

(VIII) Kalibrace odporového teploměru a termočlátku - fázové přechody

Přemysl Šťastný

3. května 2018

1 Pracovní úkoly

Okalibrujte pomocí bodu tání, bodu varu vody a bodu tuhnutí cínu:

- ▷ platinový odporový teploměr (určete konstanty R_0 , A , B).
- ▷ termočlánek měď-konstantan (určete konstanty a , b , c)

Registrujte časový průběh termoelektrického napětí termočlátku $\epsilon(T)$ a odporu platinového teploměru $R(T)$ při ohřevu a varu vody a při tuhnutí cínu. Změřené průběhy graficky znázorněte.

Nakreslete graf teplotní závislosti odporu R (kalibrační křivka odporového teploměru) a graf teplotní závislosti termoelektrického napětí ϵ (kalibrační křivka termočlátku).

Ze závislosti $\epsilon(T)$ a $R(T)$ dle bodu 2 a kalibračních hodnot dle bodu 1 určete časové závislosti $t_R(T)$ a $t_\epsilon(T)$ teplot měřených odporovým teploměrem a termočlánekem při ohřevu vody a tuhnutí cínu. Určené závislosti porovnejte.

2 Konvence

Desetinná čárka a desetinná tečka jsou vzájemně zaměnitelné a nesou stejný význam.

3 Vybrané pomůcky

Měřič času v PC

- ▷ Odchylka není uvažována¹

Dvojitý termočlánek obsahující dva svařené spoje kovových vodičů měď-konstantan

Měřič napětí k termočlátku²

- ▷ Odchylka: $35 \cdot 10^{-6} U_{rozsah} + 90 \cdot 10^{-6} U$
- ▷ Nastavený rozsah: $U_{rozsah} = 100mV$

¹Skoro nic nemění

² U označuje měřené napětí, U_{rozsah} nastavený rozsah

Platinový odporový teploměr

Ohmmetr k odporovému teploměru

▷ Odchylka: 0.5% vzhledem z měřené hodnoty

4 Postup

Nejdříve byl rozdrcen led, byla do něj vlita voda a vložen jeden z termočlánků. Směs voda-led budu v dalším textu nazývat ledová tříšť.

Platinový teploměr byl umístěn do ledové tříště a byl změřen jeho odpor. Bylo učiněno pozorování, že pokud se druhý termočlánek ponoří do ledové tříšti, je termoelektrické napětí termočlánku v rámci odchylky 0.

Nyní popíšu, jak probíhalo měření termoelektrického napětí termočlánku, a odporu platinového teploměru při ohřevu a varu vody, nebo při tuhnutí cínu.

Druhý z termočlánků a platinový teploměr (zároveň) byly umístěny buď do vody, která byla ohřívána, nebo do roztaveného cínu. Pak byl na počítači spuštěn skript, který stopoval čas a v pravidelných intervalech snímal ze senzoru termoelektrické napětí. Experimentátor během toho v pravidelných intervalech zapisoval měřený odpor platinového teploměru. Měření bylo ukončeno, jakmile experimentátor usoudil, že má dostatek dat.

V případě vody bylo měření zahájeno, jakmile se začala ohřívat. Po té dosáhla varu a vařič byl vypnut. Pak se nechala chvíli zchlazovat a měření bylo ukončeno. U vody proběhli celkem 2 měření. Zpracované bude pouze druhé.

V případě cínu byl cín nejdříve roztaven v pídce. Po té byla pícka vypnuta a do roztaveného cínu byli vloženy senzory.

