Pracovní úkol

1. Změřte statickou charakteristiku termistoru pro proudy do 25 mA a graficky ji znázorněte.
2. Změřte teplotní závislost odporu termistoru v teplotním intervalu přibližně 180 až 380 K.
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.

Teoretická část

Termistor je polovodičový rezistor s velkou závislostí odporu na teplotě. V praktiku i nejčastěji v praxi používáme termistory, jejichž odpor klesá s rostoucí teplotou. Tuto závislost můžeme v oblasti teplot, kde převládá příměsová vodivost, vyjádřit vztahem

$$R(T) = R_\infty e^{B/T}, \tag{1}$$

kde R_∞ je závislá na materiálu a rozměrech termistoru, B odpovídá teplotní citlivosti termistoru. Logaritmováním vztahu (1) dostaneme vztah, který využijeme pro určení parametrů termistoru z naměřených dat

$$\ln R = \ln R_\infty + B\frac{1}{T}. \tag{2}$$

Aktivační energie termistoru je energie potřebná k ionizaci příměsí. Lze je vypočítat

$$\Delta U = 2RB, \tag{3}$$

kde R je plynová konstanta.

Teplotní součinitel odporu je obecně definován

$$\alpha = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{dR(T)}{dT}. \tag{4}$$

Dosazením ze vztahu (1) dostáváme

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}. \tag{5}$$

Při měření statické charakteristiky termistoru dochází k vyzařování energie do okolí. Teplota termistoru se ustálí, pokud je v rovnováze elektrický příkon a tepelný výkon odváděný do okolí

$$KP = T - T_o, \tag{6}$$

kde K je tepelný odpor termistoru, T je teplota termistoru a T_o je teplota okolí. Uvážíme-li, že $P = U^2/R$, můžeme vyjádřit závislost napětí na termistoru na jeho teplotě

$$U = \sqrt{\frac{R_\infty(T - T_o)\exp(B/T)}{K}}. \tag{7}$$

Nejvyšší napětí na termistoru pak bude

$$T_m = \frac{B - \sqrt{B(B - 4T_o)}}{2}. \tag{8}$$

Měření

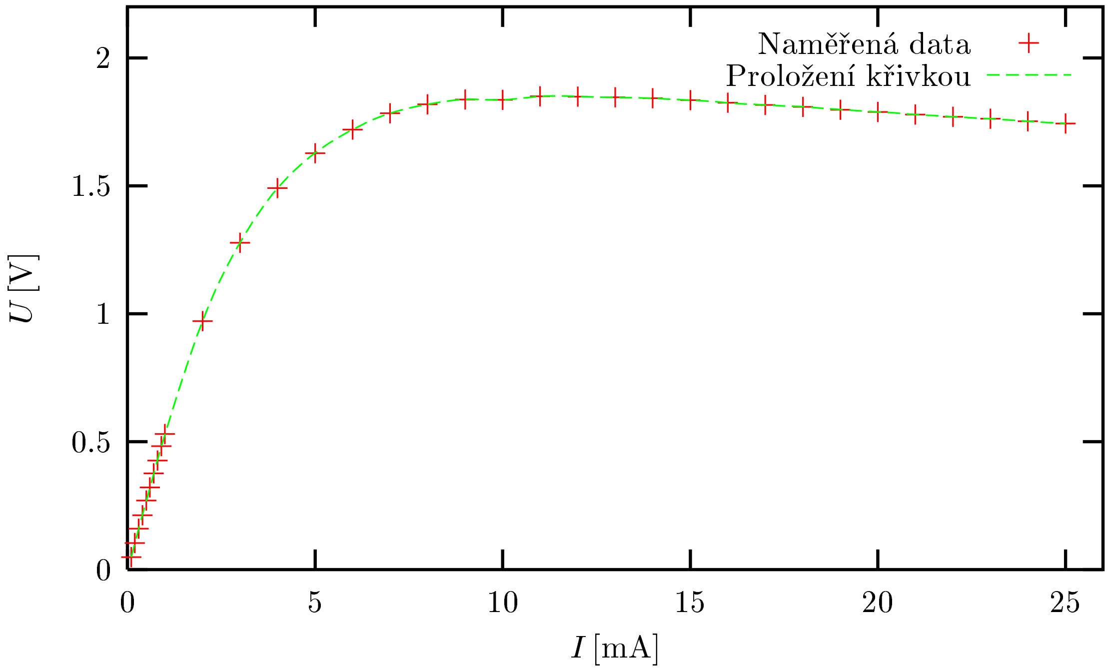
Statickou charakteristiku jsem měřil pomocí obvodu sestaveného podle schématu na obrázku 3 v [2]. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 1 a vynesené do grafu 1. Chyby měření jsou stanovené odhadem.

