

1 Pracovní úkoly

1. Změřte statickou charakteristiku termistoru pro proudy do 25 mA a graficky ji znázorněte. V případě záznamu měření počítačem vytiskněte.
2. Změřte teplotní závislost odporu termistoru v teplotním intervalu přibližně 180 až 350 K a graficky znázorněte (ev. vytiskněte).
3. Graficky znázorněte závislost logaritmu odporu R termistoru na $1/T$ a vyhodnoťte velikost materiálových veličin R_∞ a B , aktivační energie U a teplotního součinitele odporu α při pokojové teplotě.
4. Stanovte teplotu termistoru v maximu charakteristiky, případně v některých dalších bodech a tepelný odpor K .

2 Teoretická část

Termistor je polovodičová součástka, jejíž odpor silně závisí na teplotě. V oblasti teplot, kdy převládá přímá vodivost, můžeme odpor termistoru vypočítat dle vztahu [1]

$$R = R_\infty \exp(B/T) \quad (1)$$

kde R_∞ je konstanta závisující na materiálu a rozměrech polovodiče a B je veličina charakterizující teplotní citlivost termistoru.

Veličina B souvisí s aktivační energií ΔU rovnicí

$$\Delta U = 2kB \quad (2)$$

kde k je Boltzmannova konstanta. Hodnota aktivační energie se v literatuře často vztahuje na jeden mol látky. Aktivační energii v jednotkách $J \cdot \text{mol}^{-1}$ označíme ΔU_m a její hodnotu vypočítáme přenásobením (2) Avogadrovým číslem N_A

$$\Delta U_m = 2kN_A B \quad (3)$$

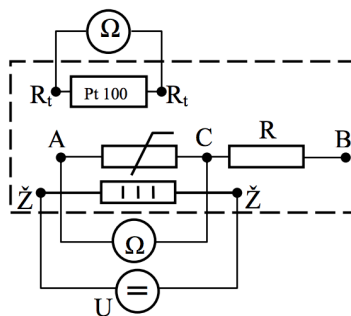
Konstanty B a R_∞ můžeme určit, pokud změříme závislost odporu termistoru R v závislosti na jeho teplotě T , neboť podle (1) bude platit vztah

$$\ln(R) = \ln(R_\infty) + B \frac{1}{T} \quad (4)$$

Tuto závislost můžeme změřit, pokud zapojíme obvod podle obrázku 1. Změřením odporu platinového teploměru R_t , který je v kontaktu s termistorem, nepřímo určíme teplotu termistoru T , neboť závislost $R_t(T)$ je lineární a tudíž platí

$$T = \frac{R_t - R_0}{\alpha_{Pt} R_0} + 273,15\text{ K} \quad (5)$$

kde α_{Pt} je teplotní součinitel odporu teploměru a R_0 je jeho odpor při teplotě 0°C . Odpor termistoru R měříme přímo a v obvodu máme možnost zapnout ohřívání topnou spirálou.



Obrázek 1: Zapojení termistoru pro měření teplotní závislosti jeho odporu

Další veličinou charakterizující teplotní závislost odporu termistoru je teplotní součinitel odporu α , který je definován vztahem

$$\alpha = \frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT} \quad (6)$$

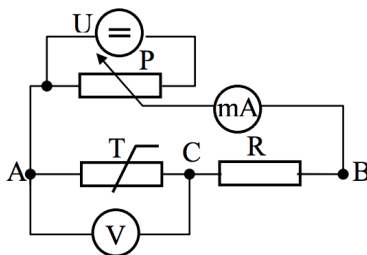
Pokud platí (1), je zřejmé, že α nebude konstantní. Konkrétně pro něj bude platit

$$\alpha(T) = -\frac{B}{T^2} \quad (7)$$

Kromě teplotní závislosti odporu termistoru můžeme také změřit jeho statickou charakteristiku, tedy závislost napětí na termistoru U na procházejícím proudu I . Při průchodu proudu se bude termistor zahřívat, dokud se neustálí rovnováha mezi elektrickým příkonem $P_E = UI$ a tepelným výkonem odváděným do okolí $P_T = (T - T_o)/K$, kde T_o je teplota okolí a K tepelný odpor termistoru. V rovnováze $P_E = P_T$ pak bude platit

$$T = KP_E + T_o \quad (8)$$

Statickou charakteristiku termistoru můžeme změřit při zapojení obvodu podle obrázku 2. Za termistorem je zařazen ochranný odpor, který omězuje proud v obvodu, aby se termistor neznečivil.



