

1 Pracovní úkoly

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 ΔU 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 Teoretický úvod

Termistor je polovodičová součástka, jejíž vlastnosti se dají s výhodou využít v elektrických obvodech. Termistor je charakteristický tím, že jeho odpor je silně závislý na teplotě a to tak, že s rostoucí teplotou klesá. V oblasti, kde se uplatňuje zejména příměsová vodivost, můžeme odpor R termistoru v závislosti na teplotě T vyjádřit jako

$$R = R_\infty \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (1)$$

kde R_∞ je veličina závislá na tvaru a materiálu součástky a B popisuje citlivost termistoru. V kovalentních vodičích, kde s rostoucí teplotou vzrůstá počet nositelů náboje v daném objemu, platí

$$B = \frac{\Delta U}{2k}, \quad (2)$$

kde ΔU je aktivační energie nutná k ionizaci příměsí a k je Boltzmannova konstanta. Konstantu B z měření snadno určíme pomocí lineární regrese z vynesené závislosti $\ln R = f(1/T)$ v grafu.

$$\ln R = \ln R_\infty + \frac{B}{T} \quad (3)$$

Teplotní součinitel odporu α u termistoru je definovaný jako

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}. \quad (4)$$

Po dosazení rovnice (1) do (4) získáváme

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \quad (5)$$

Statická charakteristika určuje závislost napětí na termistoru na procházejícím proudě při stále okolní teplotě. Měříme vlastně dynamicky ustálený stav, kdy je vyrovnán příkon P a je stejně velký jako tepelný výkon termistoru $\frac{T-T_0}{K}$, kde K je tepelný odpor termistoru, T je jeho teplota a T_0 je teplota okolí. Z toho pak plyne pro závislost na teplotě:

$$U = \sqrt{\frac{R_\infty(T - T_0) \exp\left(\frac{B}{T}\right)}{K}} \quad (6)$$

Z této rovnice pak můžeme určit teplotu T_m , při které bude odpor maximální

$$T_m = \frac{B - \sqrt{B(B - 4T_0)}}{2} \quad (7)$$

Pro měření teploty se používá platinový odporový teploměr, pro který s dostatečnou přesností v rámci oboru teplot, který budeme proměřovat platí rovnice

Tabulka 1: Chyby měřících přístrojů pro měření statické charakteristiky termistoru

Voltmetr		Ampérmetr	
Rozsah	Chyba	Rozsah	Chyba
0,2 V	(0,05%+3)	0,4 mA	(1%+5)
2 V	(0,05%+3)	4 mA	(1%+5)
		40 mA	(1,5%+5)

$$T = 273,15 \text{ K} + \frac{R_T - R_0}{\bar{\alpha} R_0}, \quad (8)$$

kde R_T je odpor teploměru při teplotě T , R_0 je odpor při teplotě tání ledu a $\bar{\alpha}$ je teplotní součinitel odporu teploměru.

3 Měření

3.1 Chyba měření

Chybu měření počítám dle [2]. Celková chyba měření σ_f (pro veličinu f) je určena jako

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_{stat}^2 + \sigma_{mer}^2}, \quad (9)$$

kde σ_{stat} je statistická chyba měření f a σ_{mer} je chyba měřidla (určená obvykle jako polovina nejmenšího dílku stupnice) použitého pro měření f .

Metoda přenosu chyb je pak pro veličinu vypočtenou z n jiných naměřených veličin x_i