5 Podmínky měření

Teplota vzduchu: $(24,6 \pm 0,5)^\circ C$

Vlhkost vzduchu: $(26,3 \pm 0,5)\%$

Tlak vzduchu: $(997,1 \pm 1)hPa$

6 Teorie

6.1 Značení

R - odpor platinového teploměru

R_0 , A , B - kalibrační konstanty platinového teploměru

a , b , c - kalibrační konstanty termočlánku

t - teplota měřeného roztoku

t_0 - teplota ledové tříšti

T - čas

ϵ - termoelektrické napětí termočlánku

R - odpor platinového teploměru

6.2 Použité vztahy

Pro kalibraci platinového teploměru byl použit vztah [1]

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

Pro kalibraci dvojitého termočlánku byl použit vztah [1]

$$\epsilon = a + b(t - t_0) + c(t - t_0)^2 \quad (2)$$

Z pozorování v postupu a ze zákona zachování energie víme, že $a = 0$ a tedy

$$\epsilon = b(t - t_0) + c(t - t_0)^2 \quad (3)$$

Definujme kritický bod jako čas, kdy docházelo buď k varu u vody, nebo k tuhnutí cínu. Konstanty b a c byli získány fitováním vztahu (3) přes data získaná v kritických bodech. Každý kritický bod měl ve fitu stejnou váhu a do chyby fitu byla připočítána systematická chyba.

Konstanty R_0 , A a B získáme fitováním vztahu (1) přes data naměřená v kritických bodech a hodnotu naměřenou v ledové tříšti. Váha obou kritických bodů je ve fitu stejná. Váha dat libovolného kritického bodu je stejná jako váha odporu teploměru v ledové tříšti.

Jakmile budou spočítány kalibrační konstanty, lze vytvořit časové závislosti $t_R(T)$ a $t_\epsilon(T)$. Pro platinový teploměr platí

$$t = \frac{\sqrt{R_0} * \sqrt{A^2 R_0 + 4BR - 4BR_0} - AR_0}{2BR_0} \quad (4)$$

Pro termočlánek platí

$$t = \frac{2ct_0 + \sqrt{4c\epsilon + b^2} - b}{2c} \quad (5)$$

7 Konstanty

Normální barometrický tlak je [1]

$$p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 Pa \quad (6)$$

Pro účely měření je potřeba znát teplotu varu vody uvnitř baňky, ve které byla voda zahřívána. Teplota varu vody závisí na okolním tlaku. Pro její výpočet byl použit vztah: [1]

$$t_p = 100,0 + 28,0216 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,652 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \quad (7)$$

V rámci odhadu odchylky je třeba uvážit, že uvnitř baňky bude trochu jiný tlak, než vně.

$$t_p = (99,55 \pm 0,3)^\circ C \quad (8)$$

Během měření tuhnutí cínu bylo zjištěno, že není příliš chemicky čistý. (derivace funkce během tuhnutí byla ostře menší než 0 /velmi hrubým odhadem $\tan(-10^\circ)$ /). Tento fakt je potřeba vzít v úvahu při určování odchylky teploty tuhnutí cínu. Ta je: [1]

$$t_c = (232 \pm 1)^\circ C \quad (9)$$

Uvažuje se bod tání vody

$$t_0 = (0,0 \pm 0,1)^\circ C \quad (10)$$

Absolutní nula je přibližně

$$(273,1498 \pm 0,0001)^\circ C = 0K \quad (11)$$

8 Výsledky

Naměřená napětí nejsou uvedena v podobě tabulky, ale pouze v podobě grafu, neboť se tisíce naměřených hodnot počítačem se na rozumné množství papíru nevejde.

