



## ÚLOHA Č.

# T2

### KALIBRACE PŘEVODNÍKU TEPLOTA-PROUD

#### TEORETICKÝ ÚVOD

Zákon č. 505 o metrologii definuje pojem **kalibrace** v §9, odst. 4 takto:

*"Při kalibraci pracovního měřidla se jeho metrologické vlastnosti porovnávají zpravidla s etalonem, popřípadě lze použít certifikovaný nebo ostatní referenční materiál za předpokladu dodržení zásad návaznosti měřidel."*

Definice podle VIM (Mezinárodní metrologický slovník) je složitější, v podstatě ale přidává požadavek, aby hodnoty změřené při kalibraci byly doplněny nejistotou měření.

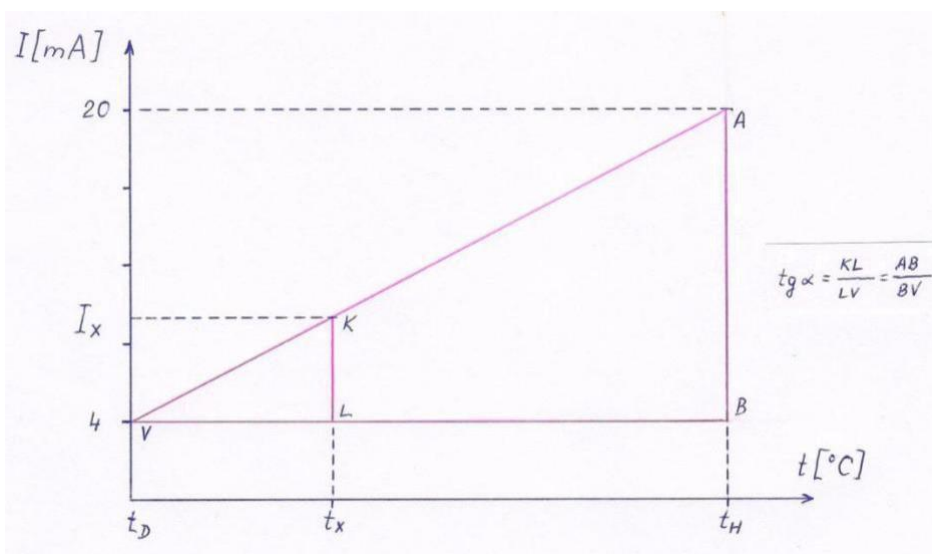
Dále musí být dodrženy zásady návaznosti, tzn., že použité etalony musí mít nepřerušenu návaznost na národní etalon (viz čl. 1.4 učebního textu).

Při kalibraci teplotních snímačů se nejčastěji používá metoda přímého porovnání, což znamená, že etalonový teploměr i zkoušený snímač se umístí vedle sebe do termostátované lázně a po tepelném ustálení se provedou odečty teploty indikované etalonem i měřeným snímačem. Chyba měřeného snímače je

$$(1)$$

kde  $t_M$  je teplota indikovaná kalibrovaným měřidlem a  $t_E$  je teplota indikovaná etalonovým teploměrem.

Snímače s proudovým převodníkem jsou nastaveny tak, aby byl výstupní proud převodníku přímo úměrný měřené teplotě. Dolní hranici teplotního rozsahu odpovídá výstupní proud převodníku 4 mA, horní hranici teplotního rozsahu odpovídá výstupní proud převodníku 20 mA, což je vidět na obr. T2.1.



