

Úkol

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 360 K a graficky znázorněte (ev. vytiskněte).
3. Graficky znázorněte závislost logaritmu odporu R termistoru na $\frac{1}{T}$ 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 .

Teorie

Termistor je polovodičová součástka, jejíž odpor závisí na teplotě, nejčastěji s teplotou klesá. To je způsobeno zvýšením koncentrace nositelů náboje či zvýšení jejich pohyblivosti při rostoucí teplotě. V obou případech Závisí odpor termistoru R_t na teplotě T vztahem

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

Konstanta R_∞ závisí na materiálu a rozměrech termistoru, veličina charakterizuje v prvním případě teplotní citlivost součástky, v případě druhém změnu pohyblivosti nositelů náboje.

Klesající odpor s rostoucí teplotou znamená, že termistor má záporný teplotní součinitel odporu α . Ten navíc není konstantní, ale závislý na teplotě podle

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

Aktivační energie je energie potřebná k ionizaci příměsi, tedy k tomu, aby se elektron dostal z příměsového atomu do vodivostního pásu. V literatuře se zpravidla uvádí v jednotkách eV nebo J mol^{-1} . Lze vypočítat jako

$$\Delta U = 2RB, \quad (3)$$

kde $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ je plynová konstanta.

Konstanty B a R_∞ nejlépe získáme z lineární regrese grafu rovnice

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

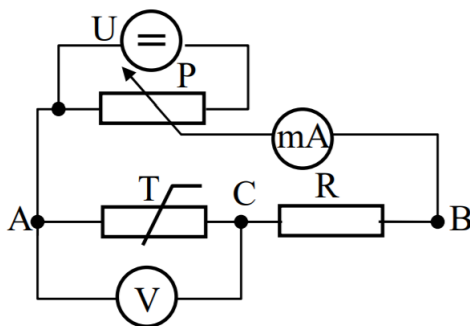
Pomocí zapojení 1 naměříme statickou voltampérovou charakteristiku termistoru. Teplotu v bodě maxima spočítáme podle vzorce

$$T_m = \frac{1}{2}(B - \sqrt{B(B - 4T_0)}), \quad (5)$$

kde T_0 je teplota okolí. Pomocí této hodnoty pak stanovíme tepelný odpor K pomocí

$$K = \frac{T_m - T_0}{U_m I_m}. \quad (6)$$

Indexem m jsou označeny hodnoty při maximálním napětí na termistoru.

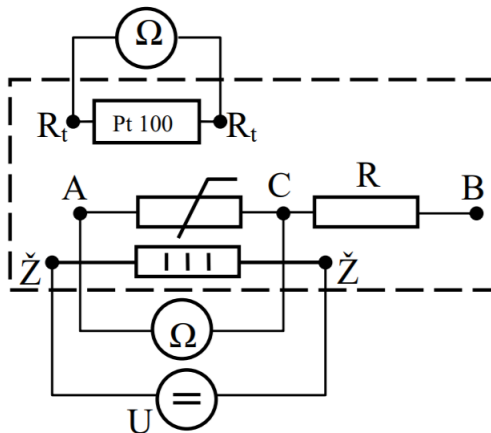


Obrázek 1: Zapojení pro měření statické charakteristiky termistoru

Pomocí schématu 2 měříme závislost odporu termistoru na teplotě. Teplotu měříme platinovým odporovým teploměrem, hodnoty teplot v kelvinech získáme z naměřených odporů R_{Pt} pomocí vztahu

$$T = \frac{R_{Pt} - R_0}{\alpha_{Pt} R_0} + 273,15, \quad (7)$$

přičemž $R_0 = 100 \Omega$ je odpor teploměru při teplotě $273,15 \text{ K}$ a $\alpha_{Pt} = 3,85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ je teplotní součinitel odporu teploměru.



Obrázek 2: Schéma pro měření závislosti odporu termistoru na teplotě

Výsledky měření

Úkol 1

Tabulka 1 obsahuje naměřené hodnoty statické voltampérové charakteristiky termistoru. Pro měření napětí i proudu byly použity multimetry **METEX MXD-4660A** při nastavení DC V s rozsahem 2 V, resp. DC A s rozsahem 200 mA. Uvedené chyby odpovídají chybě přístroje.

