

VIII Kalibrace odporového teploměru a termočlánku - fázové přechody

Pracovní úkol

1. Okalibrujte pomocí bodu tání ledu, bodu varu vody a bodu tuhnutí cínu:
 - a. platinový odporový teploměr (určete konstanty R_0, A, B).
 - b. termočlánek měď-konstantan (určete konstanty a, b, c)
2. Registrujte časový průběh termoelektrického napětí termočlánku $\varepsilon(\tau)$ a odporu platinového teploměru $R(\tau)$ při ohřevu a varu vody a při tuhnutí cínu. Změřené průběhy graficky znázorněte.
3. Nakreslete graf teplotní závislosti odporu R (kalibrační křivka odporového teploměru) a graf teplotní závislosti termoelektrického napětí ε (kalibrační křivka termočlánku).
4. Ze závislostí $\varepsilon(\tau)$ a $R(\tau)$ dle bodu 2 a kalibračních hodnot dle bodu 1 určete časové závislosti $t_R(\tau)$ a $t_\varepsilon(\tau)$ teplot měřených odporovým teploměrem a termočlánkem při ohřevu vody a tuhnutí cínu. Určené závislosti porovnejte.

Teorie

Máme-li za úkol okalibrovat odporový teploměr a termočlánek, můžeme to udělat s využitím známých teplot, jako jsou např. teploty, při kterých dochází u konkrétních látek k fázovým přechodům.

Předpokládáme, že závislosti měřených veličin na teplotě pro teploměr i termočlánek lze s dostatečnou přesností aproximovat kvadratickým polynomem, ke kalibraci proto budeme potřebovat tři různé teplotní body.

Zvolíme si t_1 jako teplotu tání ledu, která za normálních podmínek činí $t_1 = 0$ °C. Jako teplotu t_2 zvolíme teplotu varu vody, která však závisí na tlaku vztahem^[1]

$$t_2 = 100,0 + 28,0216 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,642 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \quad (1)$$

kde p je tlak při měření a $p_0 = 101,325 \cdot 10^3$ Pa značí normální atmosférický tlak^[2], hodnota t_2 je udána ve stupních Celsia.

Jako poslední kalibrační teplotu zvolíme $t_3 = 231,9$ °C a jedná se o teplotu tání cínu^[3].

Odporový teploměr

Odpor odporového teploměru závisí na teplotě t vztahem

$$R = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (2)$$

Konstanty R_0, A, B můžeme určit změřením odporu pro tři různé známé teploty, tedy v našem případě t_1, t_2 a t_3 .

Termočlánek

Náš termočlánek má dva svařované spoje S_1 a S_2 kovových vodičů měď-konstantan. Budeme-li spoje udržovat na různých teplotách, začne se v termočláнку indukovat termoelektrické napětí ε (důsledek Seebeckova jevu), které lze určit vztahem

$$\varepsilon = a + b\Delta T + c\Delta T^2 \quad (3)$$

přičemž ΔT značí rozdíl teplot mezi oběma spoji. Spoj S_1 budeme udržovat na teplotě t_1 , teplotu druhého spoje budeme měnit.

Výsledky měření

Měření probíhalo za následujících podmínek:

$$t = (25,2 \pm 0,1) \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi = (34,2 \pm 0,1) \%$$

$$p = (997,5 \pm 0,1) \text{ hPa}$$

Z aktuální hodnoty tlaku vzduchu můžeme dle rovnice (1) určit bod varu vody jako $t_2 = 99,56 \text{ }^\circ\text{C}$. Chybu zde není uvedena, jelikož ji neuvažujeme ani u teplot t_1 a t_3 .

Při měření jsme však pozorovali, že voda vře při $t_2 = 104 \text{ }^\circ\text{C}$ a cín tuhne při teplotě $t_3 = 240 \text{ }^\circ\text{C}$ (při těchto teplotách se hodnota odporu a napětí ustálila, probíhala fázová přeměna, což bylo patrné i z grafu závislosti napětí na čase). Rozdíl mezi skutečnými a předpokládanými teplotami fázových přeměn může být dán vícero faktory (viz diskuze).

Určíme kalibrační konstanty pro předpokládané i skutečně naměřené kalibrační teploty.

