

## 9. CHARAKTERISTIKY TERMISTORU

### *Vlastnosti termistorů*

Termistory jsou polovodičové rezistory, u nichž se využívá velké závislosti odporu na teplotě. Nejčastěji se používají termistory, jejichž odpor klesá s rostoucí teplotou, což znamená, že mají záporný součinitel odporu. Zmenšení odporu s rostoucí teplotou může být způsobeno zvyšováním koncentrace nositelů náboje, zvyšováním jejich pohyblivosti nebo fázovými přechody v materiálu polovodiče.

Zvyšování koncentrace nositelů náboje je charakteristické pro termistory z monokrystalů polovodičů typu A<sup>III</sup> B<sup>IV</sup> (křemík, germanium). V oblasti teplot, v níž převládá přímá vodivost, lze vyjádřit teplotní závislost odporu termistoru vztahem

$$R = R_{\infty} \exp(B/T) . \quad (1)$$

Veličina  $R_{\infty}$  je závislá na materiálu a rozměrech polovodiče, veličina  $B$  charakterizuje teplotní citlivost termistoru. Pro kovalentní polovodiče, v nichž s růstem teploty vzrůstá koncentrace nositelů, lze psát

$$B = \Delta U / (2k) , \quad (2)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $\Delta U$  je energie potřebná k ionizaci příměsi, tj. k tomu, aby se elektron z příměsového atomu dostal do vodivostního pásu (aktivační energie).

Převážná část průmyslově vyráběných termistorů se připravuje spékáním oxidů některých kovů jako niklu, kobaltu, uranu, železa a dalších, u nichž nejsou valenční sféry zcela zaplněny a při tvorbě oxidů vznikají ionty s rozdílnými náboji. Elektrická vodivost je způsobena výměnou elektronů mezi sousedními ionty. Energie potřebná k výměně nábojů je malá, takže elektrony (díry) je možno považovat za volné. Jejich koncentrace je prakticky nezávislá na teplotě. S růstem teploty však exponenciálně vzrůstá jejich pohyblivost a teplotní závislost odporu termistoru můžeme opět vyjádřit vztahem (1). Veličina  $B$  v tomto případě charakterizuje změnu pohyblivosti nositelů náboje.

### *Teplotní součinitel odporu*

Teplotní součinitel odporu je obecně definován vztahem

$$\alpha = \frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT} \quad (3)$$

Po dosazení ze vztahu (1) dostaneme

$$\alpha = -B/T^2 . \quad (4)$$

U termistorů není tedy teplotní součinitel konstantní. S rostoucí teplotou se zmenšuje úměrně kvadrátu teploty. V katalogích elektrotechnických součástek se zpravidla udává jeho hodnota při pokojové teplotě. Experimentálně zjišťujeme jeho hodnotu ze změny odporu termistoru odpovídající změně teploty o 1 K, tedy ze směrnice křivky udávající teplotní závislost odporu stanovené v bodě příslušném zvolené teplotě.

### Aktivační energie

Materiální konstantu  $B$  můžeme stanovit ze dvou hodnot odporů  $R_1$  a  $R_2$  naměřených při známých teplotách  $T_1$  a  $T_2$  podle vztahu

$$B = \frac{2,3 \cdot \log(R_1 / R_2)}{1/T_1 - 1/T_2} \quad (5)$$

Přesnost stanovení veličiny  $B$  bude tím větší, čím více se budou lišit teploty  $T_1$  a  $T_2$ .

Během měření v praxi stanovujeme teplotní závislost odporu termistoru v širokém teplotním oboru. Vyneseme-li závislost  $\log R = f(1/T)$ , měli bychom získat přímku, popsanou rovnicí

$$\log R = \log R_\infty + 0,434B/T \quad (6)$$

plynoucí z (1). Extrapolací pro  $1/T \rightarrow 0$  můžeme určit veličinu  $R_\infty$ .

Ve fyzikální literatuře se aktivační energie uvádí buď v elektronvoltech (eV) nebo v J/mol. Hodnotu v elektronvoltech získáme ze vztahu (2), dosadíme-li hodnotu Boltzmannovy konstanty  $k$  v těchto jednotkách ( $k = 0,8617 \cdot 10^{-4}$  eV). Údaj v J/mol získáme, vynásobíme-li Avogadrovým číslem  $N_A$  hodnotu aktivační energie získanou ze vztahu (2) po dosazení hodnoty  $k = 1,38 \cdot 10^{-13}$  J/K. Protože  $kN_A = R$  je plynová konstanta ( $R = 8,314$  J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), dostaneme ze vztahu (2)

$$\Delta U = 2RB \quad (7)$$

Pro termistory je typická hodnota aktivační energie řádu 10 kJ/mol.

