

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum II



Úloha č. 9

Název úlohy: Charakteristiky termistoru

Jméno: Vojtěch Votruba

Datum měření: 2023-10-09

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
Celkem	max. 17	

Posuzoval:

dne:

Pracovní úkoly

1. Změřte statickou charakteristiku termistoru pro proudy do 25 mA a graficky ji znázorněte. Záznam měření počítačem vytiskněte.
2. Změřte teplotní závislost odporu termistoru v teplotním intervalu přibližně 210 až 310 K, graficky znázorněte a vytiskněte.
3. Graficky znázorněte závislost logaritmu odporu R termistoru na $1/T$ a vyhodnoťte velikost materiálových veličin R_∞ a B a aktivační energie U .
4. Stanovte teplotu termistoru v maximu statické charakteristiky.

1 Teoretická část

Termistor je elektronická polovodičová součástka užívaná jako rezistor silně závislý na teplotě. Pro termistory z monokrystalů (mezi něž řadíme i ten, který je používán v úloze) je jejich odporová teplotní závislost modelována vztahem

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

kde R je elektrický odpor termistoru, T jeho teplota, R_∞ materiálová konstanta s rozměrem odporu a B teplotní citlivost termistoru [1]. Tento model s klesající exponenciálou můžeme porovnat se standardním chováním vodičů, kdy naopak elektrický odpor lineárně roste podle vztahu

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (2)$$

zde R_0 je odpor při teplotě 0°C , t je teplota ve stupních Celsia a α je teplotní součinitel odporu. Právě porovnání těchto dvou modelů je jádrem 2. úkolu, kdy je teplota termistoru měřena nepřímo přes platinový odporový teploměr Pt 100. [1]

Pro vyhodnocení konstant R_∞ a B se pak použije linearizace vztahu (1) a následné uplatnění metody nejmenších čtverců. Graf závislosti $\log R = (\log R)(1/T)$ by měl [1] pro široký teplotní obor odpovídat přímkou s předpisem

$$\log R = \log R_\infty + 0,434 \frac{B}{T}. \quad (3)$$

Pro kovalentní polovodiče platí dále mezi aktivační energií – energií potřebné k ionizaci – U (tu máme dle úkolu 3 také zjistit) a citlivostí B vztah

$$B = \frac{U}{2R}, \quad (4)$$

kde R je molární plynová konstanta [1]. Nakonec si pro určení teploty termistoru odpovídající maximu napětí napíšeme pomocí vztahu (1) závislost napětí U na teplotě jako

$$U = \sqrt{\frac{R_\infty(T - T_0) \exp(\frac{B}{T})}{K}}, \quad (5)$$

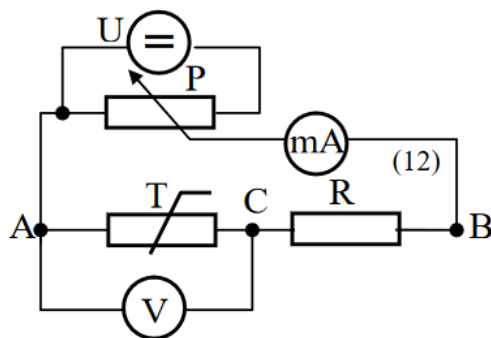
kde K je tzv. teplotní odpor termistoru a T_0 teplota okolí. Leč z matematické analýzy víme, že nutnou podmínkou existence extrému je nulová derivace, proto pokládáme

$$\frac{dU}{dT} = 0, \quad (6)$$

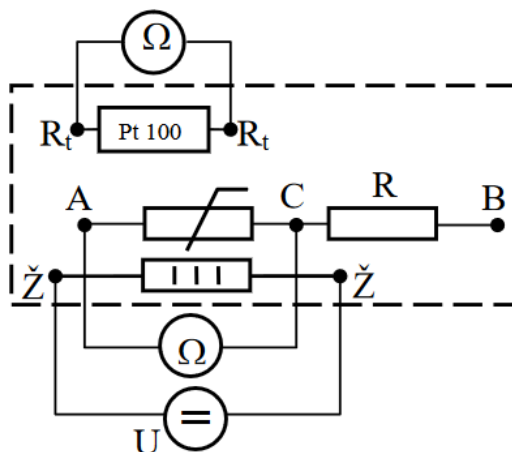
z čehož nám plyne po úpravách vztah pro maximální teplotu T_m [1]:

$$T_m = \frac{1}{2}[B - \sqrt{B(B - 4T_0)}] \quad (7)$$

Příslušná schémata pro měření jsou k vidění na obr. 1 a 2.