I [mA]	U [V]
0.10 ± 0.01	0.0492 ± 0.0005
0.20 ± 0.01	0.1039 ± 0.0005
0.30 ± 0.01	0.1597 ± 0.0005
0.40 ± 0.01	0.2130 ± 0.0005
0.50 ± 0.01	0.2701 ± 0.0005
0.60 ± 0.01	0.3213 ± 0.0005
0.70 ± 0.01	0.3763 ± 0.0005
0.80 ± 0.01	0.4264 ± 0.0005
0.90 ± 0.01	0.4819 ± 0.0005
1.00 ± 0.01	0.5306 ± 0.0005
2.00 ± 0.01	0.9709 ± 0.0005
3.00 ± 0.01	1.278 ± 0.0001
4.00 ± 0.01	1.491 ± 0.0001
5.00 ± 0.01	1.628 ± 0.0001
6.00 ± 0.01	1.720 ± 0.0001
7.00 ± 0.01	1.784 ± 0.0001
8.00 ± 0.01	1.819 ± 0.0001
9.00 ± 0.01	1.838 ± 0.0001
10.00 ± 0.05	1.836 ± 0.0001
11.00 ± 0.05	1.850 ± 0.0001
12.00 ± 0.05	1.849 ± 0.0001
13.00 ± 0.05	1.846 ± 0.0001
14.00 ± 0.05	1.842 ± 0.0001
15.00 ± 0.05	1.835 ± 0.0001
16.00 ± 0.05	1.825 ± 0.0001
17.00 ± 0.05	1.816 ± 0.0001
18.00 ± 0.05	1.809 ± 0.0001
19.00 ± 0.05	1.798 ± 0.0001
20.00 ± 0.05	1.789 ± 0.0001
21.00 ± 0.05	1.779 ± 0.0001
22.00 ± 0.05	1.770 ± 0.0001
23.00 ± 0.05	1.762 ± 0.0001
24.00 ± 0.05	1.752 ± 0.0001
25.00 ± 0.05	1.744 ± 0.0001

Tabulka 1.: Naměřené hodnoty pro statickou charakteristiku termistoru

Na základě tohoto měření jsem našel proud, při kterém bylo dosaženo maximálního napětí na termistoru

$$I_m = (11.5 \pm 0.5)\,\mathrm{mA} \quad \text{a} \quad \mathrm{U_m} = (1.850 \pm 0.002)\,\mathrm{V}.$$



Graf 1.: Statická charakteristika termistoru

Chyba proudu je poměrně velká z důvodu neostrosti maxima.

Teplotní závislost odporu termistoru jsem měřil při zadaném rozsahu teplot pomocí digitálních ohmmetrů připojených na svorky R_X (platinový teploměr) a A a C (termistor). Nejprve jsem pomocí kapalného dusíku ochladil celou soustavu na počáteční teplotu a následně ji nechal zvolna ohřívat až na nejvyšší doporučenou hodnotu teploty. Ohřívání bylo velmi pomalé, aby teploměr i termistor měly stejnou teplotu. Naměřené hodnoty jsou uvdeny v tabulce 2 a v grafu 2.