Hodnoty odporu a termoelektrického napětí při kalibračních teplotách shrnují Tabulky 1 a 2.

Tabulka 1: Hodnoty R a ε pro předpokládané kalibrační hodnoty

t [°C]	R [Ω]	ε [mV]
0	100,5	0,004
99,56	136,0	4,281
231,9	184,9	11,021

Hodnoty odporu jsou určeny s přesností $\pm 0,1 \Omega$, termoelektrické napětí $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{mV}$.

Na základě těchto hodnot určíme podle vztahu (2) kalibrační koeficienty platinového odporového teploměru jako

$$R_0 = (100,5 \pm 0,1) \Omega$$

$$A = (3,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$$

$$B = (-6,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-7} (\text{°C})^{-2}$$

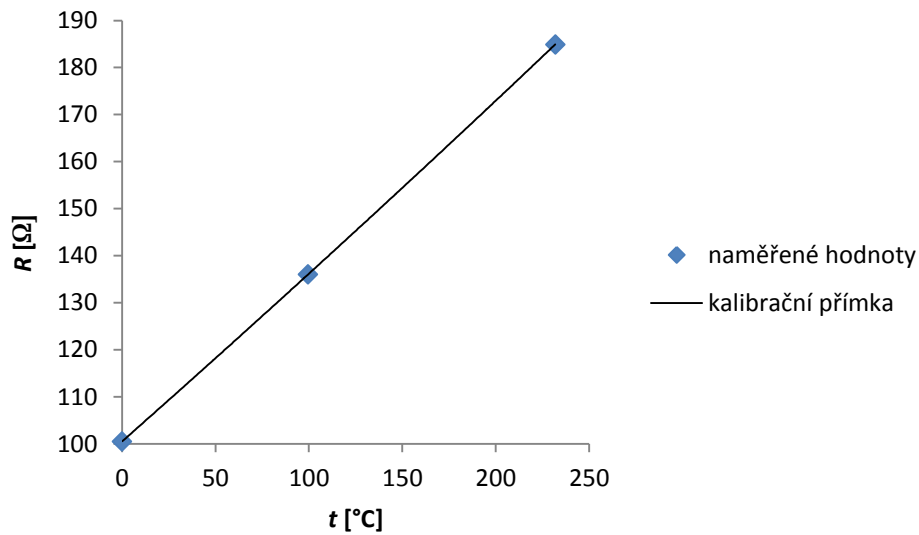
Pro termočlánek vypočítáme dle vztahu (3) kalibrační koeficienty jako

$$a = (0,004 \pm 0,003) \text{mV}$$

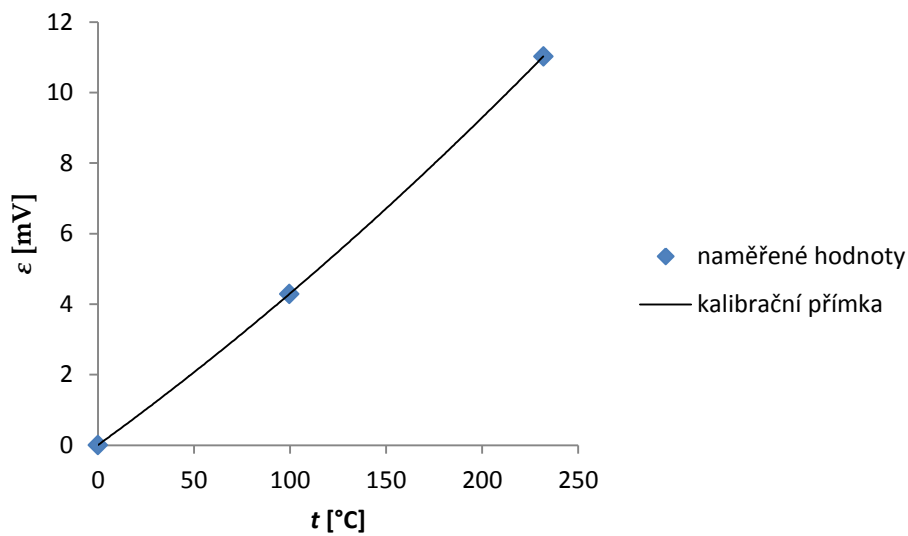
$$b = (3,95 \pm 0,04) \cdot 10^{-2} \text{mV} \cdot (\text{°C})^{-1}$$

$$c = (3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \text{mV} \cdot (\text{°C})^{-2}$$

Graf 1a zobrazuje kalibrační křivku odporového teploměru, Graf 1b kalibrační křivku termočlánu.