Obr. T2.1: K odvození převodního vztahu mezi teplotou a výstupním proudem převodníku

Odtud lze metodou podobnosti trojúhelníků snadno odvodit převodní vztah mezi teplotou a proudem:

$$t_x = t_D + \frac{(I_x - 4)(t_H - t_D)}{16} \quad (2)$$

1

Úloha T2: Kalibrace snímače s převodníkem teplota-proud (2019)

kde

$t_x$  [°C] měřená teplota

$I_x$  [°C] výstupní proud převodníku při teplotě  $t_x$

$t_D$  [°C] teplota dolní hranice teplotního rozsahu převodníku

$t_H$  [°C] teplota horní hranice teplotního rozsahu převodníku

V případě, že dolní hranice měřicího rozsahu je 0 °C, zjednoduší se vztah (2) na tvar:

$$t_x = t_H \frac{I_x - 4}{16} \quad (3)$$

Číselné konstanty v obou vztazích vyjadřují hodnoty proudu převodníku - číslo 4 odpovídá proudu 4 mA při dolní teplotě měřicího rozsahu a číslo 16 je rozdíl mezi proudem při horní hranici teplotního rozsahu (20 mA) a proudem při dolní teplotě měřicího rozsahu (4 mA).

Jako **etalon** se používá platinový odporový snímač teploty vyšší kvality (přesný a stabilní), u něhož je přesně popsána závislost odporu na teplotě. Pro průmyslové aplikace při teplotách nad 0 °C se vychází z polynomu druhého řádu (viz též čl. 2.2 učebního textu) v následujícím tvaru:

$$R_t = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad (4)$$

kde

$R_t$  [Ω] odpor etalonového snímače při teplotě  $t$

$R_0$  [Ω] odpor etalonového snímače při teplotě 0 °C

$A$  [Ω<sup>-1</sup>] charakteristická konstanta (lineární)

$B$  [Ω<sup>-2</sup>] charakteristická konstanta (kvadratická)

Tyto konstanty jsou uvedeny v kalibračním listu etalonu.

Jelikož se měří odpor etalonu, musí hodnota tohoto odporu se na teplotu přepočítat, což v podstatě znamená, že ze vztahu (4) je třeba vyjádřit teplotu:

$$t_E = -\frac{A}{2B} - \frac{A^2}{4B^2} \frac{R - R_0}{B \cdot R} \quad (5)$$



Vraťme se nyní ke vztahu (1), jenž vyjadřuje podstatu kalibrace. Podle něj se při teplotě stanovené etalonem určuje chyba kalibrovaného snímače. Následně se musí zjistit, zda chyba kalibrovaného snímače leží v mezích maximální povolené chyby udávané výrobcem.

Zdálo by se, že vše je již hotovo, je ale třeba vzít do úvahy ještě jednu důležitou veličinu, jíž je **nejistota měření**. Je to hodnota, která se přisuzuje výsledku měření, a která vyjadřuje míru nepřesnosti měření. Nejistota měření zahrnuje všechny známé vlivy na měření, v případě této laboratorní úlohy nejistotu kalibrace použitých měřicích přístrojů (etalonů, digitálních multimetrů), vliv ponoru, časových konstant etalonu a měřeného snímače, stálost a homogenitu lázni, atd. Podrobnější rozbor je nad rámec našeho programu, na tomto místě se spokojíme s tvrzením, že skutečná hodnota (teplota) se s určitou pravděpodobností nachází v intervalu změřená hodnota  $\pm$  nejistota měření.

Proto platí, že snímač teploty vyhovuje specifikaci, pokud je změřená hodnota v mezích maximální povolené chyby včetně nejistoty měření, a to v celém teplotním rozsahu.

*Dejme tomu, že výrobce udává maximální povolenou chybu snímače  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zjištěná chyba snímače je například  $-0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a nejistota měření  $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nejistota měření se musí k chybě snímače nejistota přičíst se stejným znaménkem, takže dostaneme hodnotu  $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato hodnota je menší než maximální povolená chyba a proto je snímač v mezích maximální povolené chyby a vyhovuje specifikaci.*

V praxi se kalibrace provádí při více teplotách. Měly by to být minimálně teploty na dolní a horní hranici teplotního rozsahu a alespoň jedna teplota mezi nimi, buďto uprostřed měřicího rozsahu nebo blízko předpokládané teploty použití. Je to žádoucí i z toho důvodu, aby se prověřila

linearita závislosti výstupního proudu převodníku na teplotě. Zjištěné chyby ve všech kalibračních teplotách se porovnávají s maximální povolenou chybou udávanou výrobcem. (V této laboratorní úloze se bude kalibrace provádět v neúplném teplotním rozsahu.)