Parametry platinového teploměru byly

$$R_0 = R(0\,^\circ\mathrm{C}) = 100\,\Omega \quad \text{a} \quad \alpha_{\mathrm{tepl}} = 3.85 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-3}.$$

Teplota ve stupních Celsia je potom

$$t = \frac{R_{tepl} - R_0}{\alpha_{tepl} R_0}.$$

Převedením této teploty na Kelviny byly vypočítány příslušné teploty v tabulce 2.

Pomocí lineární regrese závislosti vynesené v grafu 2 a vztahu (2) dostáváme

$$\ln R = (-2.90 \pm 0.05) + (2710 \pm 10)\frac{1}{T},$$

tedy

$$R_\infty = (0.055 \pm 0.001)\,\Omega,$$

$$B = (2710 \pm 10)\,\mathrm{K}.$$

Pomocí vztahu (3) pak můžeme určit aktivační energii termistoru

$$\Delta U = (45.1 \pm 0.2)\,\mathrm{kJ} \cdot \mathrm{mol}^{-1}.$$

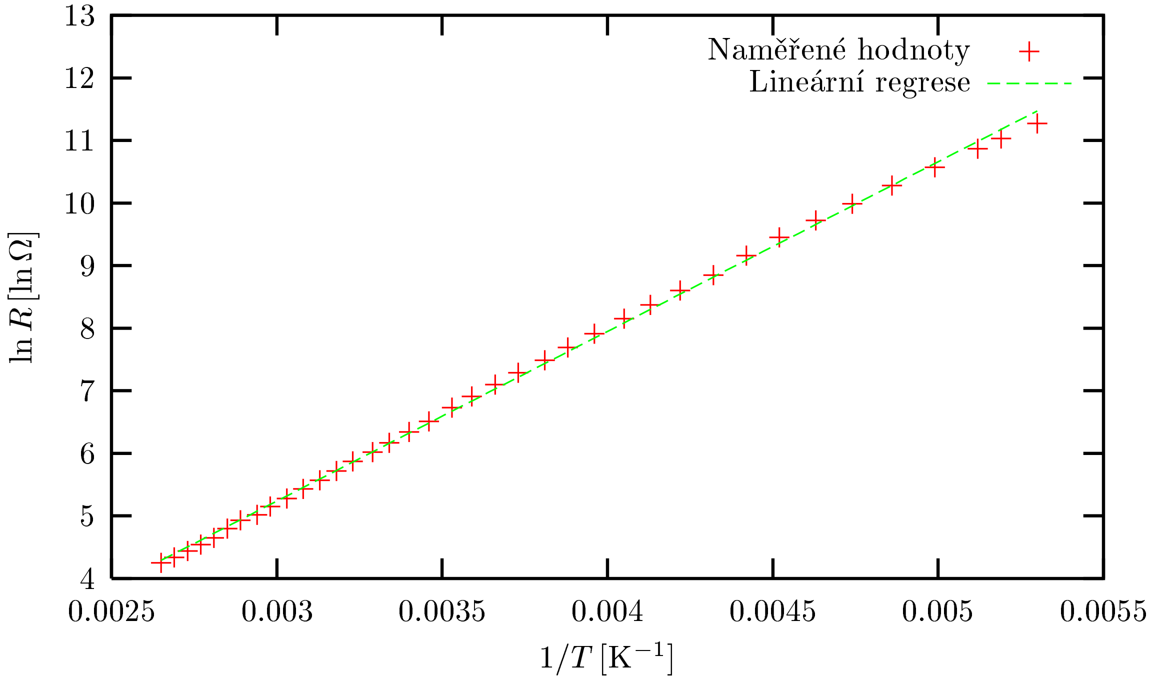
$R_{tepl}\,[\Omega]$	$R_{term}\,[\Omega]$	$T\,[\mathrm{K}]$	$1/T\,[\mathrm{K}^{-1}]$	$\ln(R_{term})\,[\ln\Omega]$
67.5	78200	189	0.00530	11.27
69.0	61600	193	0.00519	11.03
70.0	52600	195	0.00512	10.87
72.0	39000	200	0.00499	10.57
74.0	29100	206	0.00486	10.28
76.0	21900	211	0.00474	9.99
78.0	16600	216	0.00463	9.72
80.0	12700	221	0.00452	9.45
82.0	9520	226	0.00442	9.16
84.0	6940	232	0.00432	8.85
86.0	5420	237	0.00422	8.60
88.0	4320	242	0.00413	8.37
90.0	3460	247	0.00405	8.15
92.0	2730	252	0.00396	7.91
94.0	2190	258	0.00388	7.69
96.0	1790	263	0.00381	7.49
98.0	1470	268	0.00373	7.29
100.0	1212	273	0.00366	7.10
102.0	1006	278	0.00359	6.91
104.0	836	284	0.00353	6.73
106.0	675	289	0.00346	6.51
108.0	566	294	0.00340	6.34
110.0	480	299	0.00334	6.17
112.0	410	304	0.00329	6.02
114.0	353	310	0.00323	5.87
116.0	306	315	0.00318	5.72
118.0	263	320	0.00313	5.57
120.0	228	325	0.00308	5.43
122.0	196	330	0.00303	5.28
124.0	172	335	0.00298	5.15
126.0	151	341	0.00294	5.02
128.0	139	346	0.00289	4.93
130.0	121	351	0.00285	4.80
132.0	105	356	0.00281	4.65
134.0	93.9	361	0.00277	4.54
136.0	84.5	367	0.00273	4.44
138.0	76.7	372	0.00269	4.34
140.0	69.8	377	0.00265	4.25