Obrázek 2: Zapojení pro měření statické charakteristiky termistoru

Jelikož platí vztah $P_E = U^2/R$, tak podle rovnic (1) a (7) můžeme vyjádřit závislost napětí na termistoru na jeho teplotě

$$U = \sqrt{\frac{T - T_o}{K} R_\infty \exp(B/T)} \quad (9)$$

která nabývá maxima při teplotě

$$T_m = \frac{1}{2} \left(B - \sqrt{B^2 - 4BT_o} \right) \quad (10)$$

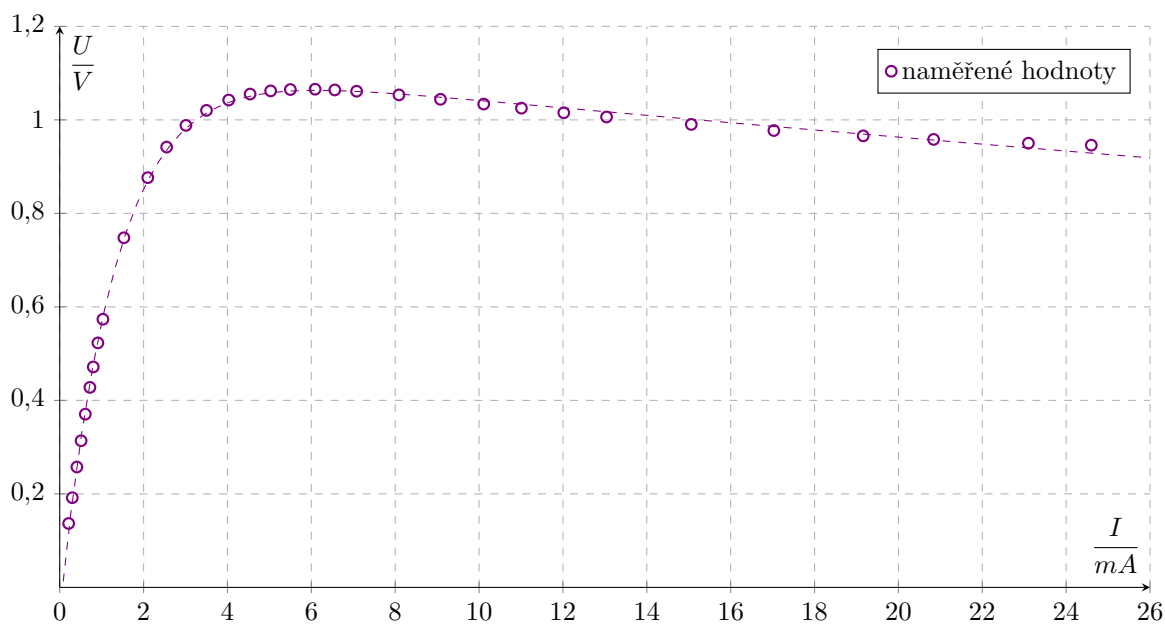
3 Výsledky měření

K měření odporů, napětí i proudů jsem použil dva stejné multimetry METEX MXD-4660 A, jejichž přesnosti jsou uvedené v tabulce 1.

Tabulka 1: Přesnost použitých multimetrů

Funkce	Rozsah	Přesnost
Odpor	200 Ω	$\pm 0,2\% + 5 \text{ dig}$
	2 $k\Omega$	$\pm 0,15\% + 3 \text{ dig}$
	20 $k\Omega$	$\pm 0,15\% + 3 \text{ dig}$
	200 $k\Omega$	$\pm 0,15\% + 3 \text{ dig}$
DC proud	2 mA	$\pm 0,3\% + 3 \text{ dig}$
	20 mA	$\pm 0,3\% + 3 \text{ dig}$
	200 mA	$\pm 0,3\% + 3 \text{ dig}$
	20 A	$\pm 0,5\% + 3 \text{ dig}$
DC napětí	200 mV	$\pm 0,05\% + 3 \text{ dig}$
	2 V	$\pm 0,05\% + 3 \text{ dig}$
	20 V	$\pm 0,05\% + 3 \text{ dig}$
	200 V	$\pm 0,05\% + 3 \text{ dig}$

Začal jsem s měřením statické charakteristiky termistoru při zapojení obvodu podle obrázku 2. Po každé změně proudu jsem počkal, až se hodnoty proudů a napětí na multimetrech ustálí a hodnoty jsem zaznamenával pomocí programu Termistor. Výstupní graf z programu Termistor závislosti $U(I)$ je v příložených materiálech. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 2, kde chyby měření napětí a proudů počítám z přesností uvedených v tabulce 1. Vždy jsem použil nejmenší možný rozsah multimetru. Naměřené hodnoty zobrazuje graf 1. Proložená křivka je pouze orientační, nebyla použita k dalším výpočtům.



Graf 1: Statická charakteristika termistoru

Tabulka 2: Statická charakteristika termistoru

$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{U}{mV}$	$\frac{\sigma_U}{mV}$
0,213	0,001	136,7	0,4
0,301	0,001	191,8	0,4
0,409	0,002	257,5	0,4
0,506	0,002	313,7	0,5
0,607	0,002	370,5	0,5
0,716	0,002	427,8	0,5
0,804	0,003	471,5	0,5
0,914	0,003	523,0	0,6
1,031	0,003	573,5	0,6
1,533	0,005	747,8	0,7
2,103	0,009	876,4	0,7
2,55	0,01	941,8	0,8
3,01	0,01	988,2	0,8
3,50	0,01	1020,3	0,8
4,03	0,02	1042,5	0,8
4,54	0,02	1055,2	0,8
5,03	0,02	1062,0	0,8
5,50	0,02	1064,9	0,8
6,09	0,02	1065,6	0,8
6,56	0,02	1064,0	0,8
7,08	0,02	1061,3	0,8
8,09	0,03	1053,4	0,8
9,08	0,03	1044,0	0,8
10,11	0,03	1033,8	0,8
11,01	0,04	1025,1	0,8
12,02	0,04	1015,2	0,8
13,04	0,04	1006,2	0,8
15,06	0,05	990,3	0,8
17,03	0,05	977,2	0,8
19,16	0,06	965,8	0,8
20,84	0,09	958,2	0,8
23,1	0,1	950,1	0,8
24,6	0,1	945,9	0,8