Graf 1a: Kalibrační přímka odporového teploměru



Graf 1b: Kalibrační přímka termočlánku

Tabulka 2: Hodnoty R a ε pro skutečně naměřené kalibrační hodnoty

t [$^{\circ}\text{C}$]	R [Ω]	ε [mV]
0	100,5	0,004
104	138,7	4,49
240	187,6	11,46

Hodnoty odporu jsou určeny s přesností $\pm 0,1 \Omega$, termoelektrické napětí $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{mV}$ (toto platí v celé práci).

Na základě těchto hodnot určíme podle vztahu (2) kalibrační koeficienty platinového odporového teploměru jako

$$R_0 = (100,5 \pm 0,1) \Omega$$

$$A = (3,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$$

$$B = (-3,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-7} (\text{°C})^{-2}$$

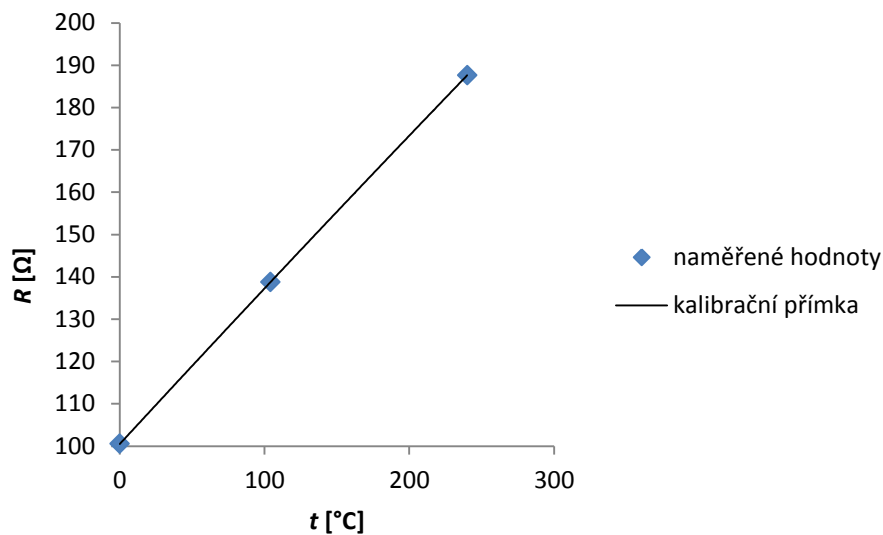
Pro termočlánek vypočítáme dle vztahu (3) kalibrační koeficienty jako

$$a = (0,004 \pm 0,003) \text{mV}$$

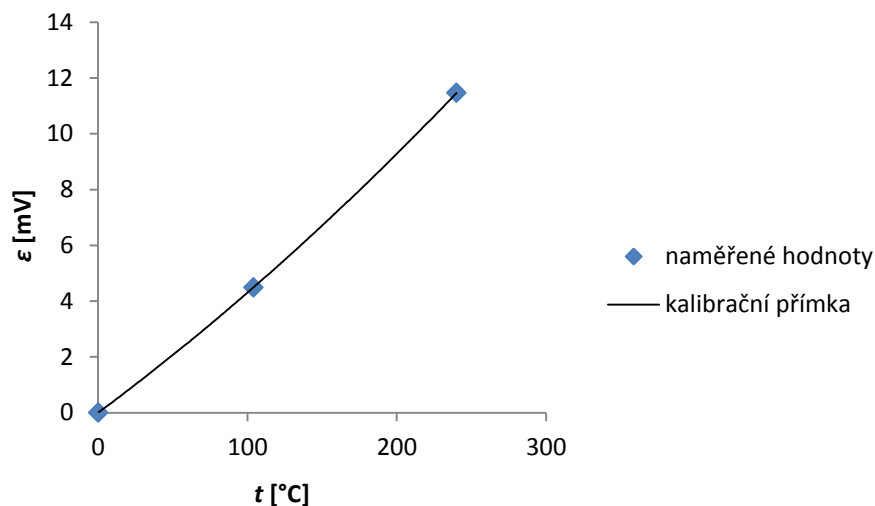
$$b = (3,96 \pm 0,04) \cdot 10^{-2} \text{mV} \cdot (\text{°C})^{-1}$$

$$c = (3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \text{mV} \cdot (\text{°C})^{-2}$$

Graf 2a zobrazuje kalibrační křivku odporového teploměru, Graf 2b kalibrační křivku termočlánu.