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (10)$$

3.2 Měření statické charakteristiky termistoru

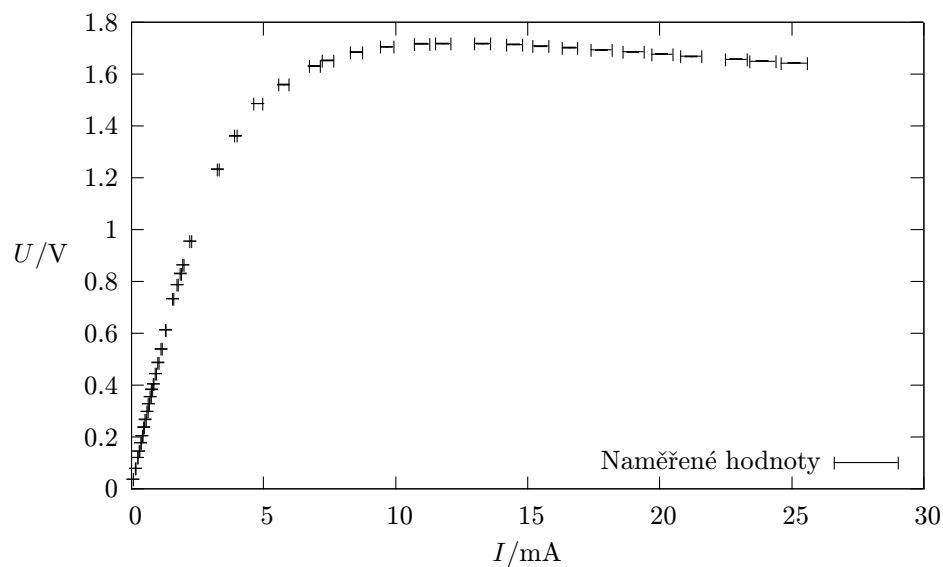
Statická charakteristika termistoru byla proměřována tak, že postupně byl zvyšován proud procházející obvodem v intervalu od 0,08 mA do 25 mA. Pro měření napětí na termistoru a proudu v obvodu byly použity digitální multimetry - jejich chyby jsou uvedeny v tabulce č. 3. Naměřené hodnoty včetně chyb měření jsou uvedeny v tabulce č. 2. Graficky jsou pak naměřené hodnoty, včetně chybových úseček, znázorněny na obrázku č. 1.

3.3 Teplotní závislost odporu termistoru

Dalším měřením bylo měření teplotní závislosti odporu termistoru. To bylo realizováno pomocí platinového odporového teploměru s charakteristikami $R_0 = 100 \Omega$ a $\bar{\alpha} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, které bereme jako přesné. Odporový teploměr a termistor v závislosti na teplotě byly měřeny pomocí digitálních ohmmetrů. Chyby měření přístrojů jsou uvedeny v tabulce č. 3. Platinový teploměr i termistor jsou napevno zabudovány do jednoho zařízení, aby v průběhu měření bylo co nejlépe zajištěno to, že obě na na teplo citlivé součástky budou na stejné teplotě. Nízké teploty byly dosaženy ochlazením kapalným dusíkem, kdežto vysoké teploty byly naopak dosaženy pomocí topení v termosce, kde byly teploměry umístěny. Počátek měření probíhal od teplot, kdy se po konci kontaktu teploměru s kapalným dusíkem, začal odpor zvyšovat (nejprve jsme chvilku počkali, protože teploměr má určitou teplotní setrvačnost a trochu dusíku se ještě z povrchu teploměru odpařovalo).

Tabulka 2: Měření statické charakteristiky termistoru

I/mA	σ_I/A	U/V	σ_U/V	I/mA	σ_I/A	U/V	σ_U/V
0,080	0,002	0,03758	0,00005	3,28	0,04	1,2326	0,0009
0,160	0,003	0,07807	0,00007	3,96	0,05	1,3618	0,0010
0,240	0,003	0,12011	0,00009	4,80	0,17	1,4864	0,0010
0,300	0,004	0,14621	0,00010	5,76	0,19	1,5600	0,0011
0,360	0,005	0,17755	0,00012	6,94	0,20	1,6312	0,0011
0,42	0,01	0,2045	0,0004	7,44	0,21	1,6524	0,0011
0,48	0,01	0,2380	0,0004	8,52	0,23	1,6851	0,0011
0,54	0,02	0,2679	0,0004	9,68	0,25	1,7059	0,0012
0,60	0,02	0,2989	0,0004	11,0	0,3	1,7165	0,0012
0,66	0,02	0,3277	0,0005	11,8	0,3	1,7178	0,0012
0,72	0,02	0,3557	0,0005	13,3	0,3	1,7182	0,0012
0,78	0,02	0,3840	0,0005	14,5	0,3	1,7138	0,0012
0,84	0,02	0,4054	0,0005	15,5	0,3	1,7086	0,0012
0,92	0,02	0,4447	0,0005	16,6	0,3	1,7014	0,0012
1,02	0,02	0,4875	0,0005	17,8	0,4	1,6932	0,0011
1,14	0,02	0,5401	0,0006	19,0	0,4	1,6854	0,0011
1,30	0,02	0,6132	0,0006	20,1	0,4	1,6772	0,0011
1,58	0,03	0,7328	0,0007	21,2	0,4	1,6689	0,0011
1,74	0,03	0,7877	0,0007	22,9	0,4	1,6575	0,0011
1,86	0,03	0,8302	0,0007	23,9	0,5	1,6505	0,0011
1,96	0,03	0,8642	0,0007	25,1	0,5	1,6422	0,0011
2,24	0,03	0,9555	0,0008				