I [mA]	σ_I [mA]	U [V]	σ_U [V]
0,08	0,03	0,0470	0,0003
0,20	0,03	0,1191	0,0004
0,31	0,03	0,1834	0,0004
0,39	0,03	0,2332	0,0004
0,49	0,03	0,2933	0,0004
0,60	0,03	0,3529	0,0005
0,73	0,03	0,4206	0,0005
0,80	0,03	0,4564	0,0005
0,91	0,03	0,5092	0,0006
1,01	0,03	0,5525	0,0006
1,58	0,04	0,7523	0,0007
2,14	0,04	0,8756	0,0007
3,15	0,04	0,9952	0,0008
4,13	0,04	1,0434	0,0008
4,87	0,04	1,0597	0,0008
5,81	0,05	1,0663	0,0008
6,79	0,05	1,0645	0,0008
8,77	0,06	1,0497	0,0008
10,56	0,06	1,0325	0,0008
12,19	0,07	1,0173	0,0008
14,64	0,07	0,9971	0,0008
16,60	0,08	0,9839	0,0008
18,31	0,08	0,9742	0,0008
20,30	0,09	0,9649	0,0008
22,71	0,10	0,9524	0,0008
24,91	0,10	0,9478	0,0008

Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí a proudu pro statickou charakteristiku termistoru

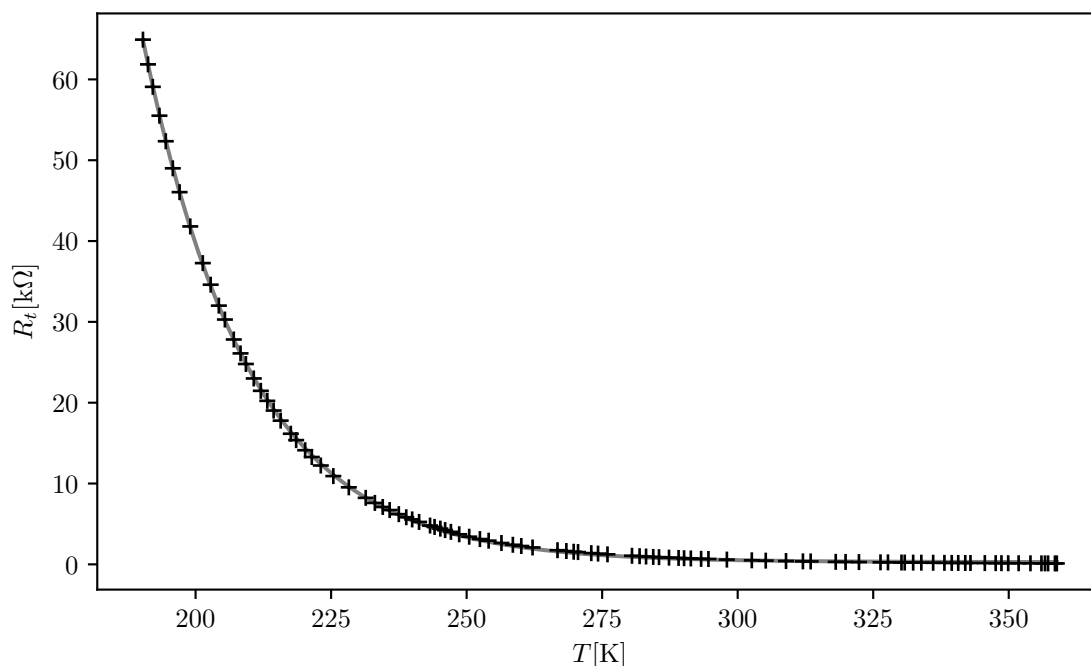
Úkol 2

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty odporů teploměru, přepočtené teploty a odpovídající odpory termistoru. Odpory byly měřeny multimetry **METEX MXD-4660A**, pro R_{Pt} s nastavením OHM 200 Ω , pro R_t do hodnoty 245 Ω s nastavením OHM 200 k Ω , dále s rozsahem 2 k Ω . Teploty byly spočteny podle vzorce (7), chyby podle zákona přenosu chyb.

