3.1. Úvod

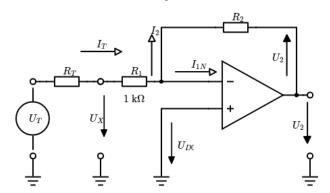
Typickým případem, kdy je třeba měřit malé stejnosměrné napětí, je měření teploty termočlánkem. Termočlánky patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v průmyslu. Fungují v širokém rozsahu teplot od kryogenních (- 270 °C) po velmi vysoké (2500 °C).

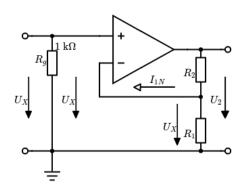
Jejich citlivost je 10 až 80 μ V/K. Jsou velmi robustní a spolehlivé a při vhodné konstrukci mohou být i velmi rychlé (časová konstanta v řádu ms). V praxi se používá mnoho typů termočlánků, velmi běžný je např. typ "K" s citlivostí 41μ V/K. Výstupem z termočlánku je malé stejnosměrné napětí (desítky μ V až desítky mV), které je potřeba přesně změřit.

Malé napětí se často nejprve zesiluje, např. aby se zlepšila přesnost měření tohoto napětí multimetrem, popř. odpovídalo rozsahu AČ převodníku. To se musí provést zesilovačem s nízkou vstupní napěťovou nesymetrií (offsetem), která může přesnost měření značně ovlivnit.

3.2. Domácí příprava

3.2.1. Vypočtěte hodnotu odporu použitých rezistorů pro zapojení dle obr. 3.2 a 3.3 tak, aby zesílení zesilovače bylo 100.





$$U_{X(in)} = I_2 \cdot R_1 = -\frac{R_1}{R_2} U_2 \wedge U_2 = 100 \cdot U_{X(in)} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 100 \xrightarrow{R_1 = 1 \text{ k}\Omega} R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$U_{X(ni)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_2 \wedge U_2 = 100 \cdot U_{X(in)} \Rightarrow \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 100 \Rightarrow R_2 = 99 R_1$$

3.2.2. Odvoď te vztah pro určení standardní nejistoty měření napětí termočlánku při použití invertujícího zesilovače. Uvažujte i nejistotu způsobenou vstupní napěťovou nesymetrií operačního zesilovače.

$$\begin{split} U_X &= \tfrac{-R_1}{R_2} U_2 \mp (I_{IN} R_1 \sim 0) \pm U_{D0} (1 + \tfrac{R_1}{R_2}) \wedge u_{f(x_1, \dots, x_n)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\tfrac{\partial f}{\partial x_i} (X_i) \cdot u_{x_i})^2} \\ u_{U_X(id)} &= \sqrt{(\tfrac{-R_1}{R_2} u_{U_2})^2 + (\tfrac{-U_2}{R_2} u_{R_1})^2 + (\tfrac{R_1 U_2}{R_2^2} u_{R_2})^2} \xrightarrow{U_{D0}} u_X = \sqrt{u_{U_X(id)}^2 + (\tfrac{U_{D0}}{\sqrt{3}} (1 + \tfrac{R_1}{R_2}))^2} \\ U_{D0} &= \tfrac{R_1}{R_1 + R_2} U_{2,D0} \Rightarrow u_X = \sqrt{u_{U_X(id)}^2 + (\tfrac{R_1}{R_1 + R_2} U_{2,D0}} (1 + \tfrac{R_1}{R_2}))^2} = \sqrt{u_{U_X(id)}^2 + (\tfrac{R_1}{R_2} \sqrt{3} U_{2,D0})^2} \end{split}$$

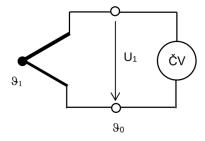
3.2.3. Odvoď te vztah pro korekci chyby metody způsobené konečným vstupním odporem invertujícího zesilovače a odporem termočlánku (viz obr. 3.2).

vznikne napěťový dělič s odpory R_1 a R_T : $U_X = \frac{R_1}{R_1 + R_T} U_T \Rightarrow U_T = K \cdot U_X = \frac{R_1 + R_T}{R_1} U_X$ velikost napětí U_T se bez této korekce bude při měření jevit menší nežli skutečná hodnota