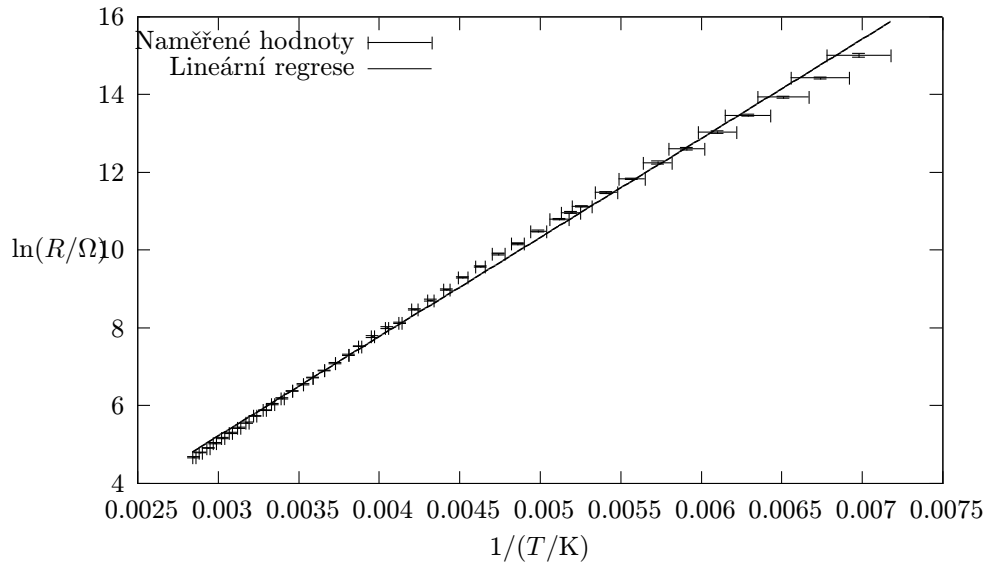
Obrázek 1: Graf statické charakteristiky termistoru

Tabulka 3: Chyby ohmmetrů použitých pro měření teplotní závislosti termistoru

Platinový teploměr		Termistor	
Rozsah	Chyba	Rozsah	Chyba
400 Ω	(0,8%+4)	200 Ω	(0,2%+5)
		2000 Ω	(0,15%+3)
		20000 Ω	(0,15%+3)
		200000 Ω	(0,15%+3)
		2000000 Ω	(0,15%+3)
		20000000 Ω	(0,2%+5)

Tabulka 4: Teplotní závislost odporu termistoru

R_T/Ω	σ_{R_T}/Ω	R/Ω	σ_R/Ω	R_T/Ω	σ_{R_T}/Ω	R/Ω	σ_R/Ω
50,0	0,8	3300000	11600	90,0	1,1	3000	8
52,0	0,8	1850000	3075	92,0	1,1	2390	7
54,0	0,8	1130000	1995	94,0	1,2	1860	3
56,0	0,8	710000	1365	96,0	1,2	1490	3
58,0	0,9	460000	990	98,0	1,2	1210	2
60,0	0,9	300000	750	100,0	1,2	1000	2
62,0	0,9	210000	615	102,0	1,2	830	2
64,0	0,9	138000	237	104,0	1,2	700	1,4
66,0	0,9	97000	176	106,0	1,2	590	1,2
68,0	0,9	68000	132	108,0	1,3	490	1,0
69,0	1,0	58000	117	110,0	1,3	420	0,9
70,0	1,0	49000	104	112,0	1,3	360	0,8
72,0	1,0	36000	84	114,0	1,3	310	0,8
74,0	1,0	26000	69	116,0	1,3	260	0,7
76,0	1,0	20000	60	118,0	1,3	230	0,6
78,0	1,0	14500	25	120,0	1,4	200	0,6
80,0	1,0	11000	20	122,0	1,4	176	0,4
82,0	1,1	7980	15	124,0	1,4	154	0,4
84,0	1,1	6100	12	126,0	1,4	136	0,3
86,0	1,1	4800	10	128,0	1,4	121	0,3
88,0	1,1	3400	8	130,0	1,4	107	0,3



Obrázek 2: Graf teplotní charakteristiky termistoru

3.4 Lineární regrese teplotní závislosti

Grafické zpracování bylo provedeno v programu gnuplot, který použil metodu nejmenších čtverců pro proložení funkce naměřenými hodnotami. Graf je na obrázku č. 2. Hodnoty, které přímo vyšly z lineární regrese jsou

$$B = (2550 \pm 20) \text{ K}$$

$$R_{\infty} = (88 \pm 8) \text{ m}\Omega$$

Z hodnoty B pak mohou určit aktivační energii ΔU

$$\Delta U = (7,04 \pm 0,06) \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