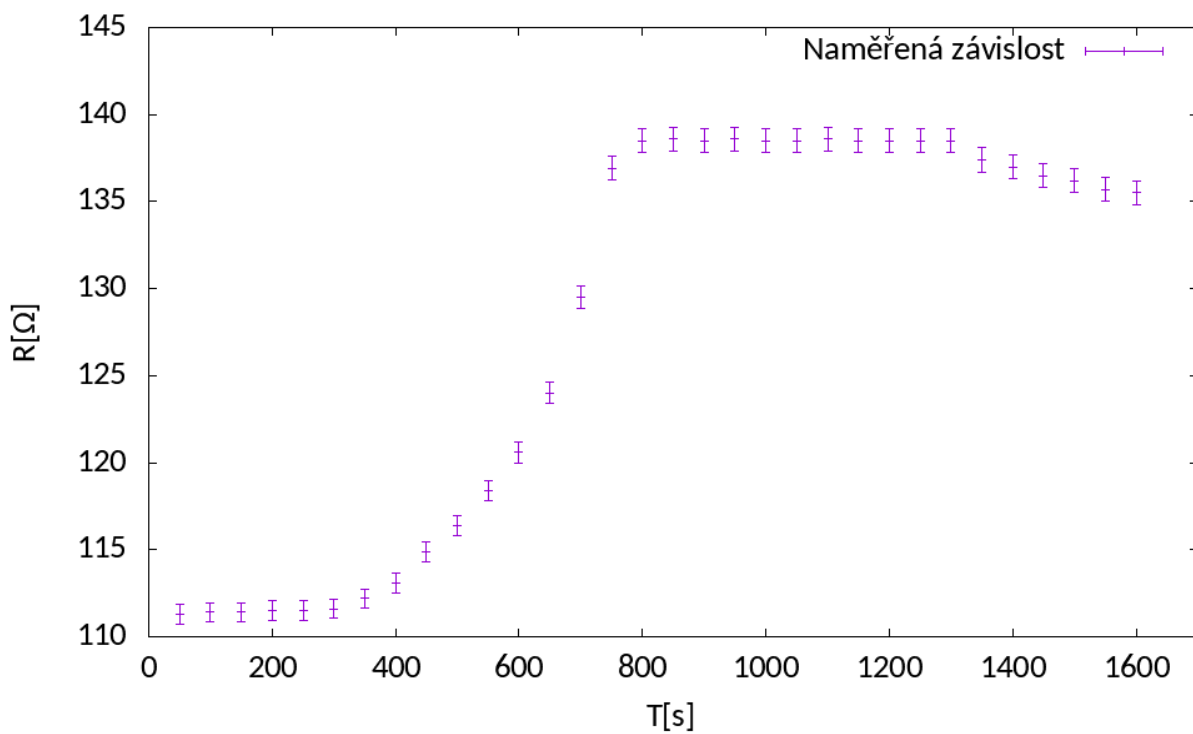
Pro kalibraci byla u vody použita data z časového rozsahu $T \in [900; 1250]s$ a u cínu $T \in [550; 900]s$.

Platinový teploměr měl v ledu odpor $(100,5 \pm 0,5)\Omega$.

