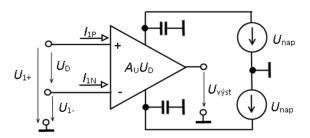
4. MĚŘENÍ MALÝCH STEJNOSMĚRNÝCH NAPĚTÍ

4.1. **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 41 μ V/K. Výstupem z termočlánku je malé 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.

K tomu lze použít jedno ze dvou základních zapojení s operačním zesilovačem (OZ) uvedených na obr. 4.3 a 4.4.

V zapojení dle obr. 4.3 v případě ideálního OZ (obr. 4.1) předpokládáme, že vstupní klidové proudy $I_{\rm IP} = I_{\rm IN} = 0$ a pak tedy platí, že proud I protékající odporem R_1 je roven záporně vzatému proudu protékajícího odporem R_2 . Vzhledem k další vlastnosti ideálního OZ, kdy $A_{\rm U} \rightarrow \infty$ a tedy pro konečné výstupní napětí musí platit, že rozdílové napětí $U_{\rm D} \rightarrow 0$, je invertující vstup na stejném napětí jako vstup neinvertující a pro úbytek napětí na odporu R_2 a tedy i napětí na výstupu OZ bude platit $U_2 = R_2 I_2 = -R_2 U_1/R_1$ (popř. pro vztah pro měřené napětí $U_1 = -U_2 R_1/R_2$). Vstupní odpor tohoto zesilovače je roven odporu R_1 .



Obr. 4.1. Ideální operační zesilovač

Pro neinvertující zapojení dle obr. 4.3 z výše uvedených předpokladů pro ideální OZ platí, že úbytek napětí na odporu R_1 je roven vstupnímu napětí U_X . Odpory R_1 a R_2 tvoří odporový dělič a pro měřené napětí bude tedy platit $U_X = U_{R1} = U_2 R_1/(R_1 + R_2)$.

Vstupní odpor neinverujícího zesilovače se pro ideální OZ blíží k nekonečnu a v zapojení dle obr. 4.4 je definován odporem 100 kΩ zapojeným paralelně ke vstupu zesilovače.

Vzhledem k tomu, že se jedná a nepřímé měření (měřené napětí se vypočte dle výše uvedených vztahů ze změřeného výstupního napětí a odporů), vztah pro určení nejistoty v případě ideálního OZ se odvodí dle zákona o šíření nejistot.

Při měření malých stejnosměrných napětí (řádově jednotky mV) s použitím reálného OZ se ale negativně projevuje jeho nenulová vstupní napěťová nesymetrie $U_{\rm D}$. Díky této vstupní napěťové nesymetrii vzniká další složka nejistoty měření vstupního napětí, která se k nejistotě odvozené pro ideální OZ přičte v kvadrátě pod odmocninou.

Proto pro měření malých stejnosměrných napětí je nutné použít OZ s nízkou vstupní napěťovou nesymetrií (offsetem).

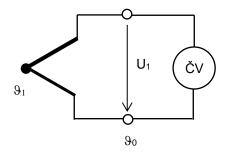
4.2. Domácí příprava

- 4.2.1. Prostudujte si teoretický úvod
- 4.2.2. Vypočtěte hodnotu odporu použitých rezistorů pro zapojení dle obr. 4.3 a 4.4. pro napěťové zesílení $A_U = 100$.
- 4.2.3. Odvoďte vztah pro určení standardní nejistoty měření napětí termočlánku při použití invertujícího zesilovače. Uvažujte i nejistotu způsobenou vstupní napěťovou nesymetrií operačního zesilovače.

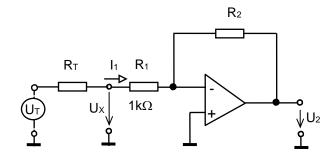
4.3. Úkol měření

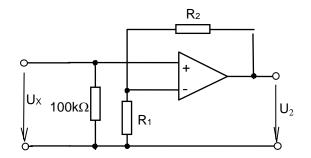
- 4.3.1. Změřte napětí termočlánku předloženým číslicovým voltmetrem pro jednu polohu přepínače termostatu.
- 4.3.2. Zapojte invertující zesilovač napětí s běžným OZ (OP 07) a použijte jej pro zesílení napětí termočlánku. Napětí na výstupu zesilovače změřte stejným číslicovým voltmetrem pro stejnou polohu přepínače termostatu jako v bodě 4.3.1. Korigujte chybu metody způsobenou konečným vstupním odporem zesilovače.
- 4.3.3. Proveď te totéž měření s OZ s malou vstupní napěť ovou 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 termočlánku (koeficient rozšíření $k_r = 2$) jak pro přímé měření číslicovým voltmetrem, tak pro měření napětí termočlánku po zesílení invertujícím zesilovačem napětí OP 07, viz bod 4.2.3 domácí přípravy.
 - 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.
- 4.3.6. Pro polohu přepínače termostatu použitou při měřeních dle bodů 4.3.1 určete teplotu teplého konce termočlánku (teplotu měřenou termočlánkem), je-li konstanta použitého termočlánku K = $54 \,\mu\text{V/}^{\circ}\text{C}$. Předpokládejte, že teplota srovnávacích (studených) konců termočlánku je $20 \,^{\circ}\text{C}$ (teplota laboratoře).

4.4. Schéma zapojení



Obr. 4.2. Přímé měření napětí termočlánku číslicovým voltmetrem





Obr. 4.3. Invertující zesilovač pro zesílení napětí termočlánku

Obr. 4.4. Neinvertující zesilovač se vstupním odporem 100 kΩ

Tab. 4.1. Základní parametry některých vybraných operačních zesilovačů

Typ OZ Vlastnost	ICL 7650	741	LT 1097	OP 07	LM 155
napěťový offset typ./max. (μV)	0,7/8	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)

4.5. Poznámky k měření

- 4.5.1. Měřte až po dosažení tepelného ustálení obvodu, které indikuje zánik monotónních změn údaje číslicového voltmetru (ustálení údaje až na případný vliv šumu).
- 4.5.2. 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).
- 4.5.3. Tolerance použitých rezistorů a vnitřní odpor termočlánku jsou uvedeny na přípravcích.
- 4.5.4. Výpočet teploty teplého konce termočlánku ze změřeného napětí termočlánku se provede podle přibližného vztahu

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

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