Tabulka 2.: Teplotní závislost odporu termistoru

Teplotní součinitel odporu termistoru při pokojové teplotě (20 °C; 293 K) můžeme vypočítat vztahem (4) ze znalosti veličiny B

$$\alpha_p = -(31.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1},$$

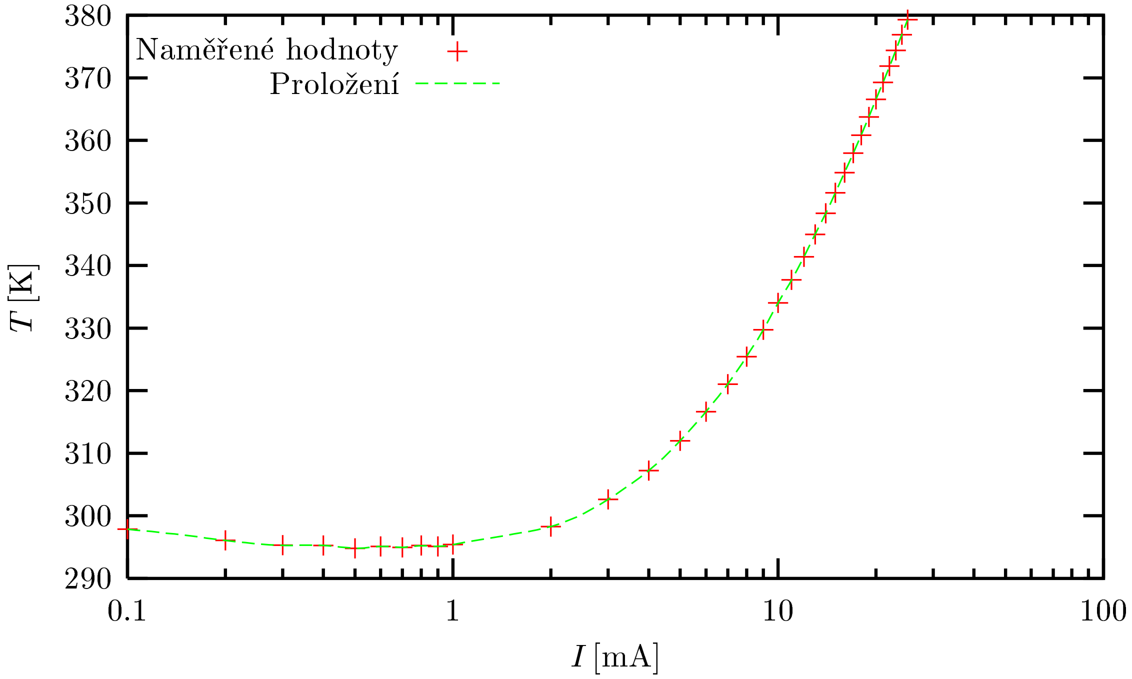
nebo přímo z definice s použitím naměřených dat. Nejbližší měřená teplota je 294 K,