8.1 Měření odporu platinového teploměru na čase $R(T)$

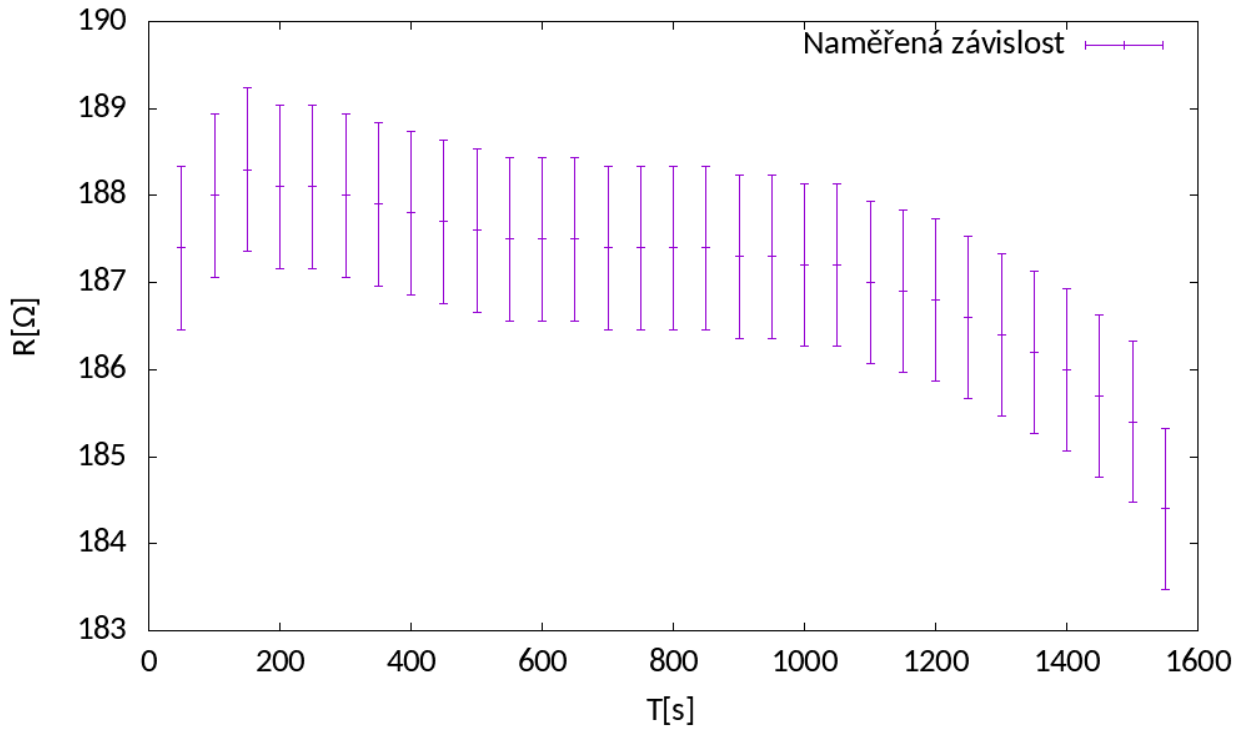
8.1.1 Voda

$T[s]$	$R[\Omega]$	$T[s]$	$R[\Omega]$
50	111,3	100	111,4
150	111,4	200	111,5
250	111,5	300	111,6
350	112,2	400	113,1
450	114,9	500	116,4
550	118,4	600	120,6
650	124,0	700	129,5
750	136,9	800	138,5
850	138,6	900	138,5
950	138,6	1000	138,5
1050	138,5	1100	138,6
1150	138,5	1200	138,5
1250	138,5	1300	138,5
1350	137,4	1400	137,0
1450	136,5	1500	136,2
1550	135,7	1600	135,5