R_{Pt} [Ω]	$\sigma_{R_{Pt}}$ [Ω]	T [K]	σ_T [K]	R_t [Ω]	σ_{R_t} [Ω]	R_{Pt} [Ω]	$\sigma_{R_{Pt}}$ [Ω]	T [K]	σ_T [K]	R_t [Ω]	σ_{R_t} [Ω]
68,10	0,19	190,3	0,5	64 920	130	98,17	0,25	268,4	0,6	1650	32
68,46	0,19	191,2	0,5	61 860	120	98,69	0,25	269,7	0,6	1560	32
68,80	0,19	192,1	0,5	59 080	120	99,00	0,25	270,6	0,6	1520	32
69,27	0,19	193,3	0,5	55 510	110	99,94	0,25	273,0	0,6	1390	32
69,72	0,19	194,5	0,5	52 350	110	100,42	0,25	274,2	0,7	1330	32
70,22	0,19	195,8	0,5	49 000	100	101,09	0,25	276,0	0,7	1240	32
70,70	0,19	197,0	0,5	46 050	100	102,83	0,26	280,5	0,7	1060	32
71,46	0,19	199,0	0,5	41 810	90	103,37	0,26	281,9	0,7	1010	32
72,35	0,19	201,3	0,5	37 270	90	103,83	0,26	283,1	0,7	970	31
72,91	0,20	202,8	0,5	34 600	80	104,34	0,26	284,4	0,7	920	31
73,49	0,20	204,3	0,5	32 010	80	104,75	0,26	285,5	0,7	890	31
73,92	0,20	205,4	0,5	30 290	80	105,46	0,26	287,3	0,7	830	31
74,55	0,20	207,0	0,5	27 820	70	106,14	0,26	289,1	0,7	790	31
75,03	0,20	208,3	0,5	26 100	70	106,53	0,26	290,1	0,7	760	31
75,41	0,20	209,3	0,5	24 790	70	107,01	0,26	291,4	0,7	730	31
75,97	0,20	210,7	0,5	23 000	60	107,74	0,27	293,3	0,7	680	31
76,47	0,20	212,0	0,5	21 470	60	108,26	0,27	294,6	0,7	660	31
76,93	0,20	213,2	0,5	20 230	60	109,57	0,27	298,0	0,7	590	31
77,38	0,20	214,4	0,5	19 030	60	111,34	0,27	302,6	0,7	500	31
77,88	0,21	215,7	0,5	17 780	60	112,33	0,27	305,2	0,7	460	31
78,60	0,21	217,6	0,5	16 160	50	113,77	0,28	308,9	0,7	410	31
78,98	0,21	218,6	0,5	15 370	50	114,97	0,28	312,0	0,7	370	31
79,62	0,21	220,2	0,5	14 120	50	115,52	0,28	313,5	0,7	360	31
80,09	0,21	221,4	0,5	13 280	50	117,30	0,28	318,1	0,7	310	30
80,73	0,21	223,1	0,5	12 230	50	118,00	0,29	319,9	0,7	300	30
81,62	0,21	225,4	0,6	10 920	50	118,95	0,29	322,4	0,7	280	30
82,72	0,22	228,3	0,6	9530	40	120,48	0,29	326,3	0,8	250	30
83,92	0,22	231,4	0,6	8230	40	121,01	0,29	327,7	0,8	245	30
84,57	0,22	233,1	0,6	7600	40	121,97	0,29	330,2	0,8	226,7	0,6
85,13	0,22	234,5	0,6	7100	40	122,20	0,29	330,8	0,8	223,1	0,6
85,62	0,22	235,8	0,6	6720	40	122,80	0,30	332,4	0,8	214,5	0,6
86,27	0,22	237,5	0,6	6210	40	123,38	0,30	333,9	0,8	206,5	0,6
86,80	0,22	238,9	0,6	5830	40	124,22	0,30	336,1	0,8	195,7	0,6
87,22	0,22	240,0	0,6	5560	40	125,02	0,30	338,1	0,8	186,0	0,6
87,71	0,23	241,2	0,6	5250	40	125,54	0,30	339,5	0,8	180,2	0,6
88,49	0,23	243,3	0,6	4800	40	126,00	0,30	340,7	0,8	174,9	0,6
88,81	0,23	244,1	0,6	4630	40	126,50	0,30	342,0	0,8	169,5	0,6
89,22	0,23	245,1	0,6	4420	40	126,87	0,30	342,9	0,8	165,8	0,5
89,56	0,23	246,0	0,6	4240	40	127,89	0,31	345,6	0,8	155,9	0,5
89,97	0,23	247,1	0,6	4020	40	128,66	0,31	347,6	0,8	148,8	0,5
90,56	0,23	248,6	0,6	3720	40	129,07	0,31	348,7	0,8	145,3	0,5
91,27	0,23	250,5	0,6	3420	35	129,55	0,31	349,9	0,8	141,2	0,5
92,03	0,23	252,4	0,6	3130	35	130,29	0,31	351,8	0,8	135,3	0,5
92,65	0,24	254,1	0,6	2930	34	131,13	0,31	354,0	0,8	128,9	0,5
93,56	0,24	256,4	0,6	2640	34	131,91	0,31	356,0	0,8	123,2	0,5
94,37	0,24	258,5	0,6	2420	34	132,16	0,31	356,7	0,8	121,6	0,5
94,97	0,24	260,1	0,6	2270	33	132,38	0,31	357,3	0,8	120,1	0,5
95,77	0,24	262,2	0,6	2090	33	132,87	0,32	358,5	0,8	116,9	0,5
97,54	0,25	266,8	0,6	1750	33	133,00	0,32	358,9	0,8	116,1	0,5

Tabulka 2: Hodnoty pro určení závislosti odporu termistoru na teplotě

Následující graf vyobrazuje naměřenou závislost proloženou exponenciálním fitem.



