Odporov̂Î teploměr, termistor a termočlánek

Úkol: **a)** Proveďte kalibraci odporového teploměru, termočlánku a termistoru.
b) Určete teplotní koeficienty odporového teploměru, konstanty charakterizující termočlánek a aktivační energii daného termistoru.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

a) Odporový teploměr

U pevných kovových vodičů **odpor s rostoucí teplotou vzrůstá**, což vyjadřuje vztah

$$\boxed{R_t = R_0.\left(1 + a.t + b.t^2\right)} \quad , \tag{1}$$

kde R_t je odpor kovového vodiče při určité teplotě t, R_0 jeho odpor při teplotě 0 °C. Kvadratický člen vyrovnává odchylky od linearity v širším teplotním rozmezí. Přitom a a b jsou **teplotní součinitelé** charakteristické pro určitý kovový vodič (tyto hodnoty jsou tabelovány).

Odporový teploměr je v podstatě spirála z čistého kovu, jejíž odpor lze měřit. V souladu s výrazem (1) každé teplotě t odpovídá určitý odpor R_t a naopak, známe-li konstanty R_0, a a b, můžeme ze známého odporu spirály určit příslušnou teplotu. K určení těchto tří konstant stačí vyřešit soustavu tří rovnic, jež dostaneme, když přesně změříme při třech různých teplotách t_1, t_2 a t_3 tři odpovídající odpory R_{t1}, R_{t2}, a R_{t3} spirály odporového teploměru a tyto hodnoty postupně dosadíme do vztahu (1). Platí:

$$\begin{aligned} R_{t1} &= R_0.\left(1 + a.t_1 + b.t_1^2\right) \\ R_{t2} &= R_0.\left(1 + a.t_2 + b.t_2^2\right) \\ R_{t3} &= R_0.\left(1 + a.t_3 + b.t_3^2\right) \quad . \end{aligned} \tag{2}$$

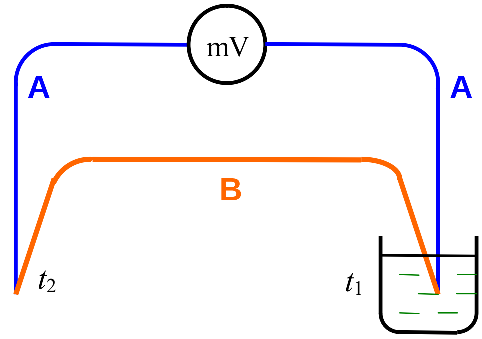
Vyřešením této soustavy rovnic získáme hledané parametry odporového teploměru R_0 , a a b a můžeme pak na základě vztahu (1) každé naměřené hodnotě R_t odporu spirály přiřadit příslušnou teplotu t. Grafické znázornění závislosti odporu odporového teploměru na teplotě pak udává kalibrační křivka, z níž lze přímo ze změřeného odporu odečíst hledanou teplotu.

b) Termočlánek

Termočlánek (termoelektrický článek) je elektrický obvod vytvořený ze dvou různých vodičů s různou výstupní prací elektronů z daného kovu. V důsledku toho vzniká na styku obou vodičů **kontaktní potenciál vzrůstající se zvyšující se teplotou**. Když budou mít oba spoje termočlánku stejnou teplotu, bude stejný i kontaktní potenciál v obou spájených místech, což ale při opačné polaritě obou napětí dává výsledné napětí nulové. Teprve když se začne lišit teplota spájených míst, budou různé kontaktní potenciály v obou spojích termočlánku a v obvodu vznikne elektromotorické napětí, nazývané termoelektrickým napětím **Seebeckovým**. Termočlánek tak může sloužit jako elektrický zdroj.

Pro Seebeckovo termoelektrické napětí U_e přitom platí, že je přímo úměrné rozdílu teplot obou spojů termočlánku. Velikost tohoto napětí při teplotním rozdílu jednoho stupně však činí pro různé dvojice kovů řádově pouhé desítky mikrovoltů.