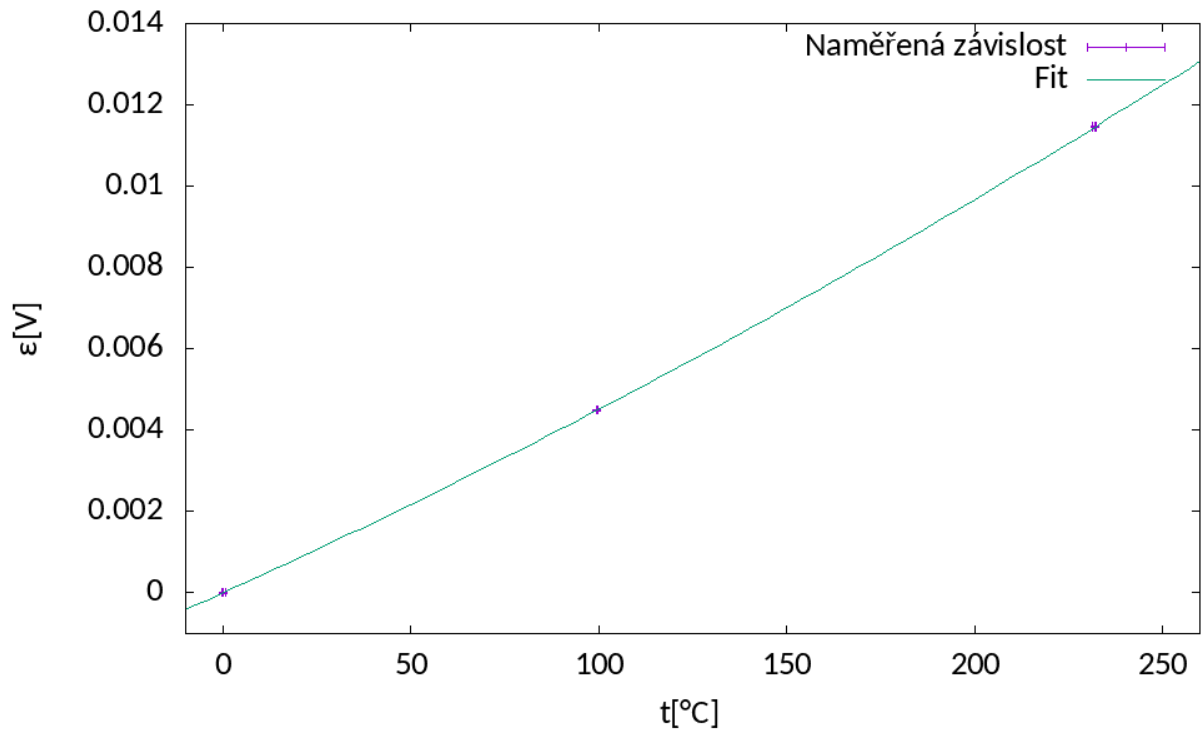
8.1.2 Cín

$T[s]$	$R[\Omega]$	$T[s]$	$R[\Omega]$
50	187,4	100	188,0
150	188,3	200	188,1
250	188,1	300	188,0
350	187,9	400	187,8
450	187,7	500	187,6
550	187,5	600	187,5
650	187,5	700	187,4
750	187,4	800	187,4
850	187,4	900	187,3
950	187,3	1000	187,2
1050	187,2	1100	187,0
1150	186,9	1200	186,8
1250	186,6	1300	186,4
1350	186,2	1400	186,0
1450	185,7	1500	185,4



8.2 Kalibrace

8.2.1 Termočlánek

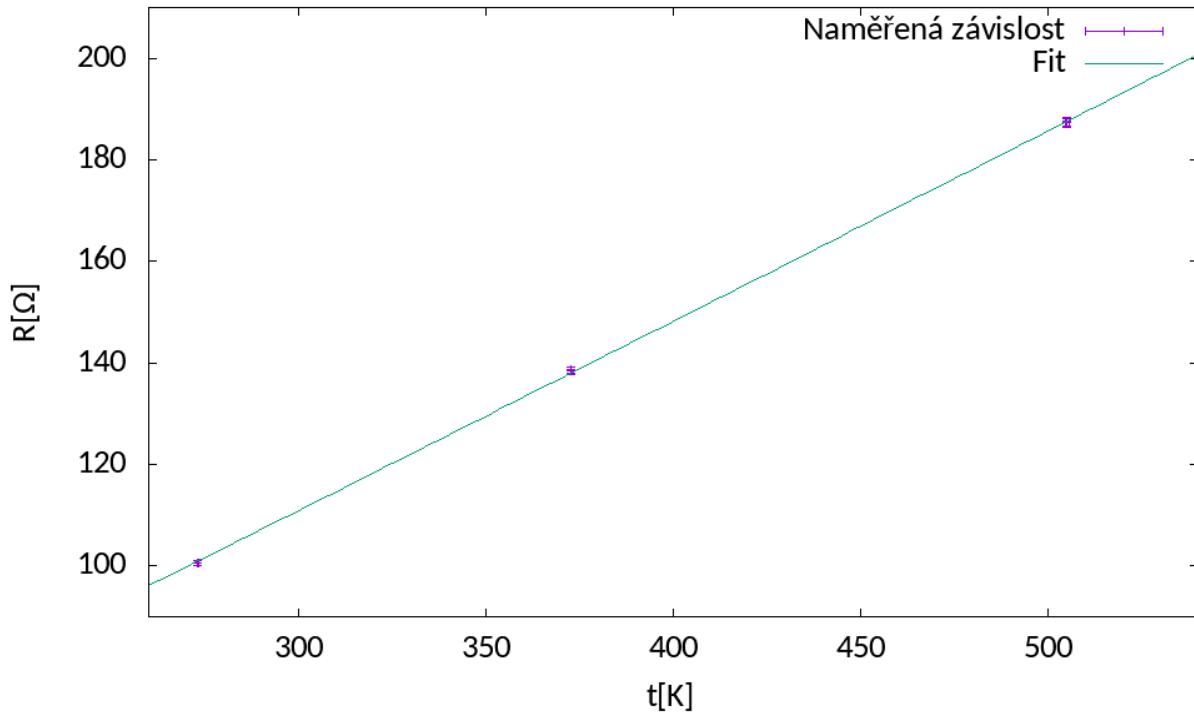


$$a = (0 \pm 0,01)V \quad (12)$$

$$b = (4,19 \pm 0,04) * 10^{-5} \frac{V}{K} \quad (13)$$

$$c = (3,22 \pm 0,03) * 10^{-8} \frac{V}{K^2} \quad (14)$$

8.2.2 Rezistor



Chyba fitu je tak velká, neboť není dostatek různě umístěných bodů, které by dokázali upřesnit, jak k R_0 , A , B dokonvergovat. To ovšem nesnižuje kvalitu kalibrace pro hodnoty blízké měřeným, proto je uvedeno o desetinné místo více. Nejistota při velikosti bodu varu resp. bodu tání vody resp. cínu ji velmi navýšili.

