

1 Teoretická část

Cílem úlohy je nakalibrovat dva elektrické přístroje sloužící k měření teploty. Prvním z nich je termočlánek, což je dvojice na koncích svařených vodičů z různých materiálů. V našem případě je použita měď a konstantan¹. Pokud mají oba konce tohoto obvodu různou teplotu, vzniká mezi nimi podle [2] elektrické napětí. Závislost napětí na rozdílu teplot můžeme popsat ve druhém řádu² vztahem

$$U = \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2, \quad (1)$$

kde U je napětí mezi konci obvodu, α , β jsou konstanty a ΔT je rozdíl teplot mezi konci obvodu.

Druhým zařízením je odporový teploměr, který využívá závislosti elektrického odporu materiálů na teplotě. Náš exemplář obsahuje platinu jako vodič. Závislost opět popíšeme do druhého řádu jako

$$R/R_0 = 1 + AT + BT^2, \quad (2)$$

kde R je odpor teploměru, R_0 , A , B jsou konstanty a T je teplota.

Ke kalibraci přístrojů využijeme známých teplot, při kterých se odehrávají určité děje. Prvním dějem je tání ledu, které nastává při konstantní teplotě $T_1 = 0^\circ\text{C}$. Vodu využijeme ještě jednou a to v její plynné podobě. Teplota varu vody T_2 závisí podle [2] pouze na okolním tlaku p vztahem

$$T_2/^\circ\text{C} = 100.00 + 28.0216\xi - 11.642\xi^2 + 7.1\xi^3, \quad (3)$$

kde $\xi = p/p_0 - 1$ a $p_0 = 101325$ Pa. Posledním dějem je tání cínu, které nastává opět při konstantní teplotě a sice $T_3 = 231.93^\circ\text{C}$ podle [1].

Pro kalibraci jsme použili již hotových sestavení. K měření odporu teploměru jsme použili číslicový ohmmetr s rozsahem do $200\ \Omega$ a přesností 0.5% . K záznamu napětí na termočlánek byl použit digitální převodník s přesností na $6^{1/2}$ číslic³ a počítač s obslužným programem. Jednotlivé konstantní teploty byly realizovány termoskou s ledem, baňkou s vroucí vodou⁴ a tuhoucím cínem.

2 Výsledky měření

Atmosférický tlak během experimentu byl $p = (965 \pm 1)$ hPa. Z toho ξ ze vztahu (3) je rovno $(-48 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ a konečně $T_2 = (98.63 \pm 0.03)^\circ\text{C}$, kde

¹dle [1] slitina 55% mědi a 45% niklu

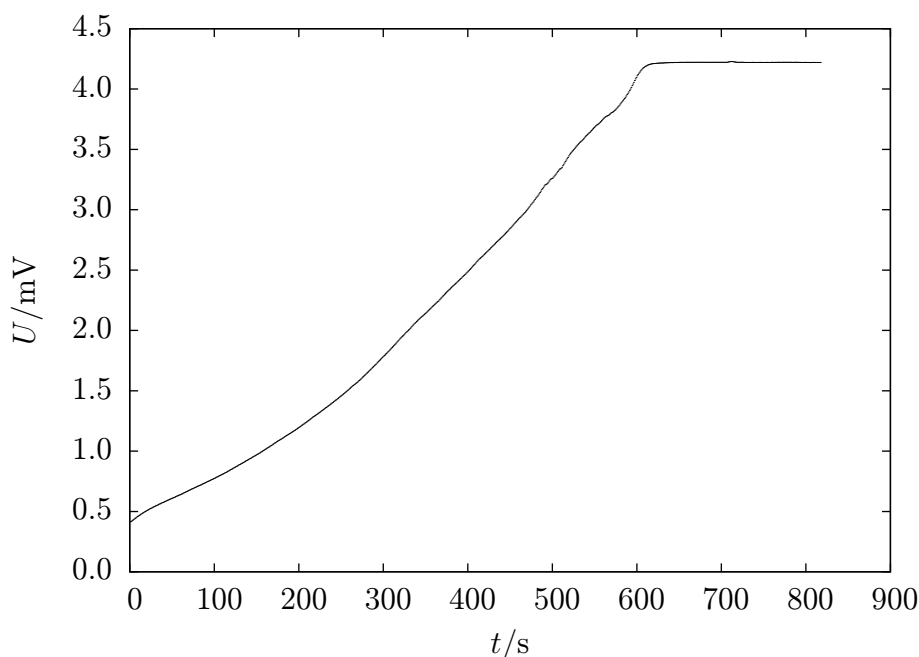
²V nultém řádu je napětí jistě nulové. Jakékoli naměřené napětí při nulovém rozdílu teplot je tak systematická chyba měřidla, nikoli vlastnost termočláneku.

