

**Úloha**

1. Odmerajte statickú charakteristiku termistora pre prúdy do 25 mA a graficky ju znázornite.
2. Odmerajte teplotnú závislosť odporu termistora v teplotnom intervale 180 - 380 K.
3. Graficky znázornite závislosť logaritmu odporu  $R$  na  $1/T$  a vyhodnoťte veľkosť materiálových veličín  $R_\infty$  a  $B$ , aktivačnej energie  $U$  a teplotného súčiniteľa odporu  $\alpha$  pri pokojovej teplote.
4. Stanovte teplotu termistora v maxime charakteristiky, prípadne v niektorých ďalších bodoch a tepelný odpor  $K$ .

**Teória**

Termistory sú polovodičové odpory, ktoré využívajú veľkú závislosť odporu na teplote. Polovodiče majú totiž plne obsadený valenčný pás a prázdny vodivostný pás (prípadne ešte prímesové hladiny). Vodivosť je potom úmerná množstvu excitovaných elektrónov, ktoré závisí od teploty zhruba podľa Boltzmannovho rozdelenia. Odpor je podľa [1]:

$$R = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad \text{kde} \quad B = \frac{\Delta U}{2k} \quad (1)$$

kde  $R_\infty$  je veličina závislá na materiáli a rozmeroch,  $B$  je charakteristické pre daný polovodič,  $\Delta U$  je šírka zakázaného pásu, prípadne energia potrebná k excitácii prímеси a  $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  je Boltzmannova konštanta. Vzťah (1) po logaritmovaní dáva:

$$\ln R = \ln R_\infty + \frac{B}{T} \quad (2)$$

V malých teplotných intervaloch možno použiť teplotný súčiniteľ odporu  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (3)$$

Ak nechám pri pokojovej teplote  $T_o$  pretekať termistorom väčší prúd, ten sa začne zahrievať a jeho teplota sa nakoniec ustáli na hodnote, pri ktorej sa odvádzaný tepelný výkon (úmerný gradientu teploty) rovná elektrickému príkonu  $P$ . Tepelný výkon termistora  $K$  je definovaný ako:

$$K = \frac{T - T_o}{P} \quad (4)$$

Použitím (1) a  $P = \frac{U^2}{R}$  dostanem pre napätie na termistore:

$$U = \sqrt{\frac{R_\infty(T - T_o)}{K} \cdot e^{\frac{B}{T}}} \quad (5)$$

Závislosť vykazuje maximum pri teplote  $T_m$  [1]:

$$T_m = \frac{B - \sqrt{B(B - 4T_o)}}{2} \quad (6)$$

Preto je potrebné obmedziť prúd termistorom napríklad zaradením ochranného odporu.

Pri meraní závislosti odporu daného termistora na teplote som použil platínový teplomer, ktorý bol v bloku spoločne s termistorom. Pre teplotu ním meranú platí [1]:

$$T = 273,15 + \frac{R_{Pt} - 100}{3,85 \cdot 10^{-3} \cdot 100} [\text{K}, \Omega] \quad (7)$$

Pre meranie teplôt od 180 K som blok schladil v tekutom dusíku. Pre meranie vyšších teplôt až do 380 K bol v bloku umiestnený topný odpor, ktorým som nechal pretekať 0,5 a 1 A.

## Meranie

Digitálny prístroj Mastech MY-65 bol použitý ako miliampérmeter s presnosťou 0,5% + 5 digit a ako ohmmeter k platínovému teplomeru s presnosťou 0,5% + 10 digit (v teplote sa prejaví ako 2°C). Digitálny prístroj Metex MXD-4660A bol použitý ako voltmeter s presnosťou 0,05% + 3 digit a ako ohmmeter k termistoru s presnosťou 0,15% + 5 digit. Teplota v laboratóriu bola 22,6°C. U ohmmetra Mastech som pri výpočte teploty podľa (7) odpočítaval 0,11Ω, čo bol odpor, ktorý prístroj ukazoval pri spojení privodných vodičov.