$$A = (1,5 \pm 14) \frac{1}{K} \quad (15)$$

$$B = (4,1 \pm 30) \cdot 10^{-5} \frac{1}{K^2} \quad (16)$$

$$R_0 = (0,23 \pm 2,1) \Omega \quad (17)$$

8.3 Závislost $t_R(T)$ a $t_\epsilon(T)$

Z důvodů již udaných a také i z důvodu toho, že napětí na termočlánek v době změny teplot měřené látky dost záviselo na náhodných podmínkách (stačilo zafoukat a došlo ke značnému poklesu) jsou grafy pouze orientační a proto v nich nejsou errorbary.

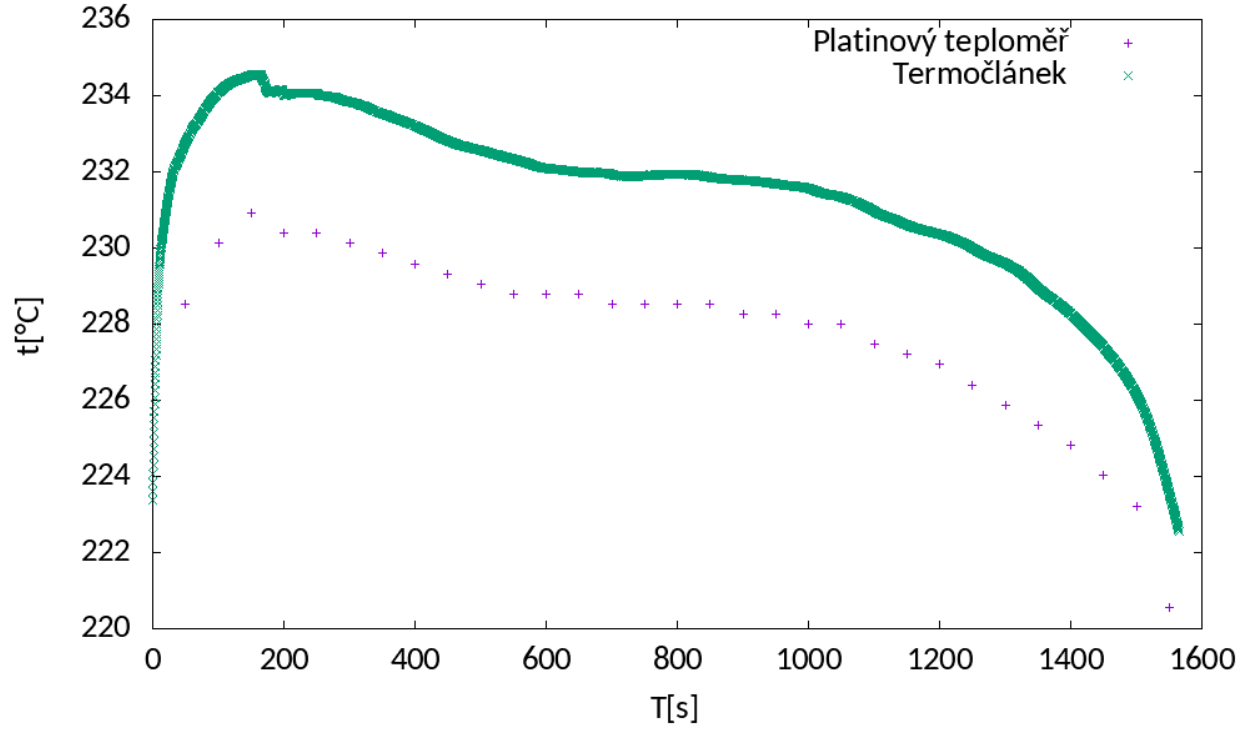
Teploty zde získané jsou dopočítané ze vztahů (5) a (4).