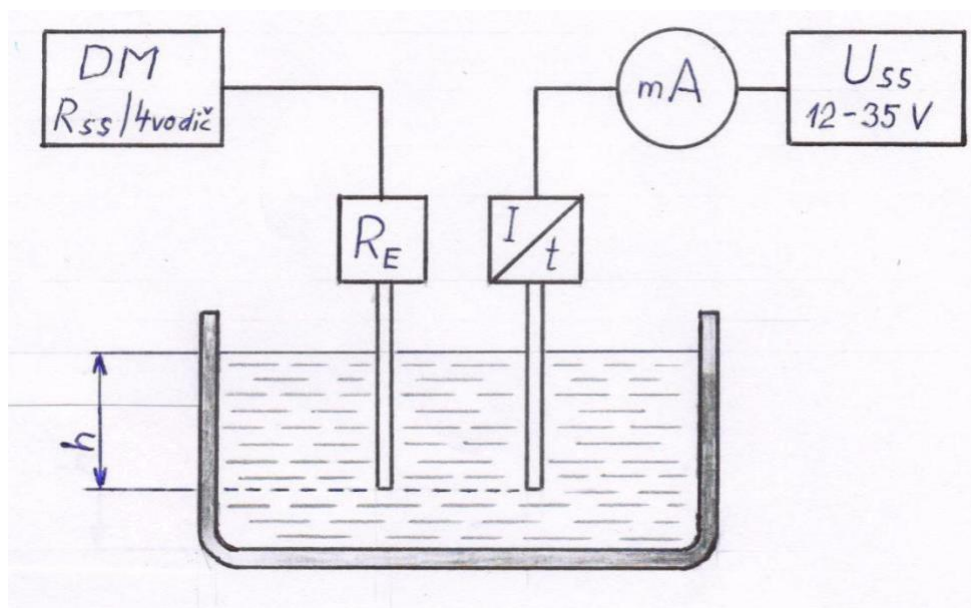
## ZADÁNÍ

Proveďte kalibraci předloženého snímače teploty s převodníkem proudu.

Kalibraci proveďte při teplotě ledové tříště, při teplotě okolí a při teplotě určené vyučujícím ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Vypracujte protokol o měření, jehož přílohou bude kalibrační list.

## SCHÉMA



Obr. T2.2: Schéma zapojení

## POMŮCKY

Výrobník ledové tříště

Destilovaná (nebo čistá pitná) voda

Termoska na ledovou tříšť (dolní zkušební teplota)

Nádoba na vodu (střední zkušební teplota)

Termostatovaná lázeň s vodní náplní (horní zkušební teplota)

Etalonový teploměr pro měření dolní a střední zkušební teploty

Etalonový teploměr pro měření horní zkušební teploty

Digitální multimetr 6,5místný s rozsahy ss odporů 100  $\Omega$  až 1 k $\Omega$  (měření odporu etalonu)

Přepínač měřicích míst

Stabilizovaný zdroj ss napětí 12 V až 30 V.

Digitální multimetr 6,5místný s rozsahy ss proudu 10 mA až 100 mA (měření proudu převodníku) Propojovací vodiče

Předtisk protokolu o měření (je součástí návodu k laboratorní úloze)

Předtisk záznamu měření (je součástí návodu k laboratorní úloze)

Předtisk kalibračního listu

PC nebo tablet s tabulkou excel pro výpočet etalonových teplot (je k dispozici u vyučujícího)

## POSTUP MĚŘENÍ

### Příprava měření

1. V termosce se podle návody vyrobí ledová tříšť pro měření při dolní zkušební teplotě 0 °C.
2. V nádobě na vodu se připraví voda při teplotě okolí.
3. Do provozu se uvede termostat nastavený na teplotu horní zkušební teplotu (připraví vyučující).
4. Do termostatu se umístí referenční snímač TP12.
5. Všechny teploty se nechají řádně stabilizovat.

