

## 5. Měřicí zesilovače

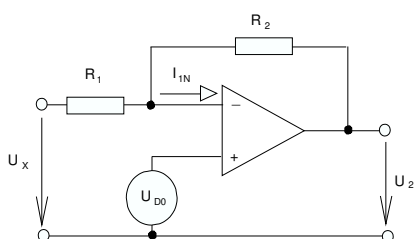
### 5.1. Teoretický rozbor

Výstupní napětí termočlánku je přímo úměrné rozdílu teplot ohřívaného spoje a okolí  $\vartheta_1 - \vartheta_2$ . Toto napětí měříme pomocí číslicového voltmetru a poté pomocí zesilovače s operačním zesilovačem.

Přímé měření s ČV přináší nevýhodu ve velké nestálosti měřeného údaje, dané jednak malým výstupním napětím termočlánku na mezi citlivosti ČV při měření (na spodním konci jeho základního rozsahu), navíc se k těmto malým napětím přičítají i termoelektrická napětí na svorkách ČV, která se dají již řádově srovnávat s měřenými.

K odstranění těchto nepříznivých vlivů použijeme zesilovač s OZ – ovšem, zde zase nepříznivě ovlivňují měření jeho reálné parametry (vstupní klidový proud  $I_{1N}$  a napěťový offset  $U_{DO}$ ), které zkreslují do určité míry výsledek. U invertujícího zapojení se musí navíc přihlídnout k malému vstupnímu odporu.

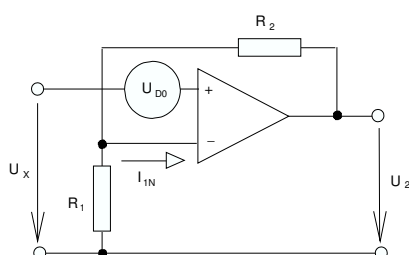
#### 5.1.1. Operační zesilovač v invertujícího zapojení



- Požadované napěťové zesílení  $A_U = -100$
- Pro zvolený odpor  $R_{1I} = 1000 \Omega$  vychází  $R_2$

$$A_U = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = -A_U R_1 = -(-100) \cdot 1000 \Omega = 100 \text{ k}\Omega$$

#### 5.1.2. Operační zesilovač v neinvertujícího zapojení



- Požadované napěťové zesílení  $A_U = 100$
- Pro zvolený odpor  $R_{1N} = 1000 \Omega$  vychází  $R_2$

$$A_U = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = (A_U - 1)R_1 = (100 - 1) \cdot 1000 \Omega = 99 \text{ k}\Omega$$

## 5.2. Naměřené hodnoty

	$U_2$ [mV]	$U_X$ [mV]	$u_B$ ( $k_r = 2$ ) [mV]	Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Přímé měření	1,86	1,86	$\pm 0,0348$	54,4
Invertující zesílení	-193,34	1,9334	$\pm 0,2012$	55,8
Neinvertující zesílení	189,02	1,8902	$\pm 0,1816$	55,0

### 5.2.1. Příklad výpočtu

Teplota např. pro  $U_1 = 1,8902$  mV, je určena z následujícího vztahu, kde konstanta  $K$  je  $K = 54 \cdot 10^{-6}$  V/°C:

$$\vartheta_1 = \frac{U_1}{K} + \vartheta_0 = \frac{1,8902}{54 \cdot 10^{-6}} + 20 = 55,0^\circ\text{C}$$

### 5.3. Výpočet nejistot

- Nejistota pro chybu  $\delta_1 = \pm 0,01\%$  z údaje  $X = 1,86$  mV a  $\delta_2 = \pm 0,01\%$  z rozsahu  $M = 300$  mV:

$$u(U) = \frac{\frac{\delta_1}{100}X + \frac{\delta_2}{100}M}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0,01}{100} \cdot 1,86 \cdot 10^{-3} + \frac{0,01}{100} \cdot 0,300}{\sqrt{3}} \text{ V} = 17,4 \mu\text{V}$$

- Nejistota pro chybu  $\delta_1 = \pm 0,01\%$  z údaje  $X = -193,34$  mV a  $\delta_2 = \pm 0,01\%$  z rozsahu  $M = 300$  mV:

$$u(U_I) = \frac{\frac{\delta_1}{100}X + \frac{\delta_2}{100}M}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0,01}{100} \cdot 193,34 \cdot 10^{-3} + \frac{0,01}{100} \cdot 0,300}{\sqrt{3}} \text{ V} = 28,5 \mu\text{V}$$