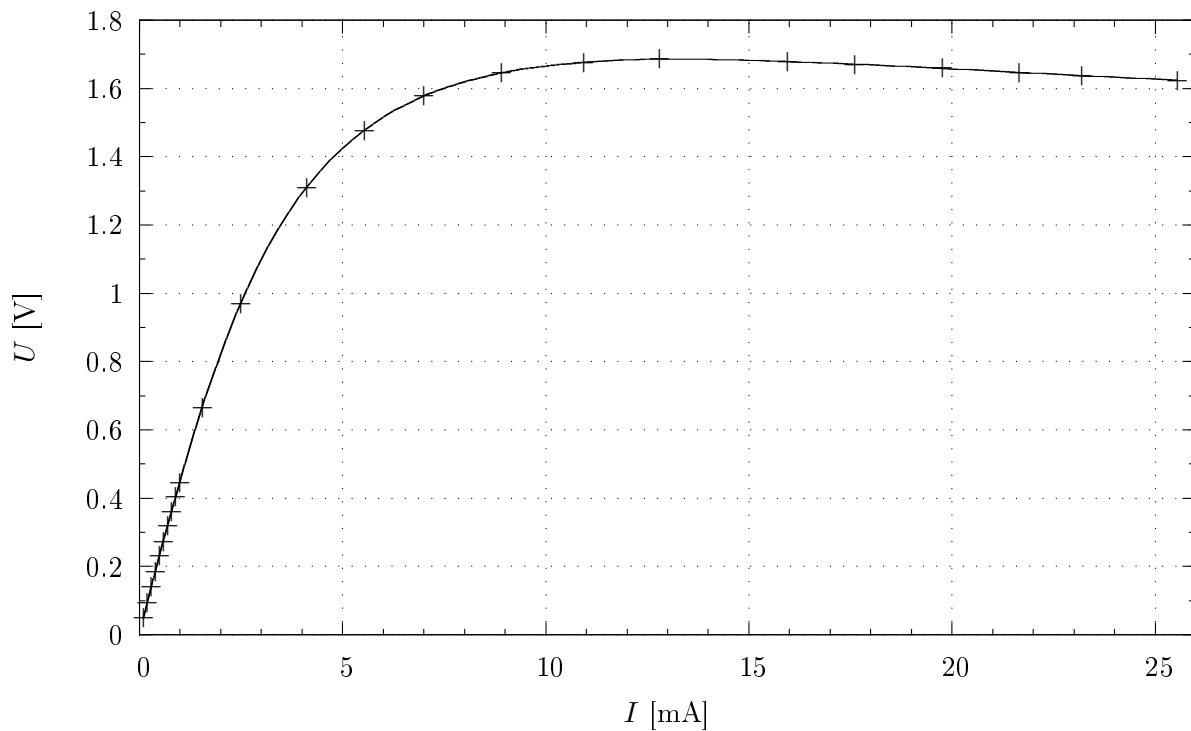
$I$ [mA]	$U$ [mV]
0,1035	48,08
0,2026	93,74
0,3039	140,22
0,4037	185,70
0,5029	230,3
0,5977	272,5
0,7047	319,7
0,7994	360,7
0,9010	404,0
1,0015	446,3
1,556	664,2
2,503	969,4
4,131	1311,0
5,551	1478,4
7,008	1578,0
8,920	1645,5
10,955	1676,3
12,812	1685,6
15,963	1678,5
17,613	1670,9
19,780	1658,7
21,66	1647,0
23,21	1637,6
25,56	1624,2