Pro změření teplotní závislosti odporu termistoru jsem zapojil obvod podle obrázku 1. Učitel termistor ochladil kapalným dusíkem a vložil ho do Dewarovy nádoby. Hodnoty jsem opět zaznamenával pomocí programu Termistor. První hodnoty jsem začal zapisovat v momentě, když oba odbory začaly růst a odpor platinového teploměru byl přibližně 60Ω . Když ohmometr na teploměru ukazoval hodnotu 91Ω , začal jsem termistor zahřívat topnou spirálou. Naměřené hodnoty R , R_t a jejich chyby σ_R , σ_{R_t} počítané z přesností v tabulce 1 jsou uvedené v tabulce 3.

Teplotu termistoru T , která odpovídá změřenému R_t jsem vypočítal podle rovnice (5), kde jsem podle příložených materiálů dosazoval hodnoty $\alpha_{Pt} = 3,85 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ a $R_0 = 100 \Omega$, tyto hodnoty považuji za přesné. Chybu σ_T jsem určil ze zákona šíření chyb [2]

$$\sigma_T = \frac{1}{\alpha_{Pt} R_0} \sigma_{R_t} \quad (11)$$

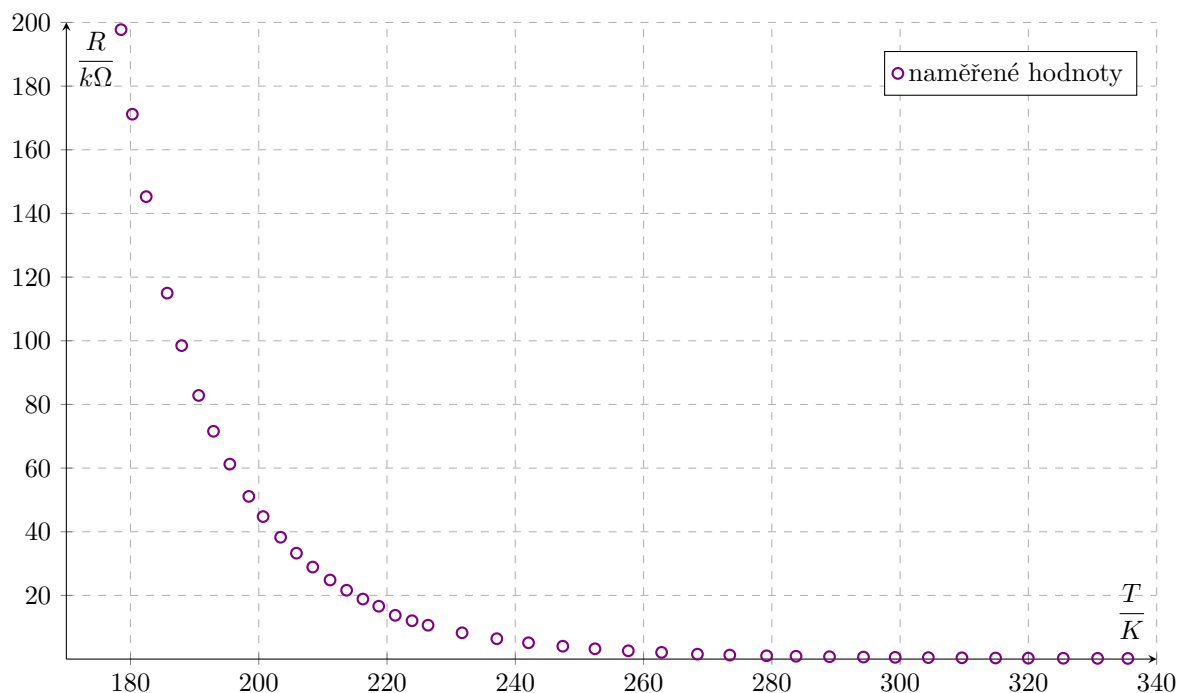
chyba převrácené hodnoty $\sigma_{1/T}$ je pak rovna

$$\sigma_{1/T} = \frac{1}{T^2} \sigma_T \quad (12)$$

Chybu $\sigma_{\ln(R)}$ jsem vypočítal podle rovnice

$$\sigma_{\ln(R)} = \frac{1}{R} \sigma_R \quad (13)$$

Všechny takto vypočítané hodnoty jsou uvedené v tabulce 3. Graf změřené závislosti $R(R_t)$ je v příložených materiálech a odpovídající závislost $R(T)$ zobrazuje graf 2.