Obrázek 3: Závislost odporu termistoru na teplotě

Úkol 3 a 4

V grafu 4 je zobrazena lineární závislost $\log R_t$ na $1/T$ spolu s regresní přímkou podle rovnice (4). Z té jsme určili hodnoty

$$B = (2610 \pm 12) \text{ K},$$

$$R_\infty = (0,086 \pm 0,004) \Omega.$$

Podle vzorce (3) byla spočtena aktivační energie ΔU a podle (2) teplotní součinitel odporu při teplotě 298,15 K

$$\Delta U = (43,40 \pm 0,19) \times 10^3 \text{ J mol}^{-1},$$

$$\alpha = (29,4 \pm 0,2) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

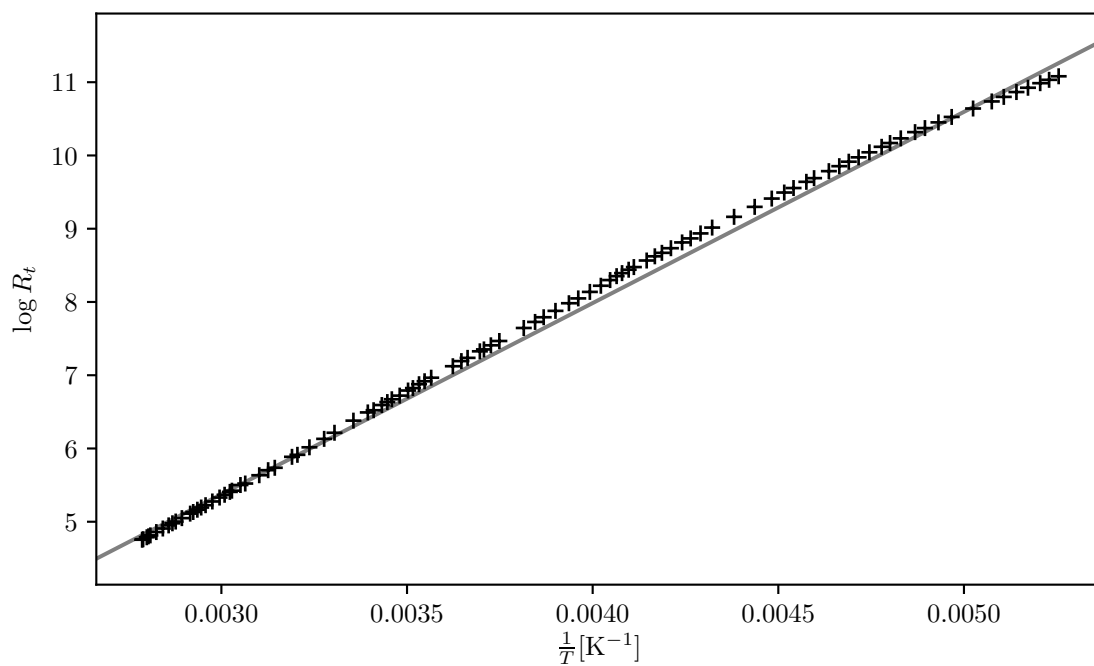
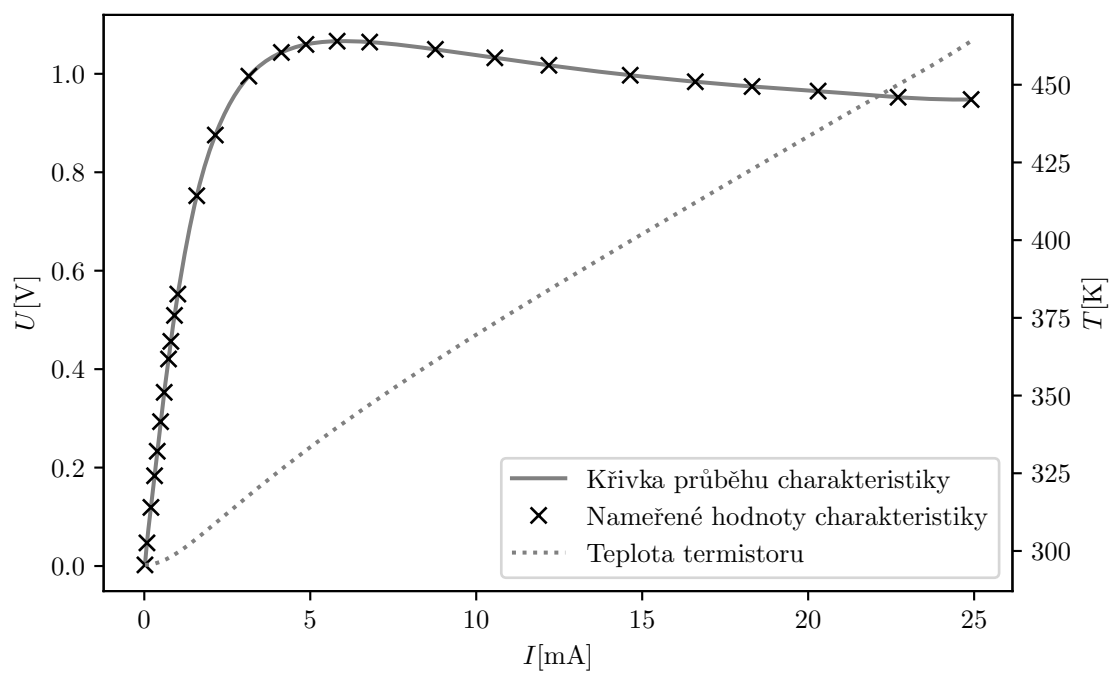
Graf 5 ukazuje statickou voltampérovou charakteristiku termistoru a teplotu termistoru při protékajícím proudu, vypočtenou podle (6). Potřebné konstanty T_0 a T_m byly určeny z lineární regrese lineární části grafu 5 a srovnáním s průběhem teplotní závislosti odporu, respektive ze vztahu (5):