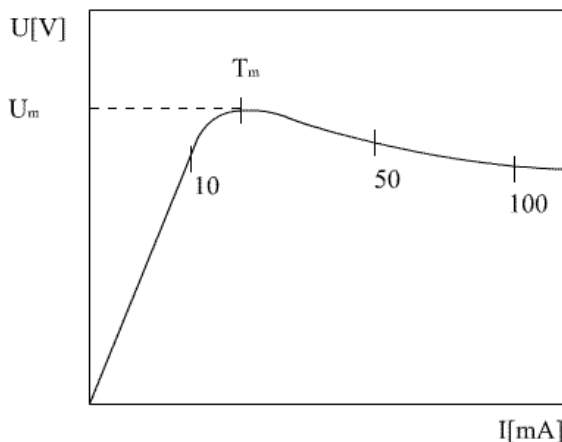
### Statická charakteristika

Tato charakteristika znázorňuje závislost napětí na termistoru na procházejícím proudu. Přibližný tvar charakteristiky je zakreslen na obr. 1.

Orientačně jsou u křivky uvedeny číselné hodnoty rozdílu teplot termistoru a jeho okolí. Průchodem proudem se totiž termistor ohřívá a jeho teplota se nastaví na hodnotu, při níž je v rovnováze elektrický příkon  $P$  a tepelný výkon odváděný z termistoru do okolí

$$KP = T - T_0 \quad (8)$$

V této rovnici znamená  $K$  tepelný odpor termistoru (v technické literatuře se též používá termín výkonová citlivost),  $T$  je teplota termistoru a  $T_0$  teplota okolí. Uvážíme-li že elektrický příkon lze vyjádřit jako poměr kvadrátu napětí  $U$  na termistoru a jeho odporu  $R$  ( $P = U^2/R$ ), můžeme závislost napětí na termistoru na jeho teplotně vyjádřit vztahem



Obr. 1

$$U = \sqrt{\frac{R_{\infty} \cdot (T - T_0) \cdot \exp(B/T)}{K}} \quad (9)$$

Největší napětí na termistoru bude, dosáhne-li jeho teplota hodnoty

$$T_m = \frac{1}{2} \left[ B - \sqrt{B \cdot (B - 4 \cdot T)} \right]. \quad (10)$$

Při dalším vzrůstu proudu termistorem se zvýší jeho teplota nad  $T_m$  a statická charakteristika bude mít zápornou směrnici. V této oblasti je diferenciální odpor termistoru  $dU/dI$  záporný. Kdyby byl termistor připojen ke zdroji s malým vnitřním odporem, proud termistorem by vzrůstal, až by došlo k jeho zničení. Do série s termistorem je proto nutno zařadit dostatečně velký ochranný odpor, který omezí proud v obvodu.

Z rovnice (10) vyplývá, že teplota a tím i odpor příslušný maximální hodnotě napětí resp. proudu termistoru závisí pouze na veličinách  $B$  a  $T_0$ . Maximum statické charakteristiky přísluší stále stejný odpor termistoru bez ohledu na to, jaký je jeho tepelný kontakt s okolím, jaký je jeho tepelný odpor. Hodnota tepelného odporu určuje pouze velikost maximálního napětí či proudu.

### **Stanovení tepelného odporu**

Každému bodu statické charakteristiky je možno přiřadit určitou teplotu termistoru. Můžeme to provést tak, že stanovíme jeho odpor jako podíl napětí a proudu v daném bodě charakteristiky ( $R = U/I$ ) a z grafu závislost odporu na teplotě stanovíme hledanou teplotu. Známe-li teplotu okolí, můžeme z rovnice (8) vyhodnotit veličinu  $K$ . Za výkon  $P$  dosazujeme hodnotu součinu proudu a napětí v bodě charakteristiky, pro který jsme určili teplotu termistoru. Speciálně pro maximum charakteristiky bude platit

$$K = \frac{T_m - T_0}{U_m I_m}. \quad (11)$$

Indexem  $m$  jsou označeny hodnoty teploty, proudu a napětí při maximálním napětí na termistoru. Tepelný odpor by měl určovat, o kolik Kelvinů se zvětší teplota termistoru při jednotkovém příkonu.