Obrázek 1: Schéma zapojení pro měření statické charakteristiky termistoru [1].



Obrázek 2: Schéma zapojení pro měření odporové teplotní závislosti termistoru [1].

2 Výsledky a zpracování měření

2.1 Podmínky pokusu

Měření bylo provedeno v místnosti PII v budově MFF UK na Karlově. Změřené podmínky termo-hygrobarometrem při pokusu byly následující: Teplota $\tau = 22,8(4)^\circ\text{C}$, relativní vlhkost $\Phi = 53(3)\%$, tlak $p = 990(2) \text{ hPa}$. Molární plynová konstanta byla ze studijního textu vzata jako přesná s hodnotou $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [1], stejně tak byly převzaty hodnoty pro odpor $R_0 = 100 \Omega$ a teplotní součinitel odporu $\alpha = 3,85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ platinového teploměru Pt 100 [1].

2.2 Voltampérová charakteristika

Ke změření voltampérové charakteristiky byl použit počítačový program *Termistor* – ten po stisknutí klávesy enter zaznamenával údaje ze dvou multimetrů *METEX MXD-4660*, které byly v zapojení použity jako voltmetr a ampérmetr. Proud pouštěný do obvodu byl regulován za pomoci zdroje *Straton (typ 2229)* a laboratorního reostatu. Podle instrukcí [1] byl v rozsahu 0-1 mA používán krok $\approx 0,1 \text{ mA}$, zatímco v rozmezí 1-25 mA krok $\approx 1 \text{ mA}$. Pro poslední cca. 5 naměřených hodnot musel být zvýšen rozsah multimetru na 200 mA, zbytek hodnot byl naměřen s rozsahem 20 mA.

Nejistotu dat změřených v této podúloze stanovíme podle manuálu pro multimetry *MXD-4660*. Pro napětí U je ve všech použitých rozsazích uvedena chyba jako $\sigma_U = \pm 0,0005U + 3 \text{ digity}$ [1] a pro proud I je ve všech použitých rozsazích uvedena chyba jako $\sigma_I = \pm 0,003I + 3 \text{ digity}$ [1].

Naměřená data byla finálně zanesena do tabulky 1 a graficky zpracována do obr. 3 v softwaru *Origin*.

2.3 Teplotní závislost

Technika měření v této podsekci byla velmi podobná technice měření v předchozí podsekci. Termistor byl nejdříve zchlazen kapalným dusíkem na teplotu přibližně -60°C , pak byl zapojen do obvodu podle obr. 2 a následně byl, po jistém ustálení teploty, do termistoru puštěn proud pro urychlení ohřevu. Multimetry *METEX*

Tabulka 1: Naměřená statická charakteristika termistoru.

I/mA	U/V
0,00(3)	0,0000(3)
0,10(3)	0,0400(3)
0,20(3)	0,0780(3)
0,30(3)	0,1170(4)
0,40(3)	0,1540(4)
0,50(3)	0,1950(4)
0,60(3)	0,2330(4)
0,71(3)	0,2720(4)
0,80(3)	0,3090(5)
0,91(3)	0,3470(5)
1,00(3)	0,3810(5)
2,00(4)	0,7120(7)
3,12(5)	1,0030(8)
3,97(5)	1,1660(9)
5,14(6)	1,350(1)
6,06(6)	1,442(1)
7,10(7)	1,480(1)
7,94(7)	1,517(1)
9,01(8)	1,564(1)
10,11(8)	1,597(1)
11,08(9)	1,605(1)
12,02(9)	1,624(1)
13,3(1)	1,635(1)
14,0(1)	1,620(1)
15,0(1)	1,643(1)
16,1(1)	1,635(1)
17,1(1)	1,647(1)
18,0(1)	1,633(1)
19,1(1)	1,640(1)
20,0(1)	1,632(1)
21,1(1)	1,626(1)
22,0(1)	1,623(1)
23,1(1)	1,623(1)
24,0(1)	1,636(1)
25,1(1)	1,613(1)

MXD-4660 byly tentokrát oba nastaveny jako ohmmetry a měřily elektrický odpor platinového odporového teploměru R_p a odpor termistoru R_t .