Seebeckova termoelektrického jevu se hlavně využívá při měření teploty (viz obr. 1). Jeden z vodičů tvořících termočlánek je připojen ke svorkám milivoltmetru, jenž měří rozdíl termoelektrických napětí na obou spojích. Přitom jeden spoj (tzv. „studený“) udržujeme na konstantní teplotě (obvykle bývá ponořen do směsi ledu a vody při 0 °C), zatímco druhý měřící (tzv. „teplý“) spoj je umístěn do místa, jehož teplotu chceme určit.



Obr. 1 - termočlánek

Termoelektrické napětí U_e je prakticky přímo úměrné teplotnímu rozdílu obou spojů, při větších teplotních rozdílech je lze pro větší přesnost měření charakterizovat kvadratickou závislostí

$$U_e = a \cdot (t_2 - t_1) + b \cdot (t_2 - t_1)^2 \quad ,$$

kde konstanty a, b jsou veličiny charakteristické pro daný typ termočlánku. Jejich fyzikálními jednotkami jsou $[a]$ = V.K^{-1} a $[b]$ = V.K^{-2}. Je-li teplota „studeného“ spoje t_1 právě 0 °C, lze termoelektrické napětí U_e vyjádřit jen jako funkci teploty t_2 konce „teplého“. Píšeme-li pak místo teploty t_2 pouze t, dostáváme pro tento případ vyjádření Seebeckova termoelektrického napětí ve tvaru

$$\boxed{U_e = a \cdot t + b \cdot t^2} \quad . \tag{3}$$

Podobně jako v případě odporového teploměru, lze i u termočlánku vypočítat konstanty a, b (zde nám stačí pouze dvě rovnice pro dvě neznámé). Vypočítáme-li tyto hodnoty, můžeme pak snadno na základě vztahu (3) každé naměřené hodnotě U_e Seebeckova termoelektrického napětí přiřadit příslušnou teplotu t „teplého“ spoje termočlánku. Závislost termoelektrického napětí U_e na teplotě pak udává kalibrační křivka termočlánku.

c) Termistor

Termistory jsou odpory zhotovené z různých polovodičových materiálů, jejichž **odpor s teplotou výrazně klesá**. Mají jednoduchou konstrukci, malé rozměry, mechanickou stabilitu, dlouhou dobu použití a nevyžadují prakticky žádnou údržbu. Jako výchozí materiál se při výrobě termistorů používají často různé oxidy, například NiO_2, Mn_2O_3, Co_2O_3, UO_2, Fe_2O_3 a podobně.

Vodivost termistoru $G = 1/R$ závisí – ostatně jako u každého polovodiče – na absolutní teplotě tak, že s rostoucí teplotou T exponenciálně vzrůstá (a odpor R naopak exponenciálně klesá), což vyjadřuje vztah

$$G = G_0 . e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad , \tag{4}$$

kde $k = 1{,}381.10^{-23}$ J.K^{-1} je **Boltzmannova konstanta** a E_g **pak aktivační energie** (též šířka zakázaného pásu) daného polovodiče. G_o je konstanta vyjadřující vodivost polovodiče při určité teplotě T_o. V grafu, kde na osu x nanášíme převrácenou hodnotu absolutní teploty T^{-1} a na osu y logaritmus vodivosti G, bude závislost (4) znázorněna klesající přímkou

$$\ln G = \ln G_o - \frac{E_g}{2.k} \times T^{-1} \quad , \qquad (5)$$

jejíž směrnice $-\frac{E_g}{2.k}$ je dána právě hodnotou aktivační energie E_g, čehož lze velmi jednoduše využít při stanovení tohoto základního parametru každého polovodiče (viz obr. 2).