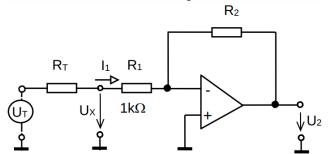
3.3. Úkol měření

- **3.3.1.** Změřte napětí termočlánku předloženým číslicovým voltmetrem pro jednu polohu přepínače termostatu.
- **3.3.2.** Použijte invertující zesilovač napětí pro zesílení napětí termočlánku, napětí na výstupu zesilovače změřte stejným číslicovým voltmetrem a pro stejnou polohu přepínače termostatu jako v bodě 3.3.1. Korigujte chybu metody způsobenou konečným vstupním odporem zesilovače, viz 3.2.3 domácí přípravy.
- 3.3.3. Určete rozšířenou nejistotu měření napětí termočlánku (koeficient rozšíření kr = 2) jak pro přímé měření číslicovým voltmetrem, tak pro měření napětí termočlánku po zesílení invertujícím zesilovačem napětí.
 Při určení celkové nejistoty typu B měření zesíleného napětí termočlánku uvažujte i nejistotu způsobenou vstupní napěťovou nesymetrií operačního zesilovače. Nejistoty způsobené vstupními klidovými proudy zesilovače zanedbejte, viz domácí příprava 3.2.2.
- **3.3.4.** Použijte neinvertující zesilovač napětí pro zesílení napětí termočlánku, napětí na výstupu zesilovače změřte stejným číslicovým voltmetrem a pro stejnou polohu přepínače termostatu jako v bodě 3.3.1.
- **3.3.5.** Pro polohu přepínače termostatu použitou při měřeních dle bodů 3.3.1 a 3.3.2 určete teplotu teplého konce termočlánku (teplotu měřenou termočlánkem), je-li konstanta použitého termočlánku K = $54 \ \mu\text{V}/\text{°C}$. Předpokládejte, že teplota srovnávacích (studených) konců termočlánku je 20 °C (teplota laboratoře).
- **3.3.6.** Ověřte, zda je skutečná vstupní napěťová nesymetrie použitého operačního zesilovače menší než maximální (případně typická) hodnota udaná výrobcem.

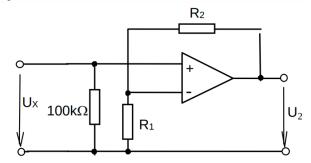
3.4. Schéma zapojení



Obr. 3.1. Přímé měření napětí termočlánku číslicovým voltmetrem



Obr. 3.2. Invertující zesilovač pro zesílení napětí termočlánku



Obr. 3.3. Neinvertující zesilovač se vstupním odporem 100 k Ω

3.5. Poznámky k měření

- **3.5.1.** Měřte až po dosažení tepelného ustálení obvodu, které indikuje zánik monotónních změn údaje číslicového voltmetru (ustálení údaje až na případný vliv šumu).
- 3.5.2. Tolerance použitých rezistorů a vnitřní odpor termočlánku jsou uvedeny na přípravcích.
- **3.5.3.** Operační zesilovač umožňuje kompenzaci vstupní napěťové nesymetrie a vstupních klidových proudů zesilovače pomocí nastavitelného rezistoru (odporového trimru). V praxi se ale tato kompenzace zpravidla nepoužívá a ani v přípravku není zapojena.
- **3.5.4.** Výpočet teploty teplého konce termočlánku ze změřeného napětí termočlánku se provede podle přibližného vztahu

$$\vartheta_1 = \frac{U_1}{K} + \vartheta_0$$

kde $K=54\cdot 10^{-6} V/^{\circ} C$. Teplotu okolí předpokládáme $\vartheta_0=20^{\circ} C$.

3.5.5. Vstupní napěťovou nesymetrii invertujícího zesilovače zjistíme změřením výstupního napětí tohoto zesilovače při zkratovaném vstupu a vydělením tohoto napětí zesílením zesilovače pro napěťovou nesymetrii, které je v našem případě rovno 101 (pro odpory $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ a při uvážení skutečnosti, že napětí napěťové nesymetrie je zesilováno neinvertujícím zesilovačem).