Graf 2.: Teplotní závislost odporu termistoru

směrnici určíme z okolních hodnot. Teplotní součinitel odporu je potom

$$\alpha_p = \frac{1}{566} \cdot \frac{480 - 675}{299 - 289} = -34.3 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1}.$$



Graf 3.: Závislost teploty termistoru na procházejícím proudu při měření statické charakteristiky

Teplotu termistoru v maximu statické charakteristiky můžeme určit dvěma způsoby. Použijeme-li lineární regresi z měření teplotní závislost, můžeme vypočítat teplotu v hledaném bodě

$$T_m = (340 \pm 10)\,\mathrm{K}.$$

V druhém případě můžeme použít vztah (8) s tím, že teplota okolí byla $T_o = 295\,\mathrm{K}$,

$$T_m = (337 \pm 2)\,\mathrm{K}.$$

Pomocí první metody můžeme určit teplotu termistoru v libovolném bodě statické charakteristiky, což je vyneseno v grafu 3.

Tepelný odpor v maximu statické charakteristiky vypočítáme ze vztahu (6)

$$K_m = \frac{T_m - T_o}{U_m I_m},$$

tedy

$$K_m = (2.1 \pm 0.2) \cdot 10^3\,\mathrm{K} \cdot \mathrm{W}^{-1}.$$

Diskuse

Měření statické charakteristiky přineslo závislost očekávanou podle [2]. Proměřen byl téměř celý požadovaný interval teplot.

Naměřená tepelná závislost termistoru potvrdila správnost vztahu (1) s přesností cca 2% (podle příslušné lineární regrese ze vztahu (2)). To je velmi dobré vzhledem k přesnosti používaných metod. Na druhou stranu je z grafu 2 zřetelné, že naměřené hodnoty nejsou náhodně vzdálené od lineární závislosti. Spíše jsou na křivce, která se málo liší od přímky. To lze vysvětlit více způsoby. Vztah (1) nemusí platit naprosto přesně, platinové čidlo rovněž není ideální a také mohlo být měření ovlivněno nerovnoměrným přenosem tepla mezi prostředím a součástkami. Poslední možnost by bylo možné zlepšit pomalejším měřením, což však nebylo možné z časových důvodů.

Dále je potřeba diskutovat odlišnost ve dvou metodách určení teplotního součinitele termistoru α v maximu statické charakteristiky. Přikláním se k první metodě, protože ta zohledňuje celou charakteristiku termistoru, kdežto druhá metoda analyzuje jen její malou část. Přesto nejsou výsledky příliš vzdálené, je-li se chyba druhé metody odhadem 10%, protože místo tečny používáme sečnu.

Dva různé přístupy k určení teploty termistoru v maximu charakteristiky vedou k výsledkům, které se shodují v rámci chyby měření.

Závěr

Statická charakteristika termisotru je vynesena v grafu 1, teplotní závislost odporu termistoru v grafu 2. Veličiny požadované v zadání byly na základě měření určeny

$$R_\infty = (0.055 \pm 0.001)\,\Omega,$$

$$B = (2710 \pm 10)\,\mathrm{K},$$

$$\Delta U = (45.1 \pm 0.2)\,\mathrm{kJ} \cdot \mathrm{mol}^{-1},$$

$$\alpha_p = -(31.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1},$$

$$T_m = (337 \pm 2)\,\mathrm{K},$$

$$K_m = (2.1 \pm 0.2) \cdot 10^3\,\mathrm{K} \cdot \mathrm{W}^{-1}.$$

Literatura

[1] Englich, J.: Zpracování výsledků fyzikálních měření. Praha 2000.
[2] Bakule, R., Šternberk, J.: Fyzikální praktikum II. Praha 1989.