Graf 2a: Kalibrační křivka odporového teploměru



Graf 2b: Kalibrační přímka termočlánku

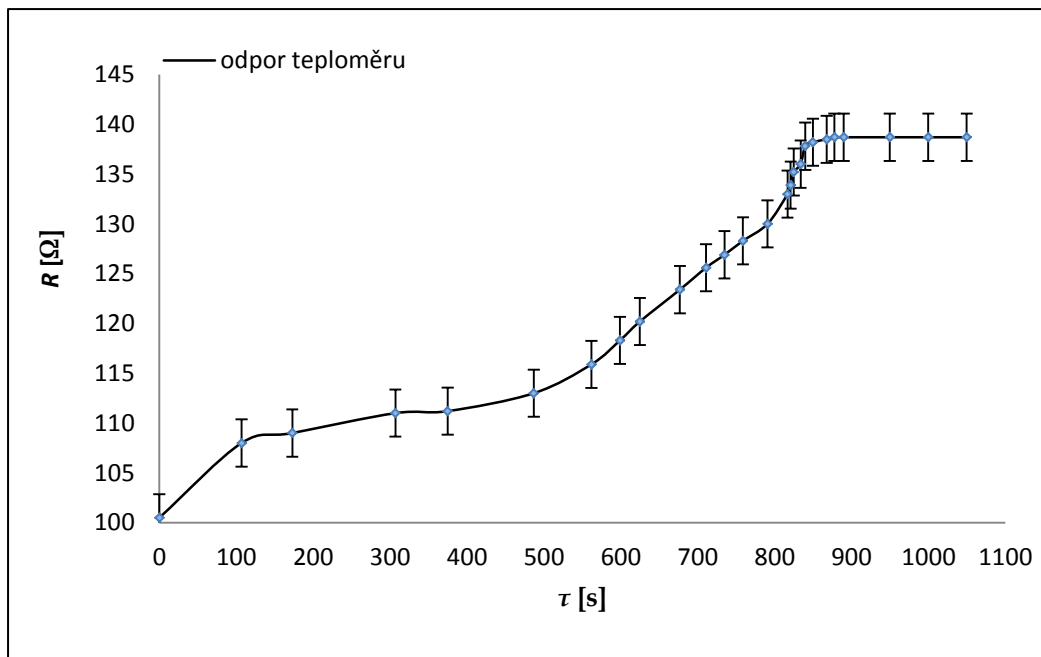
Pro další výpočty v této práci budeme používat kalibrační koeficienty příslušející skutečně naměřeným teplotám fázových přechodů.

Nyní se podívejme na časovou závislost odporu R platinového teploměru a termoelektrického napětí ε termočlánku při varu vody. Naměřené údaje shrnuje Tabulka 3, vykreslené závislosti zobrazují Grafy 3a, 3b. Průběh termoelektrického napětí registroval program *Zapisovač*.