Graf 2: Teplotní závislost odporu termistoru

Tabulka 3: Teplotní závislost odporu termistoru

$\frac{R_t}{\Omega}$	$\frac{\sigma_{R_t}}{\Omega}$	$\frac{R}{k\Omega}$	$\frac{\sigma_R}{k\Omega}$	$\frac{T}{K}$	$\frac{\sigma_T}{K}$	$\ln(R)$	$\sigma_{\ln(R)}$	$\frac{1/T}{10^{-3} K^{-1}}$	$\frac{\sigma_{1/T}}{10^{-3} K^{-1}}$
63,6	0,2	197,7	0,3	178,5	0,5	12,195	0,002	5,60	0,01
64,3	0,2	171,2	0,3	180,3	0,5	12,050	0,002	5,55	0,01
65,1	0,2	145,3	0,2	182,4	0,5	11,886	0,002	5,48	0,01
66,3	0,2	115,0	0,2	185,7	0,5	11,652	0,002	5,38	0,01
67,2	0,2	98,5	0,2	188,0	0,5	11,498	0,002	5,32	0,01
68,2	0,2	82,8	0,2	190,6	0,5	11,324	0,002	5,25	0,01
69,1	0,2	71,6	0,1	192,9	0,5	11,178	0,002	5,18	0,01
70,1	0,2	61,3	0,1	195,5	0,5	11,023	0,002	5,12	0,01
71,2	0,2	51,1	0,1	198,4	0,5	10,842	0,002	5,04	0,01
72,1	0,2	44,8	0,1	200,7	0,5	10,709	0,002	4,98	0,01
73,2	0,2	38,28	0,09	203,4	0,5	10,553	0,002	4,92	0,01
74,1	0,2	33,28	0,08	205,9	0,5	10,413	0,002	4,86	0,01
75,1	0,2	28,91	0,07	208,4	0,5	10,272	0,003	4,80	0,01
76,1	0,2	24,84	0,07	211,1	0,5	10,120	0,003	4,74	0,01
77,1	0,2	21,63	0,06	213,7	0,5	9,982	0,003	4,68	0,01
78,1	0,2	18,86	0,03	216,2	0,5	9,845	0,002	4,62	0,01
79,0	0,2	16,60	0,03	218,7	0,5	9,717	0,002	4,57	0,01
80,0	0,2	13,75	0,02	221,3	0,5	9,529	0,002	4,52	0,01
81,0	0,2	12,05	0,02	223,9	0,6	9,397	0,002	4,47	0,01
82,0	0,2	10,64	0,02	226,4	0,6	9,272	0,002	4,42	0,01
84,0	0,2	8,26	0,02	231,7	0,6	9,019	0,002	4,32	0,01
86,1	0,2	6,40	0,01	237,1	0,6	8,765	0,002	4,22	0,01
88,0	0,2	5,12	0,01	242,1	0,6	8,541	0,002	4,13	0,01
90,1	0,2	4,046	0,009	247,4	0,6	8,305	0,002	4,04	0,01
92,0	0,2	3,229	0,008	252,4	0,6	8,080	0,002	3,96	0,01
94,0	0,2	2,602	0,007	257,6	0,6	7,864	0,003	3,882	0,009
96,0	0,2	2,111	0,006	262,8	0,6	7,655	0,003	3,805	0,009
98,2	0,2	1,546	0,003	268,4	0,6	7,343	0,002	3,726	0,009
100,1	0,3	1,259	0,002	273,4	0,6	7,138	0,002	3,657	0,009
102,3	0,3	1,032	0,002	279,2	0,7	6,939	0,002	3,582	0,008
104,1	0,3	0,886	0,002	283,8	0,7	6,787	0,002	3,524	0,008
106,1	0,3	0,748	0,001	289,0	0,7	6,617	0,002	3,460	0,008
108,1	0,3	0,632	0,001	294,3	0,7	6,450	0,002	3,398	0,008
110,0	0,3	0,543	0,001	299,2	0,7	6,297	0,002	3,342	0,008
112,0	0,3	0,465	0,001	304,4	0,7	6,142	0,002	3,285	0,008
114,1	0,3	0,399	0,0009	309,6	0,7	5,989	0,002	3,230	0,008
116,1	0,3	0,3437	0,0008	314,9	0,7	5,840	0,002	3,176	0,007
118,0	0,3	0,2983	0,0007	320,0	0,7	5,698	0,003	3,125	0,007
120,1	0,3	0,2580	0,0007	325,4	0,8	5,553	0,003	3,073	0,007
122,2	0,3	0,2244	0,0006	330,8	0,8	5,413	0,003	3,023	0,007
124,0	0,3	0,1991	0,0006	335,5	0,8	5,294	0,003	2,981	0,007
126,1	0,3	0,1741	0,0006	340,9	0,8	5,160	0,003	2,933	0,007

Pro určení konstant B a R_∞ jsem nejprve použil podle (4) lineární regresi pro závislost $\ln(R)$ na $1/T$, ovšem standardní vzorce pro lineární regresi zanedbávají chyby veličiny na ose x [2] a výsledky mi tak vyšly s nesmyslně velkou přesností, neboť jak je vidět z hodnot v tabulce 3, tak je relativní chyba určení $1/T$ řádově větší než relativní chyba určení $\ln(R)$. Rozhodl jsem se proto použít lineární regresi ve tvaru

$$1/T = \frac{1}{B} \ln(R) - \frac{\ln(R_\infty)}{B} \quad (14)$$

$$1/T = C \ln(R) + D \quad (15)$$

a parametry C , D jsem z naměřených hodnot vypočítal podle standardních vzorců lineární regrese pro případ, kdy známe chyby veličiny na ose y $\sigma_{1/T}$ a nejsou konstantní [2].