8.3.1 Závislost $t_R(T)$

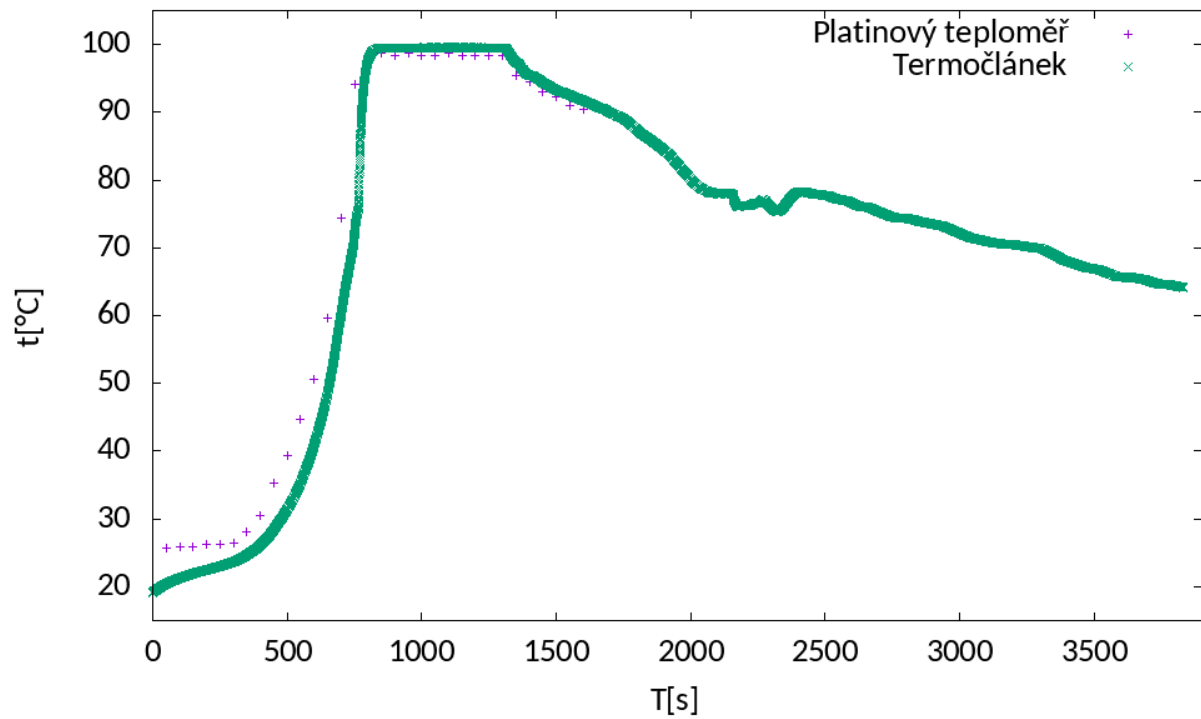
V levé části tabulky je měření cínu. V pravé vody. Jelikož pro každou teplotu je kalibrace jinak přesná, je udáno přehnané množství desetinných míst.