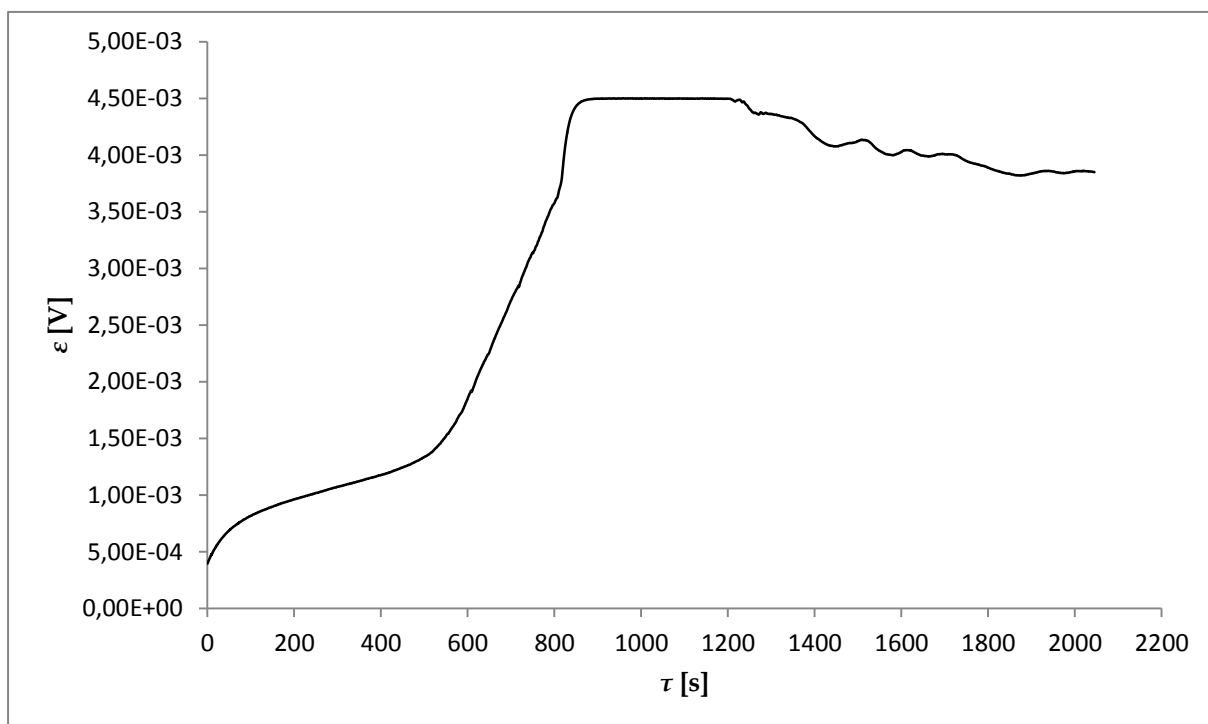
Tabulka 3: Časová závislost odporu teploměru při varu vody

τ [s]	R [Ω]
0	100,5
107	108,0
173	109,0
307	111,0
375	111,2
487	113,0
562	115,9
599	118,3
625	120,2
677	123,4
711	125,6
735	126,9
759	128,3

τ [s]	R [Ω]
791	130,0
817	133,0
821	133,9
825	135,2
834	136,0
840	137,8
850	138,2
868	138,5
878	138,7
890	138,7
950	138,7
1000	138,7
1050	138,7



Graf 3a: Ohřev a var vody (časová závislost odporu teploměru)



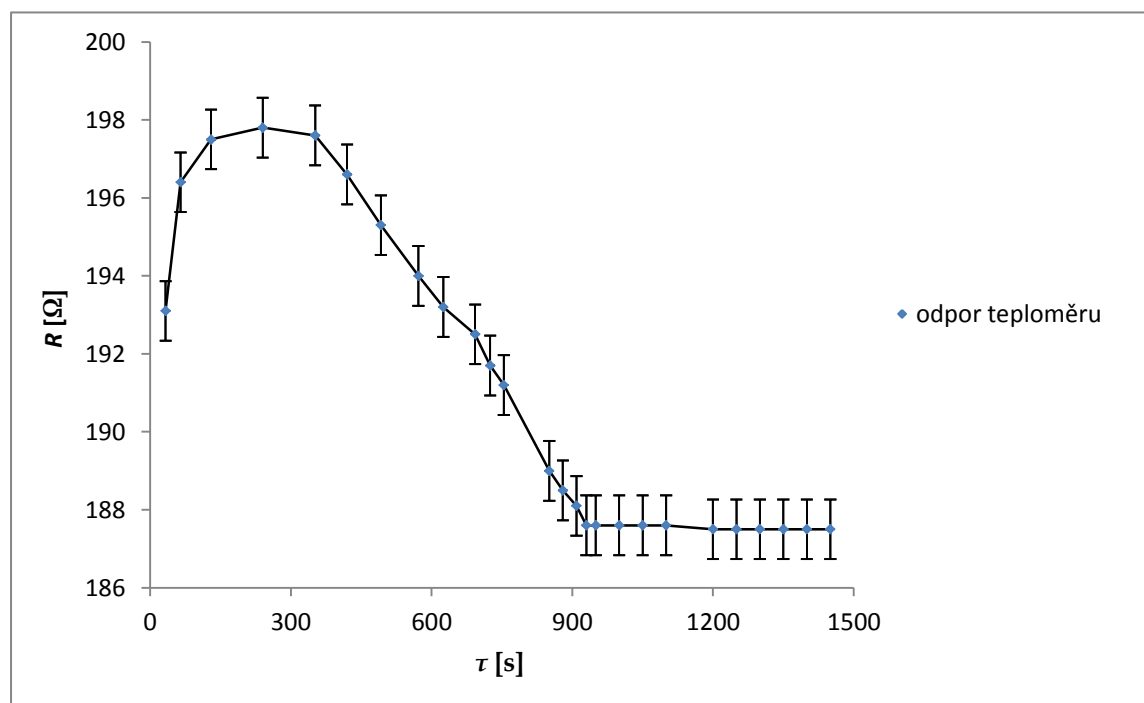
Graf 3b: Ohřev a var vody (časová závislost termoelektrického napětí termočlánku)