Číselně vyšlo $C = (3,714 \pm 0,007) \cdot 10^{-4} K^{-1}$ a $D = (9,99 \pm 0,06) \cdot 10^{-4} K^{-1}$. Konstantu B jsem poté jednoduše určil jako $B = 1/C$ a chybu výsledku

$$\sigma_B = \frac{1}{C^2} \sigma_C \quad (16)$$

konstantu $\ln(R_\infty)$ jsem vypočítal podle $\ln(R_\infty) = -D/C$ a chybu

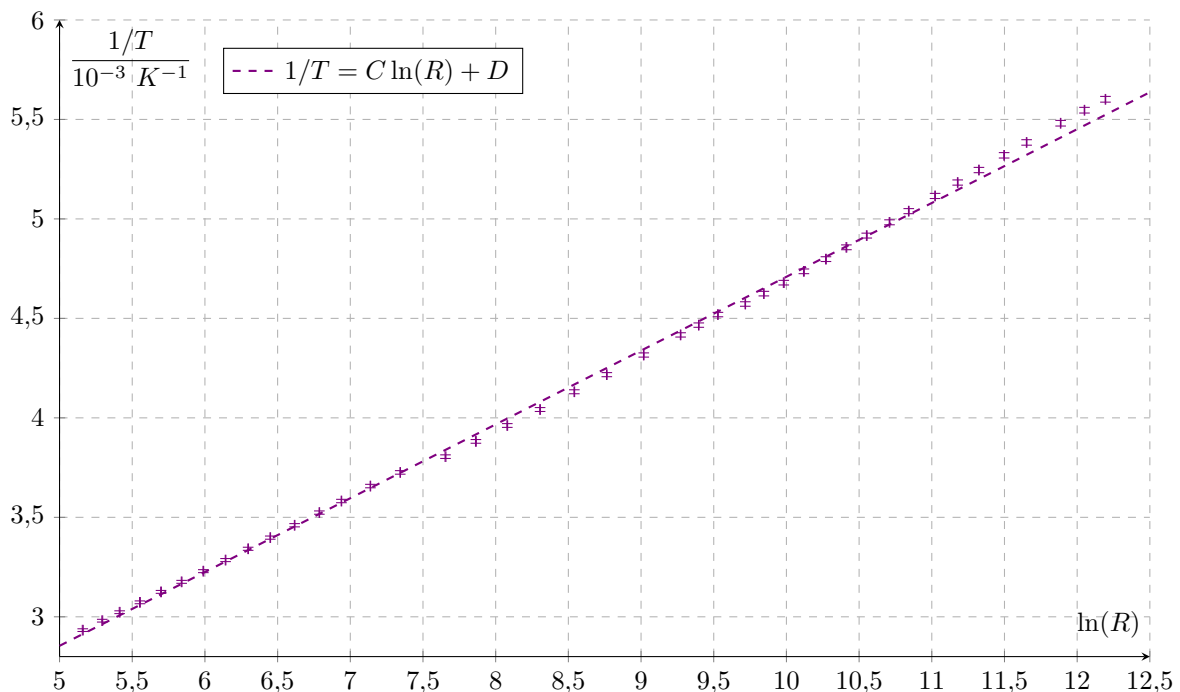
$$\sigma_{\ln(R_\infty)} = \sqrt{\frac{D^2}{C^4} \sigma_C^2 + \frac{1}{C^2} \sigma_D^2} \quad (17)$$

Dostal jsem tak $B = (2693 \pm 5) K$ a $\ln(R_\infty) = (-2,69 \pm 0,02)$. Hodnoty vypočítané z naměřených hodnot společně s proloženou křivkou $1/T = C \ln(R) + D$ zobrazuje graf 3 a dopočítanou závislost $\ln(R) = \ln(R_\infty) + B \cdot 1/T$ ukazuje graf 4.

