

## 4. MĚŘENÍ MALÝCH STEJNOSMĚRNÝCH NAPĚTÍ

Autor: Jakub Kraus

Měřeno: 24.10.2024

Spolupracoval: Viktor Procházka

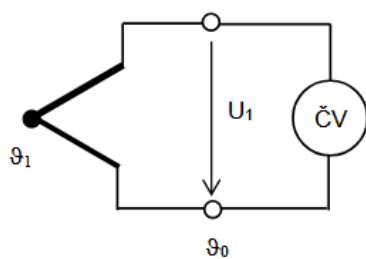
### Úplné zadání úlohy:

- 4.3.1. Změřte napětí termočláнку předloženým číslicovým voltmetrem pro jednu polohu přepínače termostatu.
- 4.3.2. Zapojte invertující zesilovač napětí s běžným OZ (OP 07) a použijte jej pro zesílení napětí termočláunku. Napětí na výstupu zesilovače změřte stejným číslicovým voltmetrem pro stejnou polohu přepínače termostatu jako v bodě 4.3.1. Korigujte chybu metody způsobenou konečným vstupním odporem zesilovače.
- 4.3.3. Proveďte totéž měření s OZ s malou vstupní napěťovou nesymetrií (ICL 7650)
- 4.3.4. U obou zesilovačů ověřte, zda je skutečná vstupní napěťová nesymetrie použitých operačních zesilovačů menší než maximální (případně typická) hodnota udaná výrobcem.
- 4.3.5. Určete rozšířenou nejistotu měření napětí termočláunku (koeficient rozšíření  $k_r = 2$ ) jak pro přímé měření číslicovým voltmetrem, tak pro měření napětí termočláunku po zesílení invertujícím zesilovačem napětí OP 07, viz bod 4.2.3 domácí přípravy.

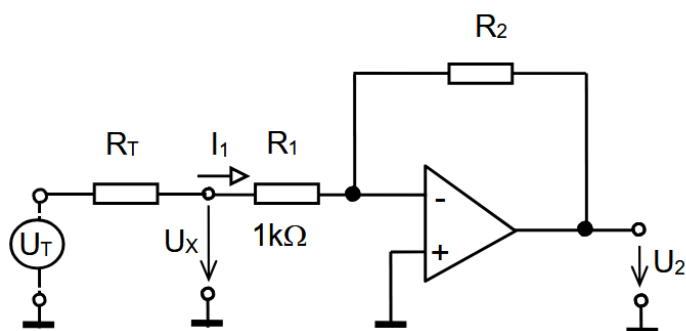
Při určení celkové nejistoty typu B měření zesíleného napětí termočláunku uvažujte i nejistotu způsobenou vstupní napěťovou nesymetrií operačního zesilovače. Nejistoty způsobené vstupními klidovými proudy zesilovače zanedbejte.

- 4.3.6. Pro polohu přepínače termostatu použitou při měřeních dle bodů 4.3.1 určete teplotu teplého konce termočláunku (teplotu měřenou termočláunkem), je-li konstanta použitého termočláunku  $K = 54 \text{ uV/}^\circ\text{C}$ . Předpokládejte, že teplota srovnávacích (studených) konců termočláunku je  $20^\circ\text{C}$  (teplota laboratoře).

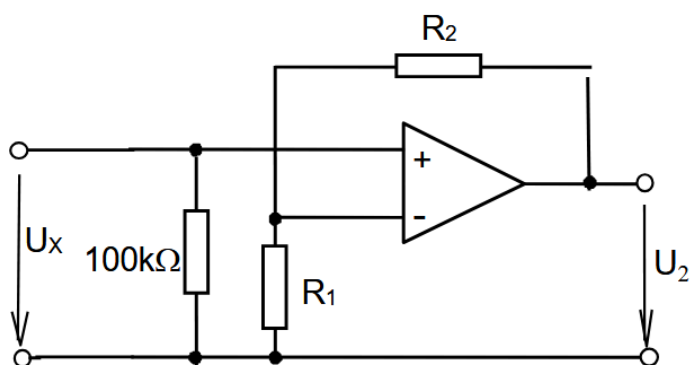
## Schémata zapojení



Obr. 4.2. Přímé měření napětí termočládku číslicovým voltmetrem



Obr. 4.3. Invertující zesilovač pro zesílení napětí termočládku



Obr. 4.4. Neinvertující zesilovač se vstupním odporem  $100\text{ k}\Omega$

## **Seznam použitých přístrojů**

### **Multimetr Keysight U1241C**

- přesnost  $0.09\% \pm 2$  digity pro stejnosměrné napětí. Pro rozsah 1V rozlišení 0.1mV

### **Přípravek s OZ OP 07**

- napěťový offset max. 150uV
- klidový proud max. 7nA

### **Přípravek s OZ ICL 7650**

- napěťový offset max. 8uV
- klidový proud max. 5pA

### **Odpory**

- 1K 0.1%
- 100K 0.1%

### **Přípravek s termostatem a termočlánkem**

- vnitřní odpor termočlánku 2R

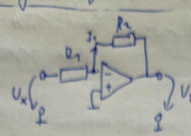
# Domácí příprava

4. Měření malých elektrických napětí

4.2.1. ✓

4.2.2.

pro 4.3.:



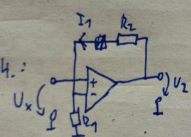
$$I_1 = \frac{U_x}{R_1}$$

$$U_2 = I_1 \cdot R_2$$

$$U_2 = \frac{U_x \cdot R_2}{R_1}$$

$$P = \frac{U_2}{U_x} = \frac{R_2}{R_1}$$

pro 4.4.:



$$I_1 = \frac{U_x}{R_1}$$

$$U_2 = U_x + R_2 I_1$$

$$U_2 = \cancel{R_2 I_1} + R_1 I_1 + R_2 I_1 = I_1 (R_1 + R_2)$$

$$U_2 = U_x + R_2 \frac{U_x}{R_1}$$

$$U_2 = U_x \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$P = \frac{U_2}{U_x} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

pro 4.5.:

$$P = 100$$

$$100 = \frac{x}{1k\Omega}$$

$$R_2 = x = 100k\Omega$$

pro 4.6.:

$$P = 100$$

$$100 = \frac{R_2}{1k\Omega}$$

$$R_2 = 100k\Omega$$

pro 4.7.:

$$P = 100$$

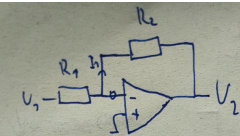
$$100 = \frac{R_2}{1k\Omega}$$

$$R_2 = 100k\Omega$$

pro 4.8.:

$$P = 100$$

$$100 = \frac{R_2}{1k\Omega}$$

$$R_2 = 100k\Omega$$


$$I_1 = \frac{U_1 \pm U_K}{R_1}$$

$$U_2 = I_1 \cdot R_2$$

$$U_2 = \frac{U_1 \pm U_K}{R_1} \cdot R_2$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1 \pm \frac{R_2}{R_1} U_K$$

$$U_2 \cdot \frac{R_1}{R_2} = U_1 \pm U_K$$

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \pm U_K$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial R_2} = -\frac{U_2}{R_2^2}$$

$$U_{U_1} = \sqrt{\left( \frac{R_1}{R_2} U_{U_2} \right)^2 + \left( \frac{U_2}{R_2} U_{R_1} \right)^2 + \left( \frac{R_1 U_2}{R_2^2} U_{R_2} \right)^2 + (\pm U_K)^2}$$

## Naměřené hodnoty

### 4.3.1

2.4mV

### 4.3.2

-256.8mV

(nesymetrie -7.3mV  $\rightarrow$  -72uV)

### 4.3.3

-249.2mV

(nesymetrie -0.9mV  $\rightarrow$  -8.9uV)

# Zpracování

## 4.3.1

2.4mV

## 4.3.2 OP 07

- Korekce chyby metody způsobená konečným vstupním odporem zesilovače proběhla korekcí  $R_1$  z  $1k\Omega$  na  $1.002k\Omega$

Pro OP 07:

$$U_1 \doteq U_2 \times \frac{R_1}{R_2} \doteq 2573.1\text{uV}$$

## 4.3.3 ICL 7650:

$$U_1 \doteq U_2 \times \frac{R_1}{R_2} \doteq 2496.9\text{uV}$$

## 4.3.5 Nejistoty pro přímé měření

$$U_1 = 2.4\text{mV}$$

$$u_{U_1} \doteq \frac{2.4 \times 10^{-3} \times 0.09\% + 2 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \doteq 0.12\text{uV}$$

$$U_1 \doteq (2.40 \pm 0.24)\text{mV} \quad (k_r = 2)$$

## 4.3.5 Nejistoty s OZ OP 07

$$u_{R_1} = \frac{1k\Omega \times 0.1\%}{\sqrt{3}} \doteq 0.577\Omega$$

$$u_{R_2} = \frac{100k\Omega \times 0.1\%}{\sqrt{3}} \doteq 57.7\Omega$$

$$u_{U_1} = \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_2} \times u_{U_2}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{R_2} \times u_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{R_1 U_2}{R_2^2} \times u_{R_2}\right)^2 + \frac{U_K^2}{3}}$$

- Naměřeno  $U_2 = 256.8\text{mV}$
- Nesymetrie naměřena  $-7.3\text{mv}$  (tj.  $-72\text{uV}$ )

$$u_{U_2} \doteq \frac{0.2568 \times 0.09\% + 2 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \doteq 249\text{uV}$$

$$u_{U_1} \doteq \sqrt{\left(\frac{1.002}{100} \times 249 \times 10^{-6}\right)^2 + \left(\frac{0.2568}{10^5} \times 0.577\right)^2 + \left(\frac{1002 \times 0.2568}{(10^5)^2} \times 57.7\right)^2 + \left(\frac{72 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}}\right)^2} \doteq 41.7\text{uV}$$

$$U_1 \doteq (2573 \pm 83)\text{uV} \quad (k_r = 2)$$

## 4.3.5 Nejistoty s OZ ICL 7650

$$u_{U_1} = \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_2} \times u_{U_2}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{R_2} \times u_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{R_1 U_2}{R_2^2} \times u_{R_2}\right)^2 + \frac{U_K^2}{3}}$$

- Naměřeno  $U_2 = 249.2\text{mV}$
- Nesymetrie naměřena  $-0.9\text{mv}$  (tj.  $-8.9\text{uV}$ )

$$u_{U_2} \doteq \frac{0.2492 \times 0.09\% + 2 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \doteq 245\text{uV}$$

$$u_{U_1} \doteq \sqrt{\left(\frac{1.002}{100} \times 245 \times 10^{-6}\right)^2 + \left(\frac{0.2568}{10^5} \times 0.577\right)^2 + \left(\frac{1002 \times 0.2568}{(10^5)^2} \times 57.7\right)^2 + \left(\frac{8.9 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}}\right)^2} \doteq 6.12\text{uV}$$

$$U_1 \doteq (2496 \pm 12)\text{uV} \quad (k_r = 2)$$

## 4.3.6

$$t = 2496\text{uV} \div \frac{54\text{uV}}{^\circ\text{C}} + 20^\circ\text{C} \doteq 86^\circ\text{C}$$