Tab. 3.1. Základní parametry některých vybraných operačních zesilovačů

Typ OZ Vlastnost	ICL 7650	741	LT 1097	OP 07	LM 155
napěťový offset typ./max. (μV)	0,7	1500/5000	10/60	60/150	1000
jeho teplotní drift (μV/°C)	0,02	10	0,3	0,5	5
vstupní klidový proud typ./max. (pA)	5	50000	350	1800/7000	50
CMRR (dB)	120	90	130	110	100
rychlost přeběhu (V/μs)	2,5	0,5	0,2	0,3	5

Pozn.: ICL 7650 automaticky nulovaný operační zesilovač

741 levný zastaralý bipolární OZ

LT 1097 přesný OZ

OP 07 kvalitní OZ, uvedené parametry odpovídají levné verzi (průmyslový standard)

LM 155 levný OZ typu BIFET (s unipolárními tranzistory na vstupu)

3.6. Seznam použitých přístrojů a obvodvých prvků

přístroj/prvek	specifikace
multitmetr	DC voltage: $M = 200 \text{ mV}$, $Z_{IN} = 10 \text{ M}\Omega$:
Mastech MY64	$R_{\Delta} = 0.1 \text{ mV}, \text{ Ac} = \pm (0.5\% \text{ of rdg} + 1 \text{ digits})$
rezistor	$R = 100 \text{ k}\Omega, \text{ Ac: } \pm 0.1\%$
rezistor	$R = 1 \text{ k}\Omega, \text{ Ac: } \pm 0.1\%, I_{max} = 20 \text{ mA}$
odporová dekáda	$R_{\Delta}=100 \text{ k}\Omega, \text{ Ac: } \pm 0.2\%$
termočlánek	$R_T=2 \Omega, K = 54 \mu V/^{\circ}C$

3.3.1.

Voltmertem MY64 byla naměřena hodnota $U_T = -1.2$ mV, po výpočtu chyby ze vzorce $u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} (\frac{\delta_1}{100} X + N \cdot R_{\Delta})$, $\delta_1 =$ chyba z odečtené hodnoty, X = naměřená hodnota, $R_{\Delta} =$ kvantizační krok, N- počet digitů, vychází nepřesný výsledek:

$$U_T = (-1.2 \mp 0.06) \text{mV} = -1.2 \text{ mV} \mp 5\%$$

 $U_{T.k_r=2} = (-1.2 \mp 0.1) \text{mV} = -1.2 \text{ mV} \mp 10\%$

tento výsledek je ještě zatížen chybou metody, způsobenou odporem termočlánku, platí pak $U_T = \frac{Z_V + Z_T}{Z_V} U_V = \frac{10^7 + 2}{10^7} U_V = (1 + \frac{1}{5 \cdot 10^6}) U_V$, což se ale pro malou přesnost měření do výsledku nepromítne

3.3.2.

voltmertem MY64 byla naměřena hodnota $U_2=121.5$ mV, po dosazení do vzorce s korekcí: $U_T=\frac{R_1+R_T}{R_1}U_X=\frac{R_1+R_T}{R_1}\frac{-R_1}{R_2}U_2=-\frac{R_1+R_T}{R_2}U_2\xrightarrow{R_1=10^3,R_2=10^5,R_T=2}-0.01002U_2$ vychází napětí termočlánku $U_T=-1.21743$ mV, korekční faktor $K=1+\frac{R_T}{R_1}=1.002$ bude možné pro jeho malý vliv na změnu hodnoty U_T při určování chyby zanedbat, a tak za chybu u_{U_T} budeme považovat chybu $u_{U_X}=\sqrt{u_{U_X(id)}^2+(\frac{R_1}{R_2\sqrt{3}}U_{2,D0})^2},$ kde $U_{2,D0}=14.9$ mV je zesílený offset naměřen na výstupu operačního zesilovače