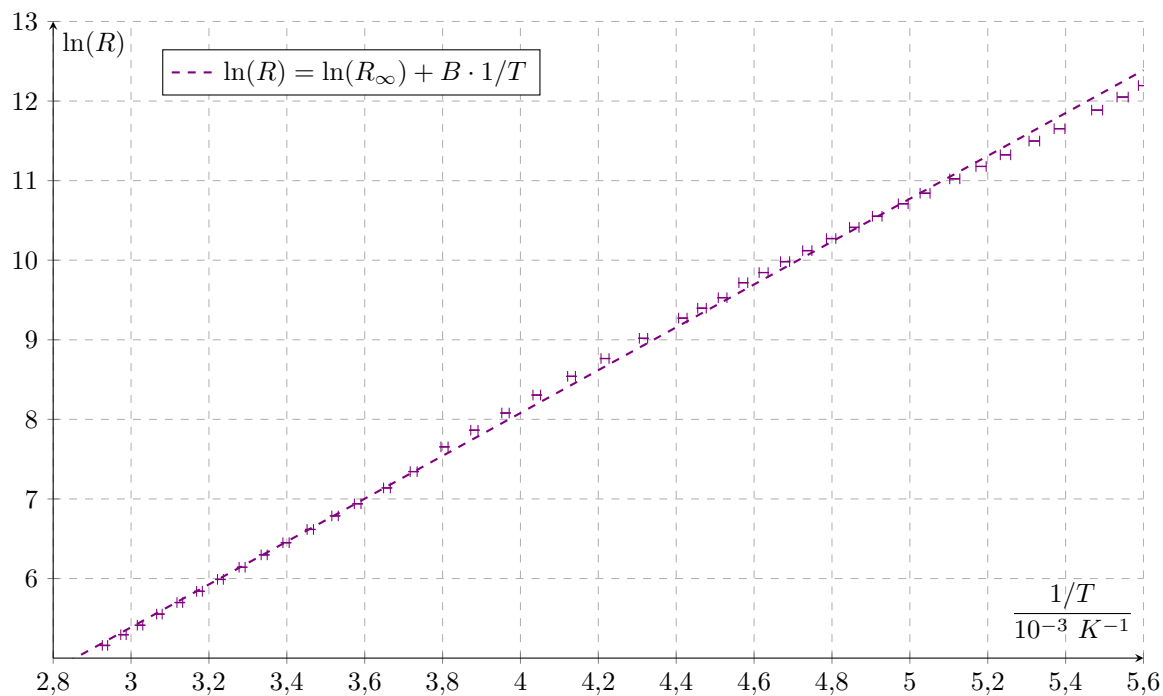
Konstantu R_∞ jsem pak určil jednoduše $R_\infty = \exp(\ln(R_\infty))$ a její chybu

$$\sigma_{R_\infty} = R_\infty \sigma_{\ln(R_\infty)} \quad (18)$$

Vyšlo mi $R_\infty = (68 \pm 1) m\Omega$.



Graf 3: Závislost $1/T$ na $\ln(R)$ použitá pro výpočet lineární regrese

Graf 4: Doplňovaná závislost logaritmu odporu termistoru R na $1/T$

Aktivační energii ΔU jsem určil podle rovnice (2), kde dosazuji hodnotu Boltzmannovy konstanty [3] $k = 8,6173303 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ a považuji ji za přesnou. Pro výpočet aktivační energie vztažené na jeden mol látky ΔU_m jsem použil rovnici (3) a hodnotu Avogadrova čísla [4] $N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23}$, které opět považuji za přesné. Chyby jsem počítal podle

$$\sigma_{\Delta U} = 2k\sigma_B \quad (19)$$

$$\sigma_{\Delta U_m} = 2kN_A\sigma_B \quad (20)$$

Po dosazení mi vyšlo $\Delta U = (0,464 \pm 0,001) \text{ eV}$ a $\Delta U_m = (44,77 \pm 0,09) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Pokožovou teplotu jsem určil z odporu platinového teploměru před začátkem měření $R_t = (108,0 \pm 0,3) \Omega$, kterému podle (5) a (11) odpovídá pokojová teplota $T_p = (293,9 \pm 0,7) \text{ K}$. Z vypočítaných hodnot jsem tak mohl podle (7) určit teplotní součinitel odporu α termistoru při pokojové teplotě T_p . Pro chybu platí

$$\sigma_\alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_{T_p}}{T_p}\right)^2} \quad (21)$$

Dostal jsem tak hodnotu $\alpha = (-31,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Určení teploty a tepelného odporu v maximu statické charakteristiky bylo obtížnější, neboť nemohu tvrdit, že maximum bude v jednom z naměřených bodů. S největší pravděpodobností se buda maxima nabývat někde mezi naměřenými hodnotami. Postupoval jsem proto následovně.

V každém bodě charakteristiky mohu vypočítat elektrický příkon $P_E = UI$ a ze známých hodnot konstant B a R_∞ jsem schopen každému bodu přiřadit teplotu, neboť odpor termistoru je jednak dán (1) a také $R = U/I$. Teplota odpovídající U, I v statické charakteristice je tak rovna

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{U}{IR_\infty}\right)} \quad (22)$$

s chybou

$$\sigma_T = B \cdot \ln^{-2}\left(\frac{U}{IR_\infty}\right) \sqrt{\ln^2\left(\frac{U}{IR_\infty}\right) \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_\infty}}{R_\infty}\right)^2} \quad (23)$$

Z takto vypočítaných hodnot můžu podle (8) vypočítat příslušející K a T_o . Předpokládám totiž, že se okolí termistoru v průběhu měření zahřívalo, a tak teplota T_o nebude konstantní a nebude tak rovna pokojové teplotě T_p . To odpovídá tomu, že když jsem vypočítal hodnoty P_E a T pro všechny body charakteristiky, tak závislost $T(P_E)$ nebyla lineární, ale její graf byl zjevně konkávní.

Odhadl jsem proto z grafu 1, že se maxima nabývá kolem proudu 6 mA a omezil jsem se na interval od 3 mA do 9 mA , na kterém je závislost $T(P_E)$ dostatečně přesně lineární. Vypočítané hodnoty P_E a T pro hodnoty z tohoto intervalu jsou uvedeny v tabulce 4. Chyba σ_{P_E} je daná vztahem

$$\sigma_{P_E} = \sqrt{I^2 \sigma_U^2 + U^2 \sigma_I^2} \quad (24)$$

Vypočítané hodnoty byly proloženy přímkou a pomocí lineární regrese jsem určil tepelný odpor termistoru $K = (6,9 \pm 0,1) \cdot 10^3 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ a odpovídající teplotu okolí $T_o = (297,4 \pm 0,9) \text{ K}$. Vypočítané hodnoty P_E a T pro jednotlivé body statické charakteristiky společně s proloženou přímkou jsou vidět v grafu 5.