- Nejistota pro chybu  $\delta_1 = \pm 0,01\%$  z údaje  $X = 189,02$  mV a  $\delta_2 = \pm 0,01\%$  z rozsahu  $M = 300$  mV:

$$u(U_N) = \frac{\frac{\delta_1}{100}X + \frac{\delta_2}{100}M}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0,01}{100} \cdot 189,02 \cdot 10^{-3} + \frac{0,01}{100} \cdot 0,300}{\sqrt{3}} \text{ V} = 28,2 \mu\text{V}$$

- Nejistota použitých rezistorů s tolerancí  $\delta_R = 0,2\%$ :

–  $R_{1_I} = 1000 \Omega$

$$u(R_{1_I}) = \frac{\delta_R \cdot R_{1_I}}{100\sqrt{3}} = \frac{0,2 \cdot 1000}{100 \cdot \sqrt{3}} \Omega = 1,2 \Omega$$

–  $R_{2_I} = 10000 \Omega$

$$u(R_{2_I}) = \frac{\delta_R \cdot R_{2_I}}{100\sqrt{3}} = \frac{0,2 \cdot 10000}{100 \cdot \sqrt{3}} \Omega = 11,5 \Omega$$

–  $R_{2_N} = 99000 \Omega$

$$u(R_{2_N}) = \frac{\delta_R \cdot R_{2_N}}{100\sqrt{3}} = \frac{0,2 \cdot 99000}{100 \cdot \sqrt{3}} \Omega = 114 \Omega$$

- Standardní  $u(U_{X I_{id}})$  nejistota pro ideální invertující operační zesilovač:

$$U_{X I_{id}} = -\frac{R_1}{R_2}U_2, \quad u^2(U_{X I_{id}}) = \left(\frac{\partial U_X}{\partial R_{1_I}}u(R_{1_I})\right)^2 + \left(\frac{\partial U_X}{\partial U_2}u(U_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial U_X}{\partial R_{2_I}}u(R_{2_I})\right)^2$$

$$\begin{aligned}
u(U_{XI_{id}}) &= \sqrt{\left(\frac{-U_2}{R_{2_I}}u(R_{1_I})\right)^2 + \left(\frac{-R_{1_I}}{R_2}u(U_2)\right)^2 + \left(\frac{-U_2 R_{1_I}}{R_{2_I}^2}u(R_{2_I})\right)^2} = \\
&= \sqrt{\left(\frac{-193,34}{10^4}1,2\right)^2 + \left(\frac{10^3}{10^4}0,285 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(\frac{-193,34 \cdot 10^3}{(10^4)^2}11,5\right)^2} \text{ mV} = \\
&= \sqrt{(-23,2 \cdot 10^{-6})^2 + (0,00285 \cdot 10^{-6})^2 + (22,23 \cdot 10^{-6})^2} \text{ V} = 32,13 \mu\text{V}
\end{aligned}$$

- Rozšířená nejistota  $u_B(U_{XI})$  pro skutečný operační zesilovač OP 07 v invert. zapojení, katalogová hodnota vstupního klidového proudu je  $I_{1N} = 7 \cdot 10^{-9}$  A a napěťový offset  $U_{D0} = 150 \cdot 10^{-6}$  V:

$$U_{XI} = -\frac{R_1}{R_2}U_2 \mp I_{1N}R_{1_I} \pm U_{D0} \left(1 + \frac{R_{1_I}}{R_{2_I}}\right)$$

$$\begin{aligned}
u(U_{XI}) &= \sqrt{u^2(U_{XI_{id}}) + \left(\frac{I_{1N}R_{1_I}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{D0} \left(1 + \frac{R_{1_I}}{R_{2_I}}\right)}{\sqrt{3}}\right)^2} = \\
&= \sqrt{(32,13 \cdot 10^{-6})^2 + \left(\frac{7 \cdot 10^{-9} \cdot 1000}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{150 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{1000}{10000}\right)}{\sqrt{3}}\right)^2} \text{ V} = \\
&= \sqrt{(32,13 \cdot 10^{-6})^2 + (0,00404 \cdot 10^{-6})^2 + (95,26 \cdot 10^{-6})^2} \text{ V} = 100,6 \mu\text{V}
\end{aligned}$$

$$u_B(U_{XI}) = k_r u(U_{XI}) = 2 \cdot 100,6 \cdot 10^{-6} = 201,2 \mu\text{V} \quad (k_r = 2)$$