$$T_0 = (295,5 \pm 0,5) \text{ K},$$

$$T_m = (339,7 \pm 0,7) \text{ K}.$$

Konstanta K byla spočtena podle vzorce (6) s použitím výše uvedených konstant

$$K = (7,14 \pm 0,08) \times 10^3 \text{ K W}^{-1}.$$

Obrázek 4: Lineární regrese závislosti $\log R_t$ na $1/T$ 

Obrázek 5: Statická voltampérová charakteristika termistoru s průběhem teploty

Diskuse

Při tomto měření je velké množství možných chyb spojeno s nedokonalou teplotní rovnováhou v měřicí soustavě, především pak při měření teplotní závislosti odporu. Teploměr totiž nemohl být na přesně stejném místě jako termistor, jistě tedy vzniká určitá systematická chyba v určení teploty, která se v uvedených hodnotách chyb neodráží. V průběhu měření statické charakteristiky pak mohlo vlivem malé prodlevy mezi změnou protékajícího proudu a odečtením měřených hodnot dojít k určitému nadhodnocení měřeného napětí.

K výše uvedeným příčinám chyb také přistupuje skutečnost, že teplota okolí nebyla měřena přímo, ale odečtena později z lineární regrese lineární části statické charakteristiky, která mohla být již zmíněným způsobem zkreslená.

Závěr

Křivka naměřené statické charakteristiky termistoru v první části lineárně roste, následně mírně klesá. Naměřená teplotní závislost má exponenciální průběh, obě závislosti odpovídají teoretické předpovědi.

Z lineární regrese podle rovnice (4) jsme určili konstanty

$$B = (2610 \pm 12) \text{ K},$$

$$R_{\infty} = (0,086 \pm 0,004) \Omega,$$

dále byla spočtena aktivační energie

$$\Delta U = (43,40 \pm 0,19) \times 10^3 \text{ J mol}^{-1}$$

a teplotní součinitel odporu termistoru při pokojové teplotě

$$\alpha = (29,4 \pm 0,2) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Ze statické charakteristiky byly spočteny hodnoty teploty termistoru v maximu charakteristiky a tepelný odpor

$$T_m = (339,7 \pm 0,7) \text{ K},$$

$$K = (7,14 \pm 0,08) \times 10^3 \text{ K W}^{-1}.$$

Literatura

- [1] Studijní text "Charakteristiky termistoru", dostupné z http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_209.pdf, 18. 11. 2017