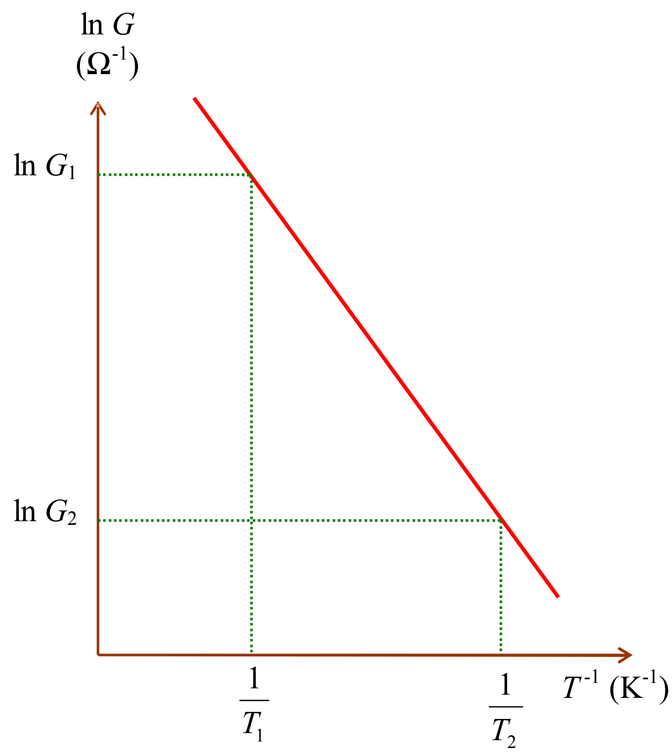
Jsou-li G_1 a G_2 vodivosti termistoru odpovídající teplotám T_1 a T_2, pak po dosazení příslušných dvojic hodnot do rovnice (5) a po krátké úpravě dostáváme konečný vztah pro výpočet aktivační energie termistoru ve tvaru

$$E_g = \frac{2k \times \ln \frac{G_1}{G_2}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad . \qquad (6)$$

Chceme-li však vyjádřit aktivační energii E_g v elektronvoltech (eV), musíme použít převodního vztahu mezi touto jednotkou a joulem

$$1 \text{ J} = 6{,}242.10^{18} \text{ eV} \quad .$$

Po dosazení číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty k pak upravíme rovnici (6) do konečného tvaru



Obr. 2 - k výpočtu aktivační energie polovodiče

$$\boxed{E_g = 1{,}724.10^{-4} \times \frac{\ln \frac{G_1}{G_2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \ \text{(eV)}} \quad . \qquad (7)$$

Postup práce:

1) Kalibrace odporového teploměru, termočlánku i termistoru se provádí **současně.** Jejich čidla jsou ponořena do vodní lázně spolu s přesným rtuťovým teploměrem, podle něhož se kalibrace provádí (zcela přesnou kalibraci lze ovšem dosáhnout pouze tehdy, bude-li u kalibračního teploměru provedena korekce na vyčnívající sloupec rtuti ® viz příloha). Pro „studený“ konec termočlánku (0 °C) je nutno předem připravit ledovou lázeň.

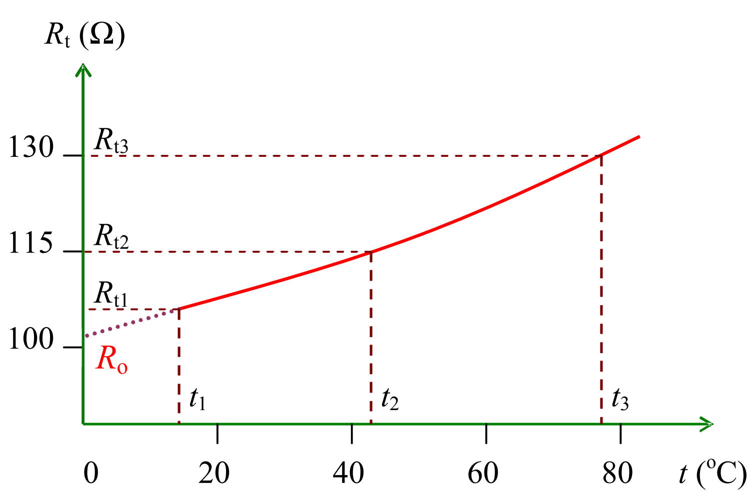
Po ustavení tepelné rovnováhy v aparatuře se odečte teplota t na rtuťovém teploměru, příslušné termoelektrické napětí U_e na milivoltmetru a na automatickém mostě *RLCG* se odečtou odpory platinového odporového teploměru R_{Pt} a termistoru R_{term} (měřené čidlo volíme přepínačem, jehož polohám přiřadíme význam po provedení prvních měření). Měření začněte při pokojové teplotě (cca 20 °C) a další odečítání hodnot provádějte vždy zhruba po pěti stupních, maximálně však do 80 °C. Před každým odečítáním je třeba vyčkat několik minut **do ustálení hodnoty měřených veličin !!!**

Získané hodnoty zapisujte do tabulky (např.):

n	t (°C)	t_{korig} (°C)	U_e (mV)	R_{Pt} (Ω)	R_{term} (Ω)	$1/T$ (K^{-1})	ln G (Ω^{-1})
1							
2							
3							
…							
…							

Poslední dvě kolonky v tabulce je nutno dopočítat, slouží vám k pozdějšímu zpracování měření termistoru!