Nyní se podíváme na časovou závislost odporu a termoelektrického napětí při tuhnutí cínu. Získané hodnoty shrnuje Tabulka 4, výsledné závislosti vykreslují Grafy 4a, 4b.

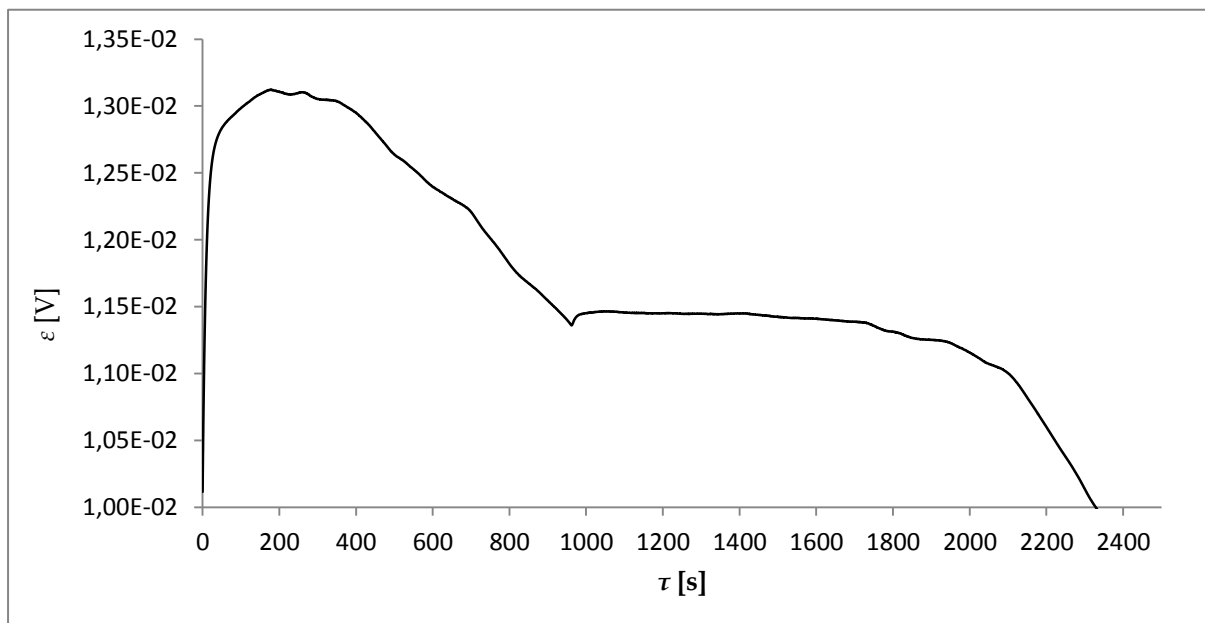
Tabulka 4: Časová závislost odporu teploměru při tuhnutí cínu