³Rozsah převodníku bohužel umožnil využít de facto jen poslední čtyři platné číslice.

⁴Zde byla měřena teplota par těsně nad hladinou vody.

jsme využili zjednodušeného vztahu pro výpočet chyby součinu nebo podílu, resp. mocniny, $\delta = \delta_1 + \delta_2$, resp. $\delta = n\delta_1$.

Nejprve jsme ověřili, že naměřené napětí při stejné teplotě konců termočlánku je nulové. Průběhy napětí v závislosti na čase při ohřívání a varu vody a tuhnutí cínu jsou v Obrázcích 1 a 2. Malý zoubek patrný na jinak konstantním napětí během varu vody byl způsoben zkusmým zmáčknutím hadičky odvádějící páru z baňky, a tedy dočasným zvýšením tlaku.



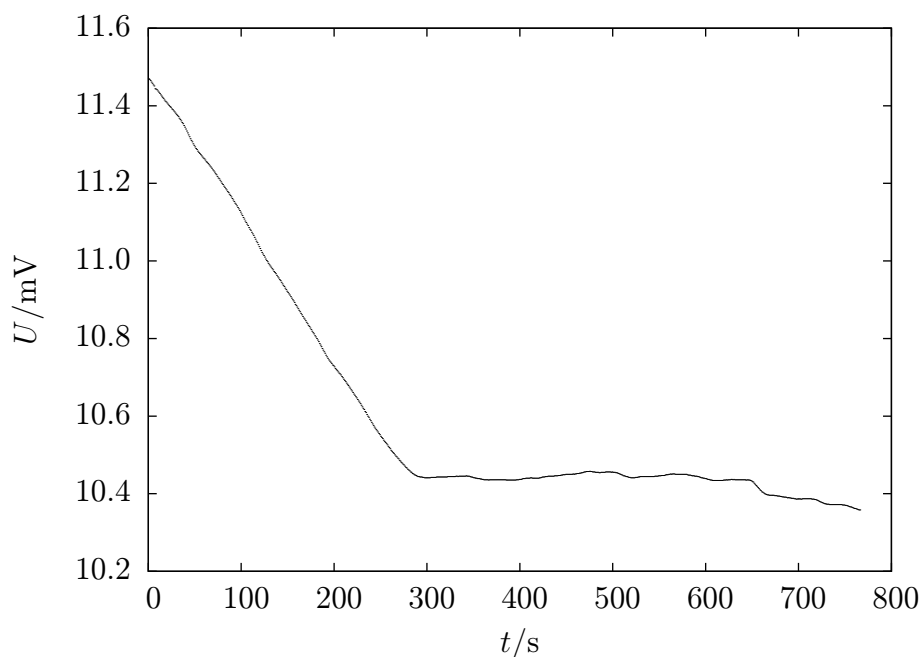
Obrázek 1: Napětí na termočlánku během ohřívání a varu vody

Napětí odpovídající různým rozdílům teplot na koncích termočlánku jsme získali zpracováním konstantních úseků pomocí klasických vztahů z [3]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i, \quad s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}.$$

V případě varu vody jsme použili oblast od 650 s s vynechaným „zoubkem“. U cínu jsme využili oblast 300–600 s. Výsledky i s kvadraticky přičtenou chybou měřidla shrnuje Tabulka 1. Dlužno podotknout, že v případě vody je statistická chyba zanedbatelná.

Konstanty jsme určili řešením soustavy dvou rovnic (1) pro dvě dvojice



Obrázek 2: Napětí na termočlátku během tuhnutí cínu

i	1	2
$\Delta T_i / ^\circ\text{C}$	98.63 ± 0.03	231.93
U_i / mV	4.2207 ± 0.0005	10.4450 ± 0.0006

Tabulka 1: Naměřená napětí na termočlátku

ΔT_i , U_i . Jejich chybu jsme určili pomocí známého vztahu z [3]

$$s_{\bar{u}} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{du}{dx_i} \right)^2 s_{x_i}^2},$$

přičemž výpočet jsme provedli pomocí výpočetního systému *Mathematica*. Výsledky shrnuje Tabulka 2.