Tabuľka 1

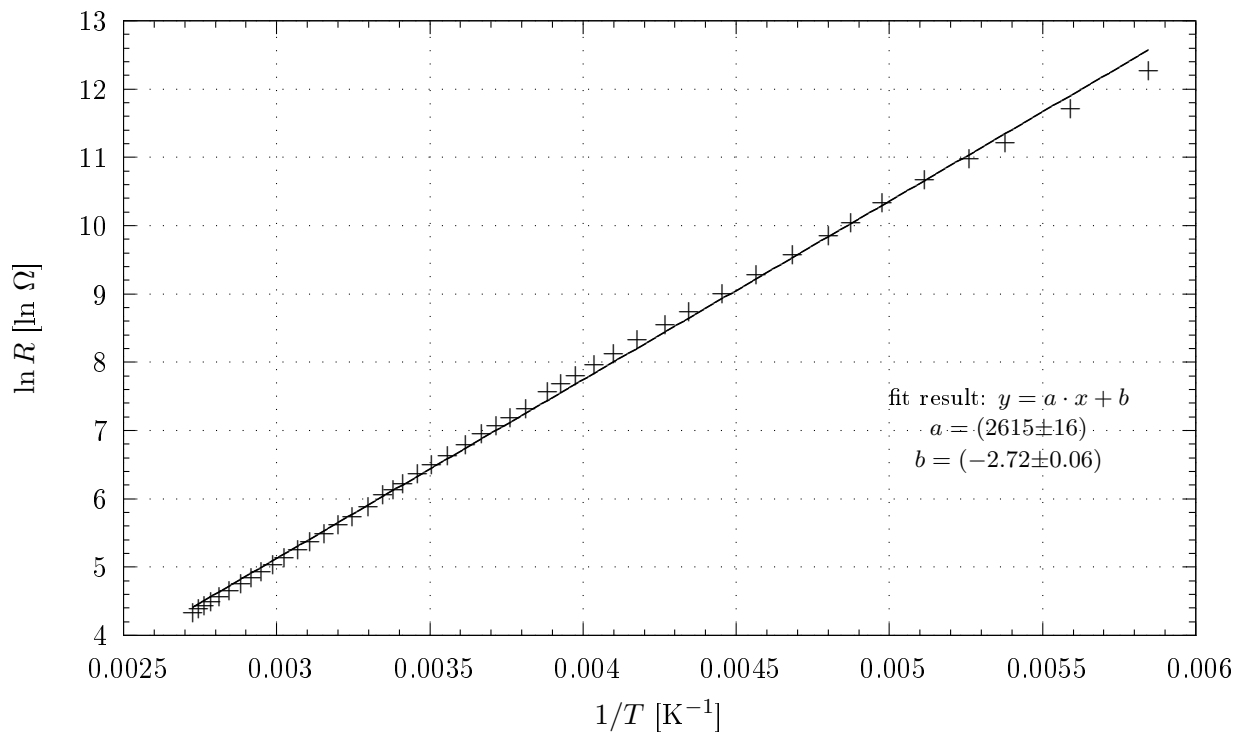
$R_{Pt}$ [Ω]	$T$ [K]	$R$ [kΩ]	$R_{Pt}$ [Ω]	$T$ [K]	$R$ [kΩ]
60,80	171,0	213,1	103,10	280,9	0,763
63,80	178,8	123,0	104,76	285,2	0,660
66,50	185,9	74,0	106,20	289,0	0,584
68,11	190,0	59,21	107,77	293,0	0,5052
70,21	195,5	42,67	108,81	295,7	0,4646
72,30	200,9	30,95	109,89	298,6	0,4262
73,90	205,1	23,11	111,59	303,0	0,3601
75,10	208,2	19,11	113,45	307,8	0,3120
77,11	213,4	14,39	115,17	312,3	0,2755
79,25	219,0	10,80	116,94	316,9	0,2434
81,36	224,4	8,108	118,75	321,6	0,2145
83,50	230,0	6,252	120,33	325,7	0,1923
85,11	234,2	5,171	122,15	330,4	0,1707
87,06	239,3	4,134	123,77	334,6	0,1540
88,85	243,9	3,380	125,42	338,9	0,1388
90,32	247,7	2,843	126,90	342,7	0,1270
91,74	251,4	2,450	128,42	346,7	0,1161
92,92	254,5	2,168	130,17	351,2	0,1051
94,03	257,4	1,929	131,79	355,4	0,0959
95,89	262,2	1,507	133,13	358,9	0,0893
97,25	265,7	1,322	134,18	361,6	0,08451
98,50	269,0	1,177	135,18	364,2	0,08027
99,84	272,4	1,042	136,13	366,7	0,07650
101,38	276,4	0,894			