Nejistotu zde znovu budeme odhadovat podle chyby měřicího přístroje – multimetru. Podle manuálu [1] má být nejistota brána pro rozsah $200\ \Omega$ (měření odporového teploměru) jako $0,2\% + 5$ digitů a pro rozsah $20\ \text{k}\Omega$ (měření termistoru) jako $0,15\% + 3$ digity.

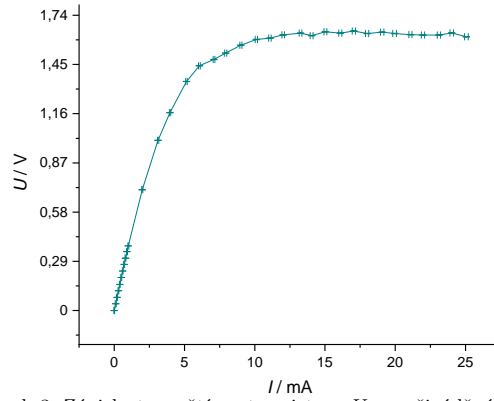
Množství takto získaných dat bylo příliš velké, proto jej v protokolu nezanášíme do tabulky, vykreslíme však závislost graficky – viz obr. 4. Pomocí vztahu (2) a informací z podsektory Podmínky pokusu můžeme navíc přepočíst hodnotu R_p na teplotu ve stupních Celsia t . Tuto teplotu budeme považovat zároveň za teplotu termistoru (viz diskuse). Přepočet byl proveden a výsledky byly zaneseny do obr. 5.

Posledním grafickým znázorněním, které máme podle pracovních úkolů vytvořit, je závislost $\log R_t$ na $1/T$. Naměřené hodnoty byly vyneseny do obr. 6 a zároveň byly také nafitovány lineární regresí pomocí softwaru *Origin*.

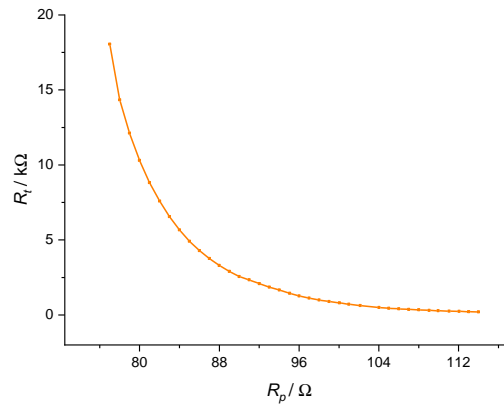
Z fitování metodou nejmenších čtverců získáváme hodnoty (i nejistoty) B , jakožto násobku směrnice, a $\log R_\infty$, jakožto interceptu, podle vztahu (3)

$$B = 306(2) \times 10^1 \text{ K}, \quad (8)$$

$$R_\infty = 0,011(1) \text{ m}\Omega. \quad (9)$$



Obrázek 3: Závislost napětí na termistoru U na přiváděném proudu I .



Obrázek 4: Naměřená závislost odporu termistoru R_t na odporu platinového odporového teploměru R_p

Vztahem (4) (a triviálním přepočtem pomocí metody přenosu chyby – U i B budou mít stejnou relativní chybu) získáváme dále i aktivační energii, která vychází jako

$$U = 509(3) \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}. \quad (10)$$

Finálně stanovíme teplotu T_m podle vztahu (4).