- Standardní nejistota  $u(U_{XN_{id}})$  pro ideální neinvertující zesilovač:

$$U_{XN_{id}} = \frac{R_{1_N}}{R_{1_N} + R_{2_N}}U_2, \quad u^2(U_{XN_{id}}) = \left(\frac{\partial U_X}{\partial R_{2_N}}u(R_{2_N})\right)^2 + \left(\frac{\partial U_X}{\partial U_2}u(U_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial U_X}{\partial R_{1_N}}u(R_{1_N})\right)^2$$

$$\begin{aligned}
u(U_{XN_{id}}) &= \sqrt{\left(\frac{U_2 R_{2_N}}{(R_{1_N} + R_{2_N})^2}u(R_{1_N})\right)^2 + \left(\frac{R_{1_N}}{R_{1_N} + R_{2_N}}u(U_2)\right)^2 + \left(\frac{U_2 R_{1_N}}{(R_{1_N} + R_{2_N})^2}u(R_{2_N})\right)^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{189,02 \cdot 10^{-3} \cdot 99 \cdot 10^3}{(10^3 + 99 \cdot 10^3)^2}114\right)^2 + \left(\frac{10^3}{10^3 + 99 \cdot 10^3}0,282 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(\frac{189,02 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3}{(10^3 + 99 \cdot 10^3)^2}1,2\right)^2} \text{ mV} \\
&= \sqrt{(269,47 \cdot 10^{-6})^2 + (0,13 \cdot 10^{-6})^2 + (2,268 \cdot 10^{-6})^2} = 27,9 \mu\text{V}
\end{aligned}$$

- Rozšířená nejistota  $u_B(U_{XN})$  s koeficientem rozšíření  $k_r = 2$  pro skutečný operační zesilovač OP 07 v neinvert. zapojení:

$$\begin{aligned}
 u(U_{XN}) &= \sqrt{u(U_{id_X})^2 + \left(\frac{I_{1N} \frac{R_{1N} R_{2N}}{R_{1N} + R_{2N}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{D0}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \\
 &= \sqrt{(27,9 \cdot 10^{-6})^2 + \left(\frac{7 \cdot 10^{-9} \frac{1000 \cdot 99000}{1000 + 99000}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{150 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}}\right)^2} \text{ V} = \\
 &= \sqrt{(26,95 \cdot 10^{-6})^2 + (4,00 \cdot 10^{-6})^2 + (86,60 \cdot 10^{-6})^2} = 90,79 \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

$$u_B(U_{XN}) = k_r u(U_{XN}) = 2 \cdot 90,79 \cdot 10^{-6} \text{ V} = 181,6 \mu\text{V} \quad (k_r = 2)$$

#### 5.4. Vstupní napěťová nesymetrie

Při vstupním napětí neinvertujícího zesilovače 0 V bylo změřeno výstupní napětí  $U_{2off} = -2,91 \text{ mV}$ , hodnota vstupní napěťové nesymetrie je:

$$U_{off} = \frac{U_{2off}}{\frac{R_2 + R_1}{R_1}} = \frac{-2,91 \cdot 10^{-3}}{\frac{99000 + 1000}{1000}} = -29,1 \mu\text{V}$$

#### 5.5. Závěr

Použitím operačního zesilovače pro zesílení malého napětí, jsme nedosáhli většího zpřesnění měření. Toto měření je totiž navíc zatíženo nepřesností hodnot použitých rezistorů a napěťovou nesymetrií na vstupu  $U_{DO}$ , jejíž velikost, udávaná v katalogu, dosahuje okolo 10% velikosti vstupního měřeného napětí.

Při měření malých napětí na velkém rozsahu voltmetru je výsledek měření také zatížen značnou nejistotou a ovlivňují jej také termoelektrická napětí, která vznikají na kovových spojích o různé teplotě. A jsou tím větší, čím více konektory a přepínači signál prochází.

Díky operačnímu zesilovači, jehož vstup je zapojen přímo na termočlánek se měřená hodnota zesílí známým zesílením a tím se částečně eliminují rušivé vlivy na cestě k měřicímu přístroji a také se zpřesní výsledek změřený voltmetrem. Bohužel nadále zůstává problém s napěťovou nesymetrií na vstupu. Při porovnání katalogové hodnoty  $U_{D0} = 150 \mu\text{V}$  a námi naměřené  $U_{off} = 29,1 \mu\text{V}$ , vychází skutečná hodnota pětikrát menší než udává výrobce.