) \right)^2 + \left(\frac{\partial R_X}{\partial R_N} u(R_N) \right)^2$$

$$u(R_X) = \sqrt{\frac{R_N^2}{U_N^2} u^2(U_X) + \frac{U_X^2 R_N^2}{U_N^4} u^2(U_N) + \frac{U_X^2}{U_N^2} u^2(R_N)}$$

- Velikost odporu etalonu $R_N = 0,01 \, \Omega$ s možnou odchylkou až $\delta_{R_N} = 0,01 \, \%$
- První měření:

$$- U_{N1} = (49,75 \pm 0,020) \, \text{mV}$$

$$- U_X = (14,16 \pm 0,018) \, \text{mV}$$

$$- U_{N2} = (49,63 \pm 0,020) \, \text{mV}$$

$$- I = 4,95 \, \text{A}$$

—

$$U_N = \frac{U_{N1} + U_{N2}}{2} \pm \frac{u(U_{N1}) + u(U_{N2})}{2} = \frac{49,75 + 49,63}{2} \pm \frac{0,020 + 0,020}{2} \, \text{mV} = (49,69 \pm 0,020) \, \text{mV}$$

—

$$R_{X1} = \frac{U_X}{U_N} R_N \pm u(R_{X1}) = \frac{14,16}{49,69} 0,01 \pm 0,0040 \, \text{m}\Omega = (2,8497 \pm 0,0040) \, \text{m}\Omega$$

- Měření s opačnou polaritou napětí zdroje U_2 :

$$- U_{N1} = (49,52 \pm 0,020) \, \text{mV}$$

$$- U_X = (14,10 \pm 0,018) \, \text{mV}$$

$$- U_{N2} = (49,47 \pm 0,020) \, \text{mV}$$

$$- I = 4,95 \, \text{A}$$

—

$$U_N = \frac{U_{N1} + U_{N2}}{2} \pm \frac{u(U_{N1}) + u(U_{N2})}{2} = \frac{49,52 + 49,47}{2} \pm \frac{0,020 + 0,020}{2} \, \text{mV} = (49,495 \pm 0,020) \, \text{mV}$$

—

$$R_{X2} = \frac{U_X}{U_N} R_N \pm u(R_{X2}) = \frac{14,10}{49,495} 0,01 \pm 0,0040 \, \text{m}\Omega = (2,8488 \pm 0,0040) \, \text{m}\Omega$$

- Zjištěná hodnota odporu s rozšířenou nejistotou s koeficientem rozšíření $k_r = 2$

$$R_X = \frac{R_{X1} + R_{X2}}{2} \pm k_r \frac{u(R_{X1}) + u(R_{X2})}{2} = \frac{2,8497 + 2,8488}{2} \pm 2 \cdot 0,0040 \, \text{m}\Omega = (2,8493 \pm 0,0080) \, \text{m}\Omega$$

15.2.3. Měření malého odporu s pomocí převodníku $R \rightarrow U$

- Hodnota referenčního napětí $U_r = 5,056 \text{ V}$
- Nejistota U_r s udanou přesností $\delta_{U_r} = 0,7 \%$:

$$u(U_r) = \frac{\delta_{U_r}}{100\sqrt{3}} U_r = \frac{0,7}{100\sqrt{3}} 5,056 \text{ V} = 0,020 \text{ V}$$

- Nejistota odporu $R_1 = 50 \Omega$ s udanou přesností $\delta_{R_1} = 0,2 \%$:

$$u(R_1) = \frac{\delta_{R_1}}{100\sqrt{3}} R_1 = \frac{0,2}{100\sqrt{3}} 50 \Omega = 0,058 \Omega$$

- Proud I_2 procházející R_X zjištěn ze vztahu

$$I_2 = \frac{U_r}{R_1} = \frac{5,056}{50} \text{ A} \doteq 0,101 \text{ A}$$

- Standardní nejistota měření odporu

$$R_X = \frac{U_X}{I_2} = \frac{U_X R_1}{U_r}, \quad u^2(R_X) = \left(\frac{\partial R_X}{\partial U_X} u(U_X) \right)^2 + \left(\frac{\partial R_X}{\partial U_r} u(U_r) \right)^2 + \left(\frac{\partial R_X}{\partial R_1} u(R_1) \right)^2$$

$$u(R_X) = \sqrt{\frac{R_1^2}{U_r^2} u^2(U_X) + \frac{U_X^2 R_1^2}{U_r^4} u^2(U_r) + \frac{U_X^2}{U_r^2} u^2(R_1)}$$

- Napětí na vnitřních (napěťových) svorkách $U_{X_1} = (11,37 \pm 0,018) \text{ mV}$
- Hodnota odporu R_{X_1} s rozšířenou nejistotou s koeficientem rozšíření $k_r = 2$

$$R_{X_1} = \frac{U_{X_1}}{I_2} = \frac{11,37}{0,101} \text{ m}\Omega = (112,44 \pm 1,00) \text{ m}\Omega$$

- Napětí na vnějších (proudových) svorkách $U_{X_2} = (14,48 \pm 0,018) \text{ mV}$
- Hodnota odporu R_{X_2} s rozšířenou nejistotou s koeficientem rozšíření $k_r = 2$

$$R_{X_2} = \frac{U_{X_2}}{I_2} = \frac{14,48}{0,101} \text{ m}\Omega = (144,20 \pm 1,26) \text{ m}\Omega$$

15.3. Závěr

15.3.1. Sériová srovnávací metoda

Pro odpor tyče zjištěný srovnávací metodou byla změřena hodnota $R_X = (2,8493 \pm 0,080) \text{ m}\Omega$. Pro vyloučení vlivu termoelektrických napětí bylo provedeno měření pro obě polarity zdroje proudu, které kvůli nestálosti zdroje bylo změřeno dvakrát.

15.3.2. Měření malého odporu s pomocí převodníku $R \rightarrow U$

Při měření odporu touto metodou byla použita čtyřsvorková metoda. Na proudových svorkách je zjištěná hodnota odporu $R_{X_2} = (144,20 \pm 1,26) \text{ m}\Omega$ a na napěťových $R_{X_1} = (112,44 \pm 1,00) \text{ m}\Omega$. Tak značný rozdíl v obou měřeních způsobil vliv termoelektrických napětí vzniklých na potenciálních svorkách, který se přičítá v případě napětí U_{X_2} . Chyba této metody δ_{met} je

$$\delta_{met} = \frac{U_{X_2} - U_{X_1}}{U_{X_1}} 100 \% = \frac{14,48 - 11,37}{11,37} 100 = 27 \%.$$