### Měření - získání dat

#### A. Měření při dolní zkušební teplotě

6. Do ledové tříšty se vedle sebe umístí referenční snímač teploty Pt 100 a zkoušený snímač s ponorem alespoň 120 mm a nechají se teplotně stabilizovat alespoň 10 minut. Zkoušený snímač se stabilizuje v zapojeném stavu. Je třeba dbát na to, aby se snímače nedotýkaly dna ani stěny nádoby.
7. Provedou se odečty při dolní zkušební teplotě. Prvním odečtem je hodnota odporu etalonu, následuje odečet hodnoty proudu zkoušeného snímače, dále se pokračuje ve střídavých odečtech etalonu a zkoušeného snímače. Měření se ukončí odečtem referenčního snímače, tzn., že celkem se provede 6 odečtů referenčního snímače a 5 odečtů zkoušeného snímače, doporučený interval odečtů je 15 s.

*Algoritmus odečtů: E1 - S1 - E2 - S2 - E3 - S3 - E4 - S4 - E5 - S5 - E6*

#### B. Měření při střední zkušební teplotě

8. Referenční snímač teploty Pt 100 a zkoušený snímač se umístí vedle sebe do termosky s vodou při střední zkušební teplotě (teplota okolí) s ponorem alespoň 120 mm a nechají se ustálit alespoň 10 minut. Zkoušený snímač se stabilizuje v zapojeném stavu. Je třeba dbát na to, aby se snímače nedotýkaly dna ani stěny nádoby.
9. Odečty se provedou stejným způsobem jako v kroku 7.

#### C. Měření při horní zkušební teplotě

10. Referenční snímač teploty Pt 100 a zkoušený snímač se umístí vedle sebe do termostatované lázně nastavené na horní zkušební teplotu s dostatečným ponorem a nechají se ustálit alespoň 10 minut. Zkoušený snímač se stabilizuje v zapojeném stavu. Je třeba dbát na to, aby se snímače nedotýkaly dna ani stěny nádoby.
11. Stejným způsobem jako v kroku 7 se provedou odečty při horní zkušební teplotě.

## VYHODNOCENÍ ZMĚŘENÝCH DAT

Postup výpočtu je při všech zkušebních teplotách analogický.

### Určení etalonové teploty

12. Vypočítá se průměrná hodnota odporu referenčního snímače  $R_{E(t)}$  pro nastavenou teplotu  $t$ .
13. Výpočet zkušební teploty indikované referenčním snímačem  $t_E$  se vypočítá podle vztahu (5), jenž je k dispozici v tabulce excel v souboru „etalony-2017“u vyučujícího. Takto se získají "skutečné" zkušební teploty.

### Výpočet teploty indikované zkoušeným snímačem

14. Vypočítá se průměrná hodnota výstupního proudu převodníku.
15. Za použití vztahu (2) nebo (3) se vypočítá teplota indikovaná zkoušeným snímačem.

### Výpočet chyby zkoušeného snímače

16. Podle vztahu (1) se vypočítá chyba indikace teploty kalibrovaného snímače.

### Posouzení, zda zkoušený snímač vyhovuje deklarované třídě přesnosti

17. Na základě údajů výrobce se vypočítá maximální povolená chyba kalibrovaného snímače.

---

*Například:*

*Výrobce udává maximální povolenou chybu 0,6 % z rozsahu. Je-li teplotní rozsah snímače například -30 °C až 60 °C, tj. rozpětí hodnot teploty je 90 °C, je maximální povolená chyba 0,6 % z 90 °C, což je 0,54 °C, resp.  $\pm 0,54$  °C.*

---

18. Toleranční pole se zúží o nejistotu měření - vyhovující hodnoty leží uvnitř tohoto zúženého tolerančního pole (viz obr. T2.3).