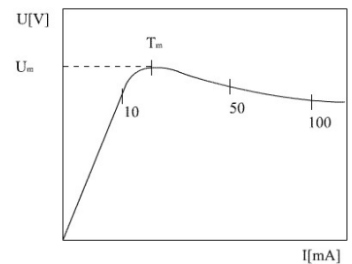
$$T_m = 332(8) \text{ K}. \quad (11)$$

3 Diskuse výsledků

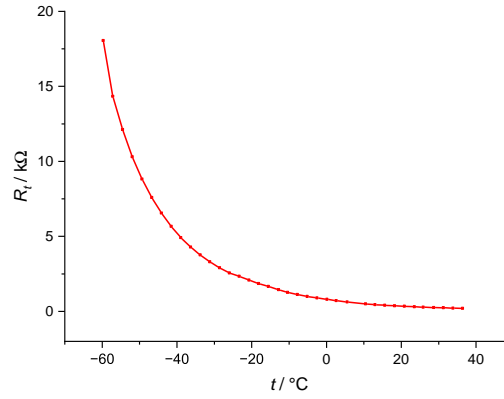
3.1 Voltampérová charakteristika

Neboť v této části měření nemáme žádné „cílové“ hodnoty, které bychom mohli rozebrat, nezbyvá nám než se zabírat celkovým měřením závislosti. Nahlédneme-li do studijního textu, zjišťujeme, že naměřená voltampérová charakteristika neodpovídá křivce, která v něm je uvedena.

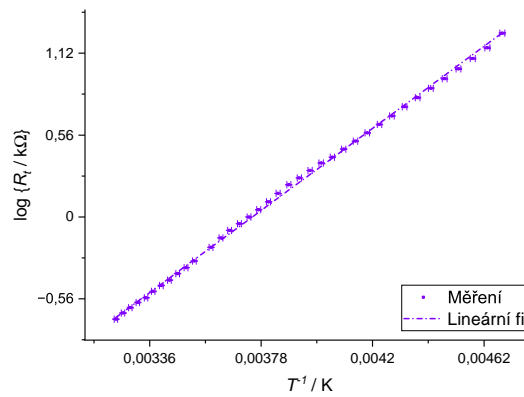
Po rozhovoru s panem doc. Petr Prausem experimentátor zjistil, že k měření této úlohy byly dříve používány jiné termistory, tudíž může být příklad uvedený ve studijním textu neaktuální. Na druhou stranu zde vidíme, že se křivky alespoň na začátku měření shodují a je zde možnost, že při měření na větším proudovém oboru by naměřená křivka začala nabírat předpokládaný tvar.



Obrázek 7: Přibližný tvar V-A charakteristiky termistoru [1]



Obrázek 5: Naměřená závislost odporu termistoru R_t na jeho teplotě t .



Obrázek 6: Závislost logaritmu odporu termistoru $\log R_t$ na převrácené hodnotě teploty $1/T$.

3.2 Teplotní závislost

V této podsekci je klíčovým předpokladem fakt, že teplota termistoru a odporového teploměru bude stejná, to ale neodpovídá fyzikální realitě – aparatura nikdy nebude dokonale izolovat a termistor a teploměr nejsou úplně na stejných místech. Jde ovšem o užitečné přiblížení. O jeho kvalitě svědčí primárně obr. 6, který ukazuje, že teplota spočtená z odporového teploměru a odpor naměřený na termistoru velmi dobře splňují exponenciální vztah (3).

Co se týče materiálových veličin, máme sice konkrétní hodnoty, ale přesné referenční (např. tabulkové) hodnoty nám chybí. Zběžné hledání na internetu nám ale může potvrdit, že například hodnota B není mimo normu [2]. Teplotu T_m je bohužel pak také velmi těžké s něčím porovnávat, neboť na námi naměřená statická charakteristika nemá maximum, řádově se však zdá býti rozumná.

4 Závěr

V této úloze byla proměřena a zpracována voltampérová statická charakteristika termistoru – tabelárně i graficky. Dále byla proměřena závislost odporu termistoru na teplotě pomocí nepřímého měření a dobře se potvrdil exponenciální model této závislosti. Pro termistor byly stanoveny jeho materiálové veličiny na hodnoty

$$\begin{aligned} R_\infty &= 0,011(1) \text{ m}\Omega \\ B &= 306(2) \times 10^1 \text{ K}, \\ U &= 509(3) \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}. \end{aligned}$$

Finálně byla také stanovena teplota termistoru v maximu jeho statické charakteristiky na hodnotu

$$T_m = 332(8) \text{ K}.$$

Reference

- [1] *Charakteristiky termistoru* [online]. [cit. 2023-10-14]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/209>
- [2] *Thermistors* [online]. [cit. 2023-10-14]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/io/thermistors.html>