Pro účely určení teplotního součinitele odporu α při pokojové teplotě uvažují, že pokojová teplota je zhruba 20°C .

$$\alpha = -(0,0297 \pm 0,0002) \text{ K}^{-1}$$

3.5 Stanovení teploty termistoru v maximu charakteristiky

Maximální hodnota napětí na termistoru při statickém měření byla zhruba mezi 12 mA a 14 mA. Pro účely dalšího výpočtu pak budu brát právě jedno diskrétní měření, které odpovídá nejvyšší hodnotě napětí, a to konkrétně při proudu $I_m = (13,3 \pm 0,3) \text{ mA}$. Při tomto proudu bylo napětí na součástce $U_m = (1,7182 \pm 0,0012) \text{ V}$. To odpovídá odporu $R_m = \frac{U_m}{I_m} = (129 \pm 3) \Omega$. Z již vypočítané konstanty B pak plyne, že maximum charakteristiky termistoru je na teplotě

$$T_m = (350 \pm 4) \text{ K},$$

což pak dle (7) odpovídá teplotě okolí $T_0 = (302 \pm 4) \text{ K}$. To vcelku odpovídá experimentu, protože termistor byl v nádobě, která izolovala teplo a v průběhu pokusu ji zahřívá a proto kolem něj byla teplota okolí vyšší než běžná pokojová teplota. Tomu pak odpovídá tepelný odpor

$$K = (2100 \pm 500) \text{ KW}^{-1}$$

4 Diskuse

Chyby měření mohly být převážně způsobeny nedokonalou teplotní rovnováhou v měření soustavě. Při měření statické charakteristiky bylo vždy potřeba chvíli počkat na to, na jaké hodnotě se proud a napětí po přenastavení ustálí, což jsem prováděl, ale je pravděpodobné, že za delší dobu by se ustálily na jiných hodnotách. Také to, že teplota okolí rostla s tím, jak jsme zvyšovali proud v termistoru, mělo vliv na vývoj měření. Pro měření teplotní závislosti odporu je zase kritické, aby platinový odporový teploměr byl v dynamické teplotní rovnováze s termistorem - aby byly současně na stejné hodnotě - protože hodnoty byly odečítány vždy zaráz. Ale to ve skutečnosti není zcela pravda, protože každá z těchto na teplo citlivých součástí má jinou tepelnou kapacitu a ohřívá se s mírně jinou rychlostí. To nejspíše způsobilo to sice ne příliš velké, ale viditelné, prohnutí grafu závislosti $\ln R$ na $1/T$ a tento jev mohl i změnit mírně sklon této "prohnuté přímky".

Dalším jevem, který se mohl uplatnit, zejména při nejnižších teplotách, je ne zcela přesná závislost odporového teploměru na lineární funkci. V bližším přiblížení by se dala použít kvadratická funkce, což jsme neprovedli.

Vysoká relativní chyba určení tepelného odporu je velká, protože je exponenciálně závislá na $1/T$.

Teplotu okolí u statického měření jsem vypočítal zpětně, protože umístění termistoru do izolační nádoby způsobilo nárůst teploty v jeho okolí a tedy i změnu jeho naměřené charakteristiky. Jedná se ovšem o věrohodnější způsob než v případě opačného postupu, kdy bychom se dopustili relativně velké chyby právě v určení okolní teploty.

5 Závěr

Proměřil jsem statickou charakteristiku termistoru a vytvořil její graf.

Naměřil jsem teplotní závislost odporu termistoru a určil jsem z ní důležité konstanty pro termistor.

$$B = (2550 \pm 20) \text{ K}$$

$$R_{\infty} = (88 \pm 8) \text{ m}\Omega$$

$$\Delta U = (7,04 \pm 0,06) \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

$$\alpha = -(0,0297 \pm 0,0002) \text{ K}^{-1}$$

Naměřené maximum statické charakteristiky termistoru bylo na teplotě

$$T_m = (350 \pm 4) \text{ K},$$

a odpovídající teplotní odpor byl

$$K = (2100 \pm 500) \text{ KW}^{-1}$$

6 Literatura

- [1] *R. Bakule, J. Šternberk:*
Fyzikální praktikum II - Elektřina a magnetismus
UK Praha, 1989
- [2] *J. English:*
Úvod do praktické fyziky I
Matfyzpress, Praha 2006