---

*Například:*

*Nejistota měření použitého měřicího řetězce při teplotě 23 °C je 0,10 °C (na obr. T2.3 označena U). O tuto hodnotu se musí zmenšit maximální povolená chyba vypočtená v bodě 17 postupu.*

---

Mohou nastat tři případy:

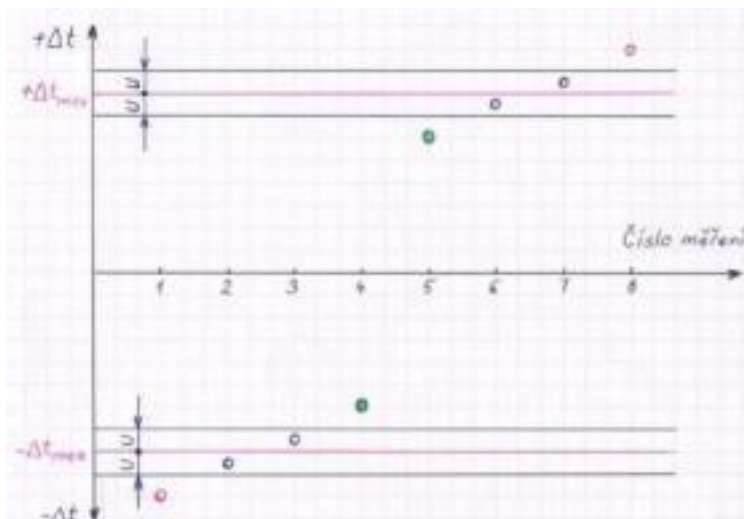
1. **Hodnoty vyhovují** deklarované přesnosti – zjištěná chyba snímače leží uvnitř zúženého tolerančního pole, tj. mezi hodnotami  $(+\Delta t_{\max}-U)$  a  $(-\Delta t_{\max}+U)$ .
2. **Nelze rozhodnout**, zda změřené hodnoty vyhovují deklarované přesnosti - změřené hodnoty leží v oblastech  $(+\Delta t_{\max} \pm U)$  nebo  $(-\Delta t_{\max} \pm U)$ .
3. **Hodnoty nevyhovují** deklarované přesnosti - změřené hodnoty leží nad  $(+\Delta t_{\max}+U)$  nebo pod  $(-\Delta t_{\max}-U)$ .

---

*Poznámka:*

*Maximální povolená chyba může nabývat kladných nebo záporných hodnot, lze ale počítat s absolutními hodnotami.*

---



Obr. T2.3: K vysvětlení vyhodnocení změřených bodů

Celý výše popsaný postup se provede pro všechny kalibrační teploty.

## ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Podkladem pro zpracování výsledků jsou **vlastní změřené hodnoty**. Výsledky měření předloží studenti na konci laboratorního cvičení vyučujícímu ke kontrole.

Hlavním výstupním dokumentem bude školní formulář, jenž bude doplněn kalibračním listem podle předtisku. Výsledky měření mohou být buďto včleněny do protokolu nebo mohou být samostatnou přílohou.

Poznámky pro vyplnění kalibračního listu:

V části "**Měřidlo**" studenti vyplní typ, přesnost měřidla a výrobní číslo podle dokumentace výrobce a údajů na štítku kalibrovaného snímače teploty.

Studenti vyplní skutečný datum kalibrace a jména přítomných studentů.

V části "**Výsledek kalibrace**" studenti zvolí na základě výsledků měření vhodný výrok o výsledku kalibrace:

- Všechny změřené hodnoty **VYHOVUJÍ** specifikaci výrobce.
- NELZE ROZHODNOUT**, zda snímač odpovídá specifikaci výrobce.
- Zkoušený snímač **NEVYHOVUJE** specifikaci výrobce.

V části "**Naměřené a vypočtené hodnoty**" studenti vyplní hodnoty zaokrouhlené v souladu s nejistotou měření, konkrétně:

- etalonová teplota na 2 platná místa,
- chyba výstupního proudu převodníku na 3 platná místa,
- chyba teploty na 2 platná místa,
- nejistota měření na 2 platná místa.