τ [s]	R [Ω]
33	193,1
65	196,4
130	197,5
240	197,8
352	197,6
420	196,6
492	195,3
572	194,0
625	193,2
693	192,5
725	191,7
754	191,2
851	189,0

τ [s]	R [Ω]
880	188,5
909	188,1
930	187,6
950	187,6
1000	187,6
1050	187,6
1100	187,6
1200	187,5
1250	187,5
1300	187,5
1350	187,5
1400	187,5
1450	187,5

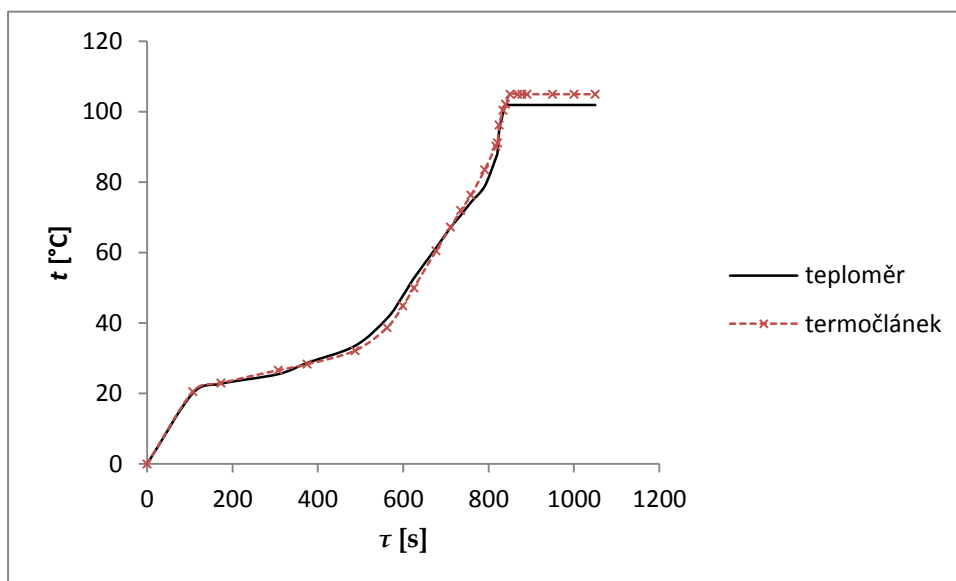


Graf 4a: Tuhnutí cínu (časová závislost odporu teploměru)

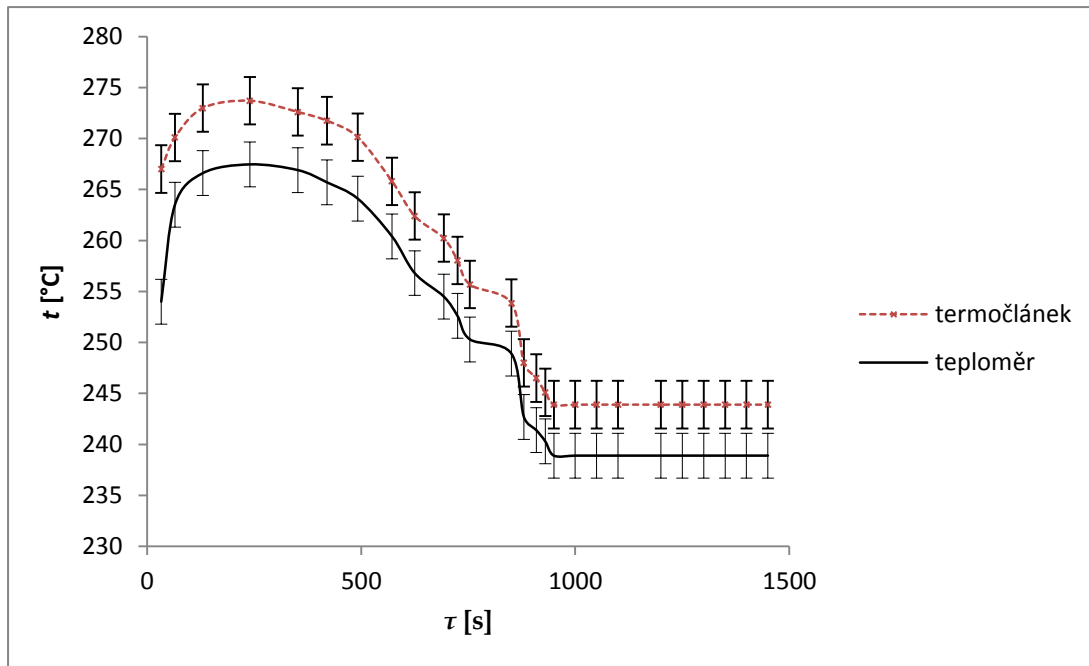


Graf 4b: Tuhnutí cínu (časová závislost termoelektrického napětí termočlátku)