$\alpha / \text{mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$(41.13 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$
$\beta / \text{mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$	$(16.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}$

Tabulka 2: Hodnoty konstant ve vztahu (1)

Hodnoty odporu platinového teploměru jsme odečítali ve chvíli konstantní teploty, což jsme detekovali pomocí první aparatury. Naměřené hodnoty jsou

shrnuty v Tabulce 3. Chyba se skládá pouze z chyby měřidla, protože údaj na displeji se po čas měření neměnil, tedy statistická chyba je nulová. Konstanty ze vztahu (2) jsme určili identicky jako v případě termočlánku. Výsledky shrnuje Tabulka 4.

i	1	2	3
$T_i/^\circ\text{C}$	0.00	98.63 ± 0.03	231.93
R_i/Ω	100.9 ± 0.5	138.2 ± 0.7	184.9 ± 0.9

Tabulka 3: Naměřené hodnoty odporu platinového teploměru

R_0/Ω	100.9 ± 0.5
$A/^\circ\text{C}^{-1}$	$(3.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$
$B/^\circ\text{C}^{-2}$	$(-1.2 \pm 0.7) \cdot 10^{-6}$

Tabulka 4: Hodnoty konstant ve vztahu (2)

3 Diskuse výsledků

Výsledky experimentu mohl jistě ovlivnit pouze fakt, že jsme ve skutečnosti měřili jiné teploty, než jsme mysleli. Proces tání ledu je velmi dobře definovaný, a protože jsme použili destilovanou vodu, tady by problém být neměl. U varu vody už to tak jednoduché není. Var jsme realizovali v téměř uzavřené nádobě, ze které se pára odváděla úzkou hadičkou. V baňce tedy mohl vzniknout jistý přetlak oproti atmosféře, který by teplotu varu snížil. Dalším jevem, který může měřenou teplotu ovlivnit, je rekondensace a odkapávání kapiček z termočlánku a teploměru.

Samostatnou kapitolou je potom použitý cín. Díky tomu, že se velmi často zahřívá až nad bod tání, je velmi znečištěný na vzduchu vznikajícím oxidem. Dalším faktorem je skutečnost, že cín netuhl rovnoměrně, ale v různých částech objemu různě rychle. Tedy musely jistě vzniknout tepelné proudy, které mohly experiment výrazně znepresnit. Tomu odpovídá i jistá kostrbatost křivky tuhnutí v Obrázku 2. Použitá teplota tání cínu by tak měla být spíše s přesností na jednotky stupně Celsia než na setiny. Znovu provedený výpočet ale ukazuje, že chyby by se zvětšily jen o několik procent.

Z naměřených hodnot konstant (a dále i z grafů kalibračních křivek) vyplývá, že kvadratický člen hraje už při námi dosažených teplotách nezanedbatelnou roli a mělo tedy smysl jej uvažovat.

Možností, jak experiment zlepšit je vícero. Za prvé by to byly jistě přesnější měřidla, což ale platí obecně. Specifický byl v tomto případě fakt, že

ačkoli měl digitální převodník přesnost na šest číslic, námi dosažená byla jen čtyřmístná díky nedostatečnému rozsahu. Další možností by bylo přidání další dobře definované teploty, díky čemuž bychom mohli získat konstantu u kubického členu.