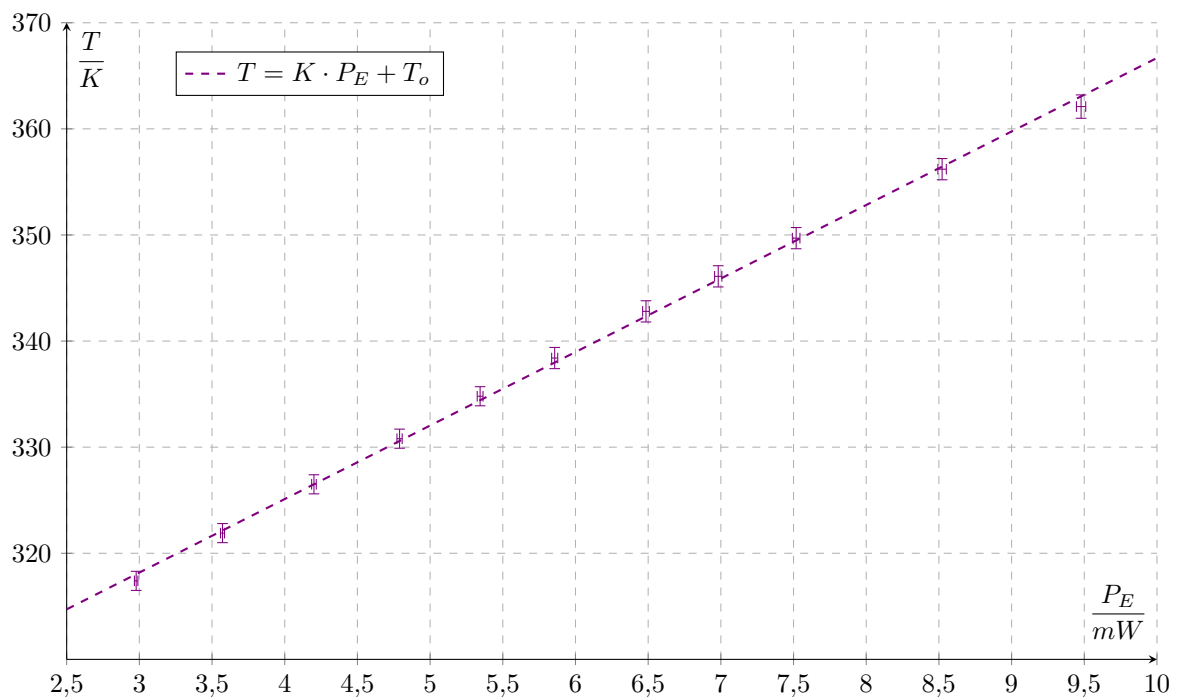
Předpokládám, že takto vypočítané hodnoty K a T_o jsou na uvedeném intervalu konstantní a můžu je tak použít pro výpočet teploty v maximu charakteristiky, která je daná rovnicí (10). Chybu výsledku určím jako

$$\sigma_{T_m} = \sqrt{\left(\frac{B}{\sqrt{B^2 - 4BT_o}}\right)^2 \sigma_{T_o}^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{B - 2T_o}{\sqrt{B^2 - 4BT_o}}\right)^2 \sigma_B^2} \quad (25)$$

Dostanu tak $T_m = (340 \pm 1) \text{ K}$.

Tabulka 4: Závislost teploty termistoru na elektrickém příkonu během statické charakteristiky

$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{U}{mV}$	$\frac{\sigma_U}{mV}$	$\frac{P_E}{mW}$	$\frac{\sigma_{P_E}}{mW}$	$\frac{T}{K}$	$\frac{\sigma_T}{K}$
3,01	0,01	988,2	0,8	2,98	0,01	317,4	0,9
3,50	0,01	1020,3	0,8	3,57	0,01	321,9	0,9
4,03	0,02	1042,5	0,8	4,20	0,02	326,5	0,9
4,54	0,02	1055,2	0,8	4,79	0,02	330,8	0,9
5,03	0,02	1062,0	0,8	5,34	0,02	334,8	0,9
5,50	0,02	1064,9	0,8	5,86	0,02	338,4	1,0
6,09	0,02	1065,6	0,8	6,49	0,02	342,8	1,0
6,56	0,02	1064,0	0,8	6,98	0,02	346,1	1,0
7,08	0,02	1061,3	0,8	7,52	0,03	349,7	1,0
8,09	0,03	1053,4	0,8	8,52	0,03	356,2	1,0
9,08	0,03	1044,0	0,8	9,48	0,03	362,1	1,1



Graf 5: Určení tepelného odporu termistoru

4 Diskuse

Při měření statické charakteristiky jsem po každé změně proudu termistorem vždy počkal, až se hodnoty proudu a napětí ustálí, což odpovídalo době přibližně 20 s. Je možné, že by se hodnoty proudu a napětí mohly ustálit na trochu odlišných hodnotách po delší době čekání, ovšem měřené hodnoty se po 20 s měnily velmi pomalu a měnily se pouze v posledních číslicích zobrazených měřicími přístroji, tedy tato změna byla vždy menší než přesnost měřících přístrojů (podle přesností v tabulce 1). Tato chyba je tedy opravdu zanedbatelná a zvětšení doby čekání by výrazně nezvýšilo přesnost měření.