$$\begin{split} u_{U_X} &= \sqrt{(\frac{-R_1}{R_2}u_{U_2})^2 + (\frac{-U_2}{R_2}u_{R_1})^2 + (\frac{R_1U_2}{R_2^2}u_{R_2})^2 + (\frac{R_1}{R_2\sqrt{3}}U_{2,D0})^2} \\ u_{U_2} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\frac{\delta_1}{100}X + N \cdot R_\Delta) = \frac{1}{\sqrt{3}}(\frac{0.5}{100}121.5 + 1 \cdot 0.1) \text{ mV} = 0.40848 \text{ mV} \\ u_{R_1} &= \frac{\Delta_{R_1}}{\sqrt{3}} = \frac{\delta_{R_1}}{100\sqrt{3}}R_1 = \frac{0.1}{100\sqrt{3}}10^3 \ \Omega = 0.57735 \ \Omega \\ u_{R_2} &= \frac{\Delta_{R_2}}{\sqrt{3}} = \frac{\delta_{R_2}}{100\sqrt{3}}R_2 = \frac{0.1}{100\sqrt{3}}10^5 \ \Omega = 57.73501 \ \Omega \\ u_{U_X} &= \sqrt{(\frac{-1}{100}u_{U_2})^2 + (\frac{-121.5 \text{ mV}}{10^5 \ \Omega}u_{R_1})^2 + (\frac{121.5 \text{ mV}}{10^7 \ \Omega}u_{R_2})^2 + (\frac{1}{100\sqrt{3}}U_{2,D0})^2} = 0.0861 \text{ mV} \\ U_T &= (-1.217 \mp 0.086) \text{mV} = -1.217 \text{ mV} \mp 7\% \\ U_{T,k_r=2} &= (-1.22 \mp 0.17) \text{mV} = -1.22 \text{ mV} \mp 14\% \end{split}$$

3.3.4.

hodnota U_2 by měla být zesílena $100\times$, tudíž by $U_2\approx -120$ mV, ale pro nastavení odporové dekády na hodnotu $R_2=99$ k Ω ($R_1=1$ k $\Omega\Rightarrow A=\frac{R_1+R_2}{R_1}=100$) bylo naměřeno $U_2=-145.8$ mV, tedy hodnota nižší nežli předpoklad, po přetočení dekády na $R_2=82,3$ k Ω bylo naměřeno $U_2=-121.4$ mV, které by odhadu vyhovovalo, to je pravděpodobně způsobeno vlivem offsetu (v řádu μ V-mV) operačního zesilovače, který pro malá napětí značně znepřesní měření

3.3.5.

$$\vartheta_T = \frac{U_T}{K} + \vartheta_0 = \frac{1.217 \text{ mV}}{54 \mu\text{V/°C}} + 20 \text{ °C} = 42,5 \text{ °C}$$
$$u_{\vartheta_T,k_r=2} = 2\frac{\partial \vartheta_T}{\partial U_T} u_{U_T} = 2\frac{u_{U_T}}{K} = 2\frac{0.086 \text{ mV}}{54 \mu\text{V/°C}} = 3 \text{ °C}$$

i když vezmeme v potaz jen nepřesnost měření napětí u_{U_T} , přenesená nejistota určení teploty teplého konce termočlánku bude v řádů celých stupňů Celsia, tudíž z pohledu přesnosti není vhodný výpočet z napětí měřeného běžným multimetrem

3.3.6.

naměřili jsme (se zesílením) hodnotu napěťového offsetu $U_{2,D0}=14.9~\text{mV}$, ze vzorce $U_{D0}=\frac{R_1}{R_1+R_2}U_{2,D0}=\frac{U_{2,D0}}{101}$ dostáváme skutečný offset $U_{D0}=148~\mu\text{V}$, operační zesilovač nebyl popsán a tak dle naměřené hodnoty odhadujeme, že se jednalo o typ OP 07, který má typickou/maximální hodnotu offsetu $60/150~\mu\text{V}$, k jehož maximální hodnotě offsetu se právě blíží námi zjišťená hodnota

3.7. Závěrečné vyhodnocení

pro měření malých proudů není vhodné použít neinvertující zapojení operačního zesilovače; při použití rezistorů je třeba dbát na jejich nejistotu, zvlášť u těch s velkým odporem; pro toto měření by bylo lepší použít přesnější voltmetr/multimetr (pro nedostatek času se nepodařilo přeměření přesnějším měřícím přístrojem); napěťová asymetrie není zanedbatelná, lze ji ale zjistit z parametrů použitého zesilovače; pro velké vstupní odpory je korekce chyby opomenutelná