4 Závěr

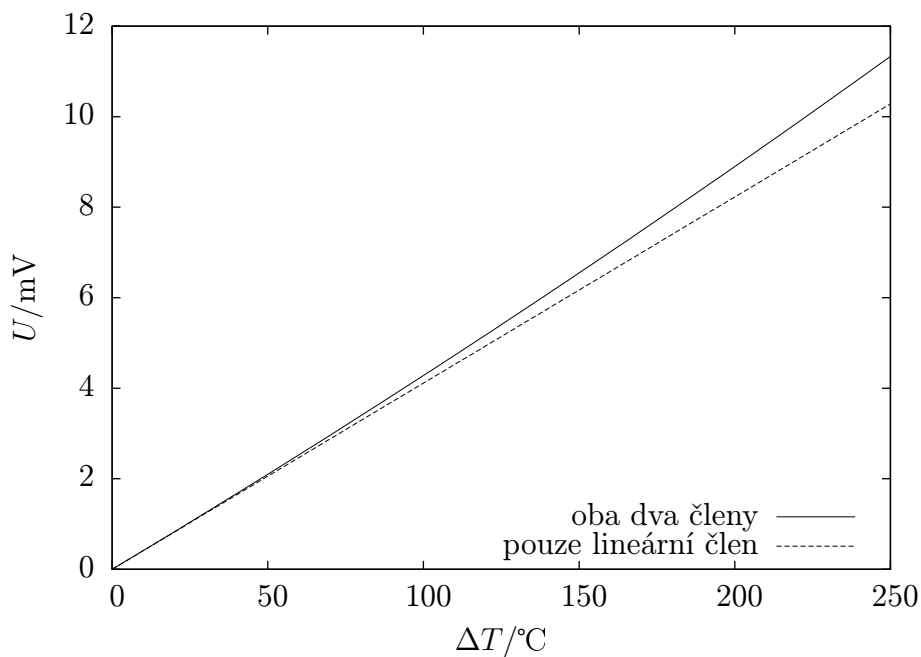
Kalibrační křivka termočlánku je dosažením do (1)

$$\frac{U}{\text{mV}} = \frac{(41.13 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}}{^{\circ}\text{C}} \Delta T + \frac{(16.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}^2} \Delta T^2.$$

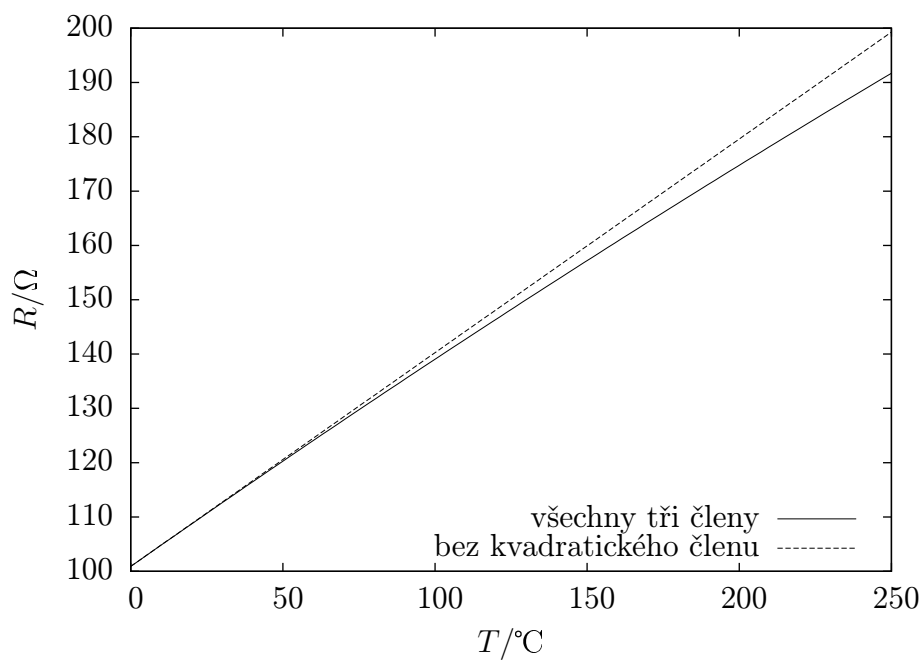
Kalibrační křivka odporového teploměru je opět dosažením do (2)

$$\frac{R}{(100.9 \pm 0.5) \Omega} = 1 + \frac{(3.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}}{^{\circ}\text{C}} T + \frac{(-1.2 \pm 0.7) \cdot 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}^2} T^2.$$

Obě kalibrační křivky jsou vyneseny v Obrázcích 3 a 4.



Obrázek 3: Kalibrační křivka termočlánku měď-konstantan



Obrázek 4: Kalibrační křivka odporového teploměru

Reference

- [1] <http://en.wikipedia.org/>
- [2] studijní text z <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>
- [3] Vybíral B.: *Zpracování dat fyzikálních měření*. MAFY, Hradec Králové 2002