Nyní můžeme na základě kalibračních koeficientů a určených závislostí odporu a termoelektrického napětí na čase určit závislosti teplot na čase. Výsledky jsou shrnuty v Grafech 5a, 5b. K výpočtu byly použity kalibrační koeficienty příslušející skutečně naměřeným teplotám varu vody a tuhnutí cínu. Zpracováno pomocí programů *WolframAlpha* a *Microsoft Excel 2010*. Chybové úsečky nejsou zobrazeny, protože by graf činily nepřehledným.



Graf 5a: Závislost teploty na čase při varu vody



Graf 5b: Závislost teploty na čase při tuhnutí cínu

Diskuze výsledků

Prvním problémem, na který jsme narazili, byla neshoda mezi předpokládanými a skutečnými teplotami varu vody a tuhnutí cínu. To mohlo být s největší pravděpodobností způsobeno buď chybou samotného měřicího přístroje, nebo chemickými nečistotami v použité vodě a cínu. Místo destilované vody jsme použili vodu kohoutkovou, cín mohl obsahovat malé množství nějaké příměsi. Navíc cín tuhne postupně od povrchu, což také mohlo hrát roli.

Spoj termočlánek S_1 jsme udržovali na teplotě $t_1 = 0 \text{ °C}$ tak, že jsme kontakt ponořili do termosky s ledem. Je otázka, nakolik byla tato termoska spolehlivá a jestli skutečně udržovala konstantní nulovou teplotu ledové směsi během celého měření.

Nicméně jsme provedli výpočet kalibračních koeficientů pro předpokládané i skutečně naměřené hodnoty fázových přeměn. K dalším výpočtům jsme používali kalibrační koeficienty odpovídající skutečně naměřeným teplotám fázových přeměn.

Další zajímavé neshody si můžeme všimnout v grafech teplotní závislosti na čase. Zatímco v případě varu vody křivky teploměru a termočlánek téměř dokonale splývají, v případě tuhnutí cínu mají sice křivky naprosto stejný tvar, ale jsou vzájemně posunuté, což by ukazovalo na systematickou chybu. Zatímco průběh termoelektrického napětí na termočlánek zaznamenával počítač, odpor jsme byli nuceni zaznamenávat ručně, přesnost experimentu by tedy jistě byla vyšší, kdyby i odpor byl zaznamenáván elektronicky.

Závěr

Vůči skutečně naměřeným teplotám fázových přeměn byly určeny kalibrační koeficienty platinového odporového teploměru jako

$$R_0 = (100,5 \pm 0,1) \Omega$$

$$A = (3,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$$

$$B = (-3,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-7} (\text{°C})^{-2}$$

a termočláunku měď-konstantan jako

$$a = (0,004 \pm 0,003) \text{ mV}$$

$$b = (3,96 \pm 0,04) \cdot 10^{-2} \text{ mV} \cdot (\text{°C})^{-1}$$

$$c = (3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \text{ mV} \cdot (\text{°C})^{-2}$$

Byly vykresleny kalibrační křivky a grafy závislostí odporu, resp. termoelektrického napětí na čase a závislosti teploty na čase pro odporový teploměr i termočlánek.

Seznam použité literatury

[1] Kolektiv ZFP KVOF MFF UK. Studijní text k měření Studium otáčení tuhého tělesa [cit. 2. 4. 2018]. URL:

http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_108.pdf

[2] Wikipedie, otevřená encyklopedie. Atmosférický tlak. [cit. 21. 4. 2018]

URL: https://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A9rick%C3%BD_tlak

[3] J. Mikulčák a kol.: Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy, SPN, Praha 1988, str. 118