Vliv vnitřních odporů měřících přístrojů při měření zanedbávám, neboť odpor termistoru byl menší než 20 kΩ a vnitřní odpor použitého voltmetru byl řádově 10 MΩ. Ampérmetr byl zapojen za voltmetrem, takže by do měření neměl vnášet žádnou systematickou chybu.

Jelikož se termistor i teploměr při měření teplotní závislosti odporu termistoru neustále zahřívaly, nemohl jsem čekat na ustálení tepelné rovnováhy a hodnoty jsem musel měřit průběžně během ohřívání. Mohlo se tedy stát, že termistor nebo teploměr se zahřívaly trochu jinou rychlostí a změřená hodnota odporu termistoru R by tak odpovídala trochu odlišné teplotě, než té která odpovídá změřené hodnotě R_t . Předpokládám však, že termistor a teploměr jsou v dobrém tepelném kontaktu a jejich případný rozdíl teplot je tedy zanedbatelný.

Tvar statické charakteristiky, zobrazené v grafu 1, dobře odpovídá teoretickým očekáváním [1]. Napětí tedy nejdříve stoupá přibližně lineárně, nabude maxima a pak začne pomalu klesat. Změřená teplotní závislost odporu termistoru také dobře odpovídá předpokládané exponenciální závislosti dané vztahem (1), jak je ovšem patrné z grafu 4, odpovídající závislost $\ln(R)$ na $1/T$ je sice v rámci chyby měření lineární, ale je zde vidět, že změřená křivka je mírně konkávní. (hodnoty na konci a začátku grafu mají tendenci být pod přímkou a hodnoty uprostřed nad přímkou) Myslím, že tato tendence nebyla způsobena systematickou chybou měření, nýbrž tím, že na měřeném intervalu teplot neplatí vzorec (1) zcela přesně. Pro přesnější určení závislosti odporu termistoru na teplotě na daném intervalu teplot by bylo tedy zapotřebí použít přesnější model pro teplotní závislost R .

Jak jsem již zmínil hodnoty materiálových veličin B a R_∞ byly vypočítány ze standardních vzorců pro lineární regresi, což znamená, že jsem při výpočtu zanedbal chyby veličin na ose x, tedy chyby $\ln(R)$ v grafu 3. Chyby $\ln(R)$ však také nejsou zcela zanedbatelné, takže předpokládám, že chyba určení veličin B a R_∞ bude ve skutečnosti větší než chyba určená formálně ze statistického zpracování σ_B a σ_{R_∞} , což by pak ovlivnilo i chyby dalších veličin, které z nich byly vypočítány.

Zjištěná hodnota tepelného odporu termistoru K je zatížena relativně velkou chybou, což bylo způsobeno více faktory. Teplota T počítaná podle rovnice (22) je vypočítaná z několika naměřených hodnot, což ve výsledku znamená, že její relativní chyba je poměrně velká. Dále jsem v intervalu 3 mA až 9 mA naměřil pouze 11 hodnot a i na tomto intervalu je patrné, že závislost $P_E(T)$ je mírně konkávní. Hodnotu K bychom mohli určit přesněji, kdybychom spolu s hodnotami U a I měřili přímo teplotu termistoru odpovídající těmto hodnotám a také kdybychom naměřili více hodnot v okolí 6 mA.

5 Závěr

Proměřil jsem statickou charakteristiku termistoru a určil teplotu termistoru v maximu charakteristiky na hodnotu $T_m = (340 \pm 1) K$ a tepelný odpor termistoru na hodnotu $K = (6,9 \pm 0,1) \cdot 10^3 K \cdot W^{-1}$. Dále jsem proměřil závislost odporu termistoru na jeho teplotě a určil hodnotu materiálových veličin $B = (2693 \pm 5) K$ a $R_\infty = (68 \pm 1) m\Omega$, ze kterých jsem vypočítal hodnotu aktivační energie $\Delta U = (0,464 \pm 0,001) eV$, aktivační energie na jeden mol látky $\Delta U_m = (44,77 \pm 0,09) kJ \cdot mol^{-1}$ a hodnotu tepelného součinitele odporu termistoru při pokojové teplotě $\alpha = (-31,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

6 Seznam použité literatury

- [1] Termistor. Fyzikální praktikum [online]. [cit. 17-11-2018]. https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_209.pdf
- [2] English, Jiří. Úvod do praktické fyziky I. 1. vyd. Praha: MATFYYPRESS, 2006, 145 s.
- [3] Boltzmann constant. Wikipedia. [online]. [cit. 17-11-2018]. https://en.wikipedia.org/wiki/Boltzmann_constant
- [4] Avogadro constant. Wikipedia. [online]. [cit. 17-11-2018]. https://en.wikipedia.org/wiki/Avogadro_constant