### **Použití termistorů**

Vlastnosti termistorů se využívají především při měření a regulaci neelektrických veličin, které přímo nebo nepřímo ovlivňují odpor termistoru. Jsou použitelné pro měření teploty, rychlosti proudění kapalin a plynů, měření tlaku plynů, tepelná vodivosti apod. V elektronických obvodech se užívají k omezení náběhových proudů, jako děličové stabilizátory a pod.

Pro jednotlivé účely se využívají různé části charakteristiky. Podle předpokládaného použití se volí polovodičový materiál, tvar a velikost termistoru. Pro měření teploty se volí materiál s velkou hodnotou veličiny  $B$ , tedy s velkou tepelnou citlivostí a termistor se vyrábí co nejmenší, aby se termistor neohříval Jouleovým teplem a jeho teplota byla určena teplotou okolí. Obdobný termistor je možno použít k anemometrii nebo k měření a regulaci výšky hladiny kapaliny, ovšem

měří se při mnohem větším proudu, kdy je termistor elektrickým proudem vyhřát nad teplotu vyšší než okolí. V elektronických obvodech se často používají termistory robustní konstrukce, které mohou vyžádit poměrně značný výkon.

### Postup při měření

Termistor je spolu s platinovým odporovým teploměrem a ochranným odporem  $r$  umístěn v držáku, který může být vytápěn topnou spirálou. Tento držák vkládáme do Dewarovy nádoby (termosky). Na horním víku držáku jsou zdířky označené písmeny A, B, C (viz obr. 2),  $R_t$  (vývody platinového odporového teploměru) a  $\check{Z}, \check{Z}$  (vývody topné spirály).

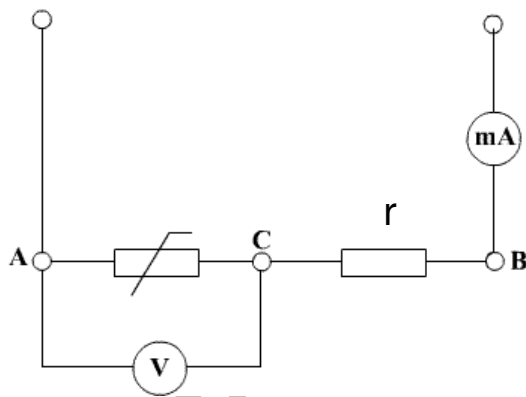
Odpor platinového odporového teploměru se mění lineárně s teplotou. Z odečtených hodnot odporu teploměru vypočítáme teplotu  $t$  (větrná energie stupních Celsia) podle vztahu

$$t = \frac{R_t - R_0}{\alpha \cdot R_0}, \quad (12)$$

kde  $R_t$  a  $R_0$  jsou odpory teploměru při teplotě  $t$  a při teplotě  $0^\circ \text{C}$ ,  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu. Pro používaný odpor je  $R_0 = 100 \, \Omega$ ,  $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \, \text{K}^{-1}$ .

Nejprve změříme statickou charakteristiku termistoru (závislost napětí termistoru na proudu) v zapojení podle obr. 2. Maximální přípustný proud termistorem je 25 mA. Do 1 mA zvyšujeme proud po krocích 0,1 mA, pak po 1–2 mA až do maximálně přípustného proudu. Voltampérová charakteristika je zpočátku lineární, napětí se zvyšuje úměrně proudu, ale již při příkonu řádově 0,1 W se daný termistor znatelně ohřívá a lze pozorovat odchylky od lineárního průběhu.

Po proměření statické charakteristiky termistoru přikročíme k měření teplotní závislosti odporu termistoru. Multimetry použijeme jako ohmmetry a připojíme je ke zdířkám A, B a  $R_t$  a  $R_t$ . Ochladíme termistor v kapalném dusíku (provede učitel) a během oteplování zaznamenáváme současně dvojice odporů (odpor termistoru a platinového teploměru). Jestliže se oteplování zpomalí, můžeme přitápět topnou spirálou (zdířky  $\check{Z}, \check{Z}$ , maximální proud 0,9 A).



Obr. 2

### Literatura:

- [1] Brož, J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983, čl. 4.5.2.5, 4.5.3.5
- [2] Bakule R., Šternberk J.: Fyzikální praktikum II., SPN, Praha 1989
- [3] Frank H., Šnajder V.: Principy a vlastnosti polovodičových součástek, SNTL, Praha 1976, kap. 9.1.
- [4] Stránský J. a kol.: Polovodičová technika I., SNTL/ALFA, Praha 1981, kap. 3.2.3.