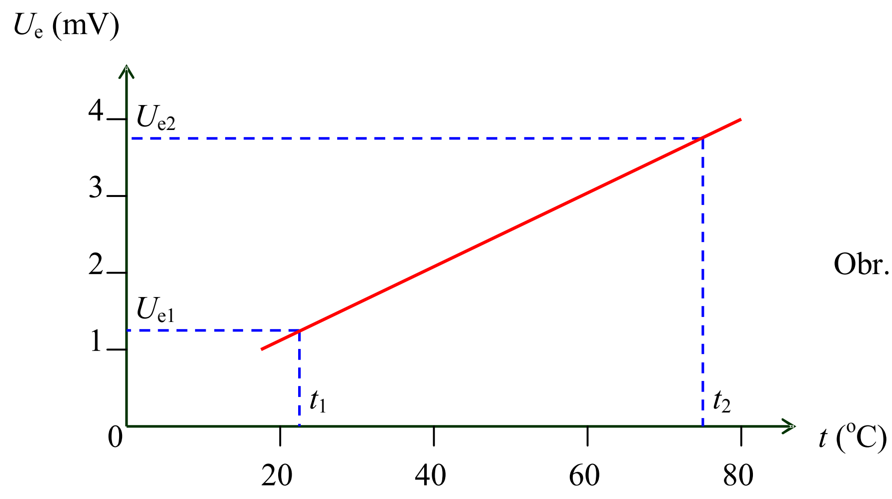
2) Zpracování naměřených hodnot odporu R_{Pt} platinového odporového teploměru proveďte jak početně řešením soustavy rovnic (2), tak i graficky.



Obr. 3

Do grafu vyneste závislost odporu R_t na teplotě t (obr. 3). Z tohoto grafu si vyberte tři vzdálenější body a teprve tyto hodnoty dosaďte do soustavy (2). Jejím řešením pak získáte příslušné konstanty R_o, a a b vašeho platinového teploměru. Hodnotu odporu R_o můžete navíc odečíst pomocí extrapolace přímo z grafu. Vypočítaný lineární součinitel odporu a pak porovnejte s tabulkovou hodnotou pro platinu!

3) Podobným způsobem - početně i graficky – zpracujte naměřené hodnoty termoelektrického napětí termočlánku. Protože je „studený“ spoj v termosce se směsí ledu a vody při stálé teplotě $t_o = 0$ °C, lze do grafu vynášet přímo závislost elektromotorického napětí U_e na teplotě t spoje „teplejšího“ (obr. 4). Pro výpočet konstant a a b měřeného termočlánku si potom vyberte z grafu dva vzdálenější body, odpovídající hodnoty $t_{1,2}$ a $U_{e1,2}$ dosaďte do vztahu (3) a řešením soustavy dvou rovnic o dvou neznámých získáte hledané veličiny a, b.



Obr. 4

4) Zpracování hodnot odporu získaných při kalibraci termistoru proveďte tak, jak je obvyklé pro vyhodnocení teplotní závislosti odporu (resp. vodivosti) každého polovodiče a jak je znázorněno na obr. 2. Na vodorovnou osu vynášejte převrácené hodnoty absolutní teploty $1/T$, na svislou pak přirozený logaritmus vodivosti G. Uvědomte si, že platí

$$\ln G = \ln \frac{1}{R} = -\ln R \qquad \textbf{!!!}$$

K narýsování této závislosti můžete použít též semilogaritmický papír. Do grafu vynesenými body proložte přímku a teprve z této přímky odečtěte dvě vzdálenější dvojice hodnot $1/T_1$, $\ln G_1$, resp. $1/T_2$, $\ln G_2$. Takto získané hodnoty pak dosaďte do rovnice (7) a vypočítejte aktivační energii Eg vámi měřeného termistoru!