$T[s]$	$R[\Omega]$	$t[^\circ C]$	$T[s]$	$R[\Omega]$	$t[^\circ C]$
50	187.4	228.5	50	111.3	25.7
100	188.0	230.1	100	111.4	26.0
150	188.3	230.9	150	111.4	26.0
200	188.1	230.4	200	111.5	26.2
250	188.1	230.4	250	111.5	26.2
300	188.0	230.1	300	111.6	26.5
350	187.9	229.9	350	112.2	28.1
400	187.8	229.6	400	113.1	30.5
450	187.7	229.3	450	114.9	35.3
500	187.6	229.1	500	116.4	39.3
550	187.5	228.8	550	118.4	44.7
600	187.5	228.8	600	120.6	50.6
650	187.5	228.8	650	124.0	59.7
700	187.4	228.5	700	129.5	74.4
750	187.4	228.5	750	136.9	94.2
800	187.4	228.5	800	138.5	98.4
850	187.4	228.5	850	138.6	98.7
900	187.3	228.3	900	138.5	98.4
950	187.3	228.3	950	138.6	98.7
1000	187.2	227.9	1000	138.5	98.4
1050	187.2	227.9	1050	138.5	98.4
1100	187.0	227.5	1100	138.6	98.7
1150	186.9	227.2	1150	138.5	98.4
1200	186.8	226.9	1200	138.5	98.4
1250	186.6	226.4	1250	138.5	98.4
1300	186.4	225.9	1300	138.5	98.4
1350	186.2	225.3	1350	137.4	95.5
1400	186.0	224.8	1400	137.0	94.4
1450	185.7	224.0	1450	136.5	93.1
1500	185.4	223.3	1500	136.2	92.3
1550	184.4	220.6	1550	135.7	91.0
			1600	135.5	90.4

8.3.2 Měření cínu



8.3.3 Měření vody



Závislost platinového teploměru v pravé polovině obrázku schází, neboť úkoly nevyžadovali

její měření mimo ohřev a var vody.

9 Diskuze

Hodně z úvah, které by jinak měli být v diskuzi, je rozprostřených po celém textu, neboť byli nutné pro ospravedlnění provedených postupů. Nebudu je zde příliš opakovat, rád bych na tento fakt pouze upozornil.

Hlavní prapříčinou nepřesností byla chemická nečistota látek a přetlak v baňce na ohřev vody. Bylo nutno zvednout odchylky bodů varů a tání tak, aby byli vzaty v úvahu. Použitá voda a led nebyli destilovány a cín je podle naměřených dat chemicky nečistý.

Kalibrační konstanty termočládku jsou oproti platinovému teploměru jednoznačné. V místech malých změn teploty můžeme použít data naměřené termočládku jako referenční hodnoty. V místech větších změn teploty bohužel máme problém s vlivy náhodného charakteru. (popsáno dříve)

Pro platinový teploměr zvedla nejistota velikosti bodů varů a tání relativní odchylky až na 800%, neboť byla příliš velká variabilita, jak k výsledným hodnotám dokonvergovat. Podíváme-li se na graf 8.3.3 a graf 8.3.2, vidíme, že v místech malé absolutní hodnoty derivace teploty na čase opisují křivky platinového teploměru a termočládku stejné tvary. Jejich vzdálenost je v rámci stanovené odchylky bodu varu a bodu tuhnutí vody a cínů v pořádku.

Co z toho vyplývá? Pro měřené teploty byla kalibrace provedena úspěšně. Platí-li vztahy uvedené v [1], u termočládku budou kalibrační konstanty platné i mimo měřenou oblast. U rezistorového teploměru tomu tak pravděpodobně nebude.

U měření cínu si můžeme všimnout u obou senzorů zvláštního náběhu. Ten je způsoben tím, že byli senzory ponořeny do roztaveného cínu nezahřáté

10 Závěr

Kalibrační konstanty termočládku byli stanoveny na

$$a = (0 \pm 0,01)V \quad (18)$$

$$b = (4,19 \pm 0,04) * 10^{-5} \frac{V}{K} \quad (19)$$

$$c = (3,22 \pm 0,03) * 10^{-8} \frac{V}{K^2} \quad (20)$$

Kalibrační konstanty platinového teploměru byli stanoveny na

$$A = (1,5 \pm 14) \frac{1}{K} \quad (21)$$

$$B = (4,1 \pm 30) \cdot 10^{-5} \frac{1}{K^2} \quad (22)$$

$$R_0 = (0,23 \pm 2,1)\Omega \quad (23)$$

Všechny zadané závislosti byli úspěšně určeny a zaneseny do grafů. Časová závislost $t_R(T)$ a $t_\epsilon(T)$ v rámci odchylek bodů varů a bodů tání vody a cínu vzájemně odpovídají.

Reference

- [1] *VIII. Kalibrace odporového teploměru a termočlánku – fázové přechody* [online]. , 4 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z:
https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_108.pdf