Tabuľka 2

Graf 1: Statická charakteristika termistora



Graf 2: Závislost odporu na teplotě



$$R_{\infty} = e^{-2,72 \pm 0,06} = (0,066 \pm 0,004) \, \Omega \quad B = (2615 \pm 16) \, \text{K}$$

$$\Delta U = 2 k B = 2 \cdot 1,38065 \cdot 10^{-23} \cdot (2615 \pm 16) = (7,221 \pm 0,044) \cdot 10^{-20} \, \text{J} = (0,451 \pm 0,027) \, \text{eV}$$

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} = -\frac{(2615 \pm 16)}{(273,15 + 22,6)^2} = (-0,0299 \pm 0,0002) \, \text{K}^{-1}$$

Maximum statickej charakteristiky:  $U_m = (1,69 \pm 0,01) \, \text{V}$ ,  $I = (13 \pm 1) \, \text{mA}$ . Teda  $R = (130 \pm 10) \, \Omega$ . Teplotu vyhládam podľa tabuľky 2, lebo výpočet podľa (1) dáva chybu väčšiu ako samotná hodnota:  $T_m = (342 \pm 3) \, \text{K}$ . Výpočet podľa (6) dáva:

$$T_m = \frac{(2615 \pm 16) \cdot (1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 295,8}{2615 \pm 16}})}{2} = (340 \pm 5) \, \text{K}$$

Tepelný odpor v maxime:

$$K = \frac{T_m - T_o}{U_m \cdot I} = \frac{(342 \pm 3) - 295,8}{(1,69 \pm 0,01) \cdot (13 \pm 1) \cdot 10^{-3}} = 2103 \pm 212 = (2,1 \pm 0,2) \cdot 10^3 \, \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor v inom bode:

$U = 1,659 \, \text{V}$ ,  $I = (19,78 \pm 0,10) \, \text{mA} \rightarrow R = (83,9 \pm 0,4) \, \Omega$ . Z tabuľky 2:  $T = (362 \pm 2) \, \Omega$  (chyba je prakticky len z merania odporu platinového teplomera).

$$K = \frac{T - T_o}{U \cdot I} = \frac{(362 \pm 2) - 295,8}{(1,659 \pm 0,001) \cdot (19,78 \pm 0,10) \cdot 10^{-3}} = 2017 \pm 62 = (2,02 \pm 0,06) \cdot 10^3 \, \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

## Diskusia

Prístroje boli pomerne presné, najväčšou chybou prispieval ohmmeter pri platinovom teplomeri. V smernici grafu 2 nie je zarátaná chyba meracích prístrojov, ktorá je menšia než samotná odchýlka závislosti od linerity (vyrátaná je teda štatistická chyba). Táto odchýlka môže byť spôsobená jednak nerovnakým ohrevom teplomera a termistora, jednak neideálnym chovaním termistora.

Hodnoty nameranej a vypočítanej teploty  $T_m$  navzájom súhlasia, rovnako ako tepelný odpor  $K$  v dvoch zvolených bodoch.

## Záver

Namerané parametre termistora sú:

$$R_{\infty} = (0,066 \pm 0,004) \, \Omega \quad B = (2615 \pm 16) \, \text{K} \quad \Delta U = (7,22 \pm 0,04) \cdot 10^{-20} \, \text{J} = (0,45 \pm 0,03) \, \text{eV}$$

$$K = (2,02 \pm 0,06) \cdot 10^3 \, \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný súčiniteľ odporu pre teplotu v laboratóriu  $22,5^\circ\text{C}$  bol  $(-0,0299 \pm 0,0002) \, \text{K}^{-1}$ .

## Literatúra

[1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II. SPN, Praha 1989