

Pro malé odpory je větší činitel jakosti obvodu při sériovém zapojení rezistoru do obvodu. Je však nutno použít sériový držák, který je ve výbavě Q-metru. Nasuneme jej na zdíčky Q-metru a do jeho svorek L připojíme zvolenou cívku, do svorek  $Z_x$  měřený rezistor. Nejprve se provede měření v zatlumeném stavu, tj. při uvolněném zkratovacím šroubu sériového držáku. Odečtou se hodnoty  $C_2$  a  $Q_2$ . Poté se zkratovacím šroubem vyřadí svorky  $Z_x$ , obvod se změnou kapacity vestavěného otočného kondenzátoru uvede opět do rezonance a odečtou se hodnoty  $C_1$  a  $Q_1$ . Pro výpočet odporu slouží vztah

$$R = \frac{\frac{C_1}{C_2} Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} \cdot \frac{1}{\omega C_1} \quad (27)$$

### Literatura

- [1] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983  
odst. 4.4.4, čl. 4.4.6.4, 4.4.7.4, 4.4.8.2
- [2] Sedlák B., Bakule R.: Elektřina a magnetismus, SPN, Praha 1980  
kap. 9

## 9. CHARAKTERISTIKY TERMISTORU

### Pracovní úkol

#### Část A

1. Změřte teplotní závislost odporu termistoru v co největší části teplotního intervalu od 180 do 380 K.
2. Změřte statickou charakteristiku termistoru pro proudy do 25 mA.

#### Část B

3. Získané výsledky měření zpracujte pomocí programu, který máte u úlohy k dispozici.
4. Seznamte se s tímto programem. V referátu stručně popište, jaký matematický postup použil programátor ke stanovení tepelného odporu termistoru  $K$  a teploty okolí  $T_0$ .
5. Na grafu 3, kresleném zapisovačem je zakreslena statická charakteristika (obr.1 ve skriptech). Podle jakého explicitního vztahu je počítána a které parametry termistoru jsou pro výpočet křivky využívány?

6. Experimentálně zjištěnými body závislosti napětí na proudu (křivky na grafu 3) proložte křivku, která podle vašeho názoru nejlépe vystihuje naměřená data. Z této křivky odečtete hodnoty proudu  $I_m$  a  $U_m$  v maximu. K těmto hodnotám přiřaďte teplotu  $T_m$ , která by odpovídala odporu termistoru  $R_m = U_m / I_m$ . Teplotu  $T_m$  stanovte též podle vztahu (11) ve skriptech. Diskutujte otázku, proč se liší hodnoty  $T_m$  stanovené různými způsoby.
7. Pokuste se vysvětlit, proč se liší teplota  $T_0$  stanovená ze vztahu (8) (grafu 1 vyhodnocovaného počítačem) od teploty místnosti.
8. Z hodnot  $I_m$ ,  $U_m$ ,  $T_m$  určených podle 6. pracovního úkolu a teploty místnosti  $T_0$  určete tepelný odpor termistoru  $K$  (vztah 12 ve skriptech). Porovnejte jej s hodnotou stanovenou počítačem. Rozhodněte, která z hodnot tepelného odporu  $K$  odpovídá podle vašeho názoru lépe skutečnosti a zdůvodněte svůj názor.

### 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 polovodivém materiálu.

Zvyšování koncentrace nositelů náboje je charakteristické pro termistory z monokrystalů kovalentních polovodičů typu  $A^{III} B^V$  (křemík, germanium). V oblasti teplot, v níž převládá příměsová 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

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

znamená-li  $k$  Boltzmannovu konstantu a  $\Delta U$  je energie potřebná k ionizaci příměsí, 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). Velikost  $B$  v tomto případě charakterizuje změnu pohyblivosti nositelů náboje.

### Teplotní součinitel odporu

Obecně je definován vztahem

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

Po dosazení ze vztahu (1) dostaneme

$$\alpha = - \frac{B}{T^2} \quad (4)$$

U termistorů není tedy teplotní součinitel odporu konstantní. S rostoucí teplotou se zmenšuje úměrně kvadrátu absolutní 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 jeden kelvín, tedy ze směrnice křivky udávající teplotní závislost odporu stanovené v bodě příslušném zvolené teplotě.

### Aktivační energie

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

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

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 přímkou, popsanou rovnicí

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

plynoucí z (1). Z její směrnice stanovíme veličinu  $B$ . Extrapolací pro  $1/T \rightarrow 0$  můžeme určit veličinu  $R_\infty$ .

Ve fyzikální literatuře se aktivační energie uvádí buď v elektronvoltech nebo v J/mol. Hodnotu v elektronvoltech získáme ze vztahu (2), dosadíme-li hodnotu Boltzmannovy konstanty 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  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K. Protože  $k N_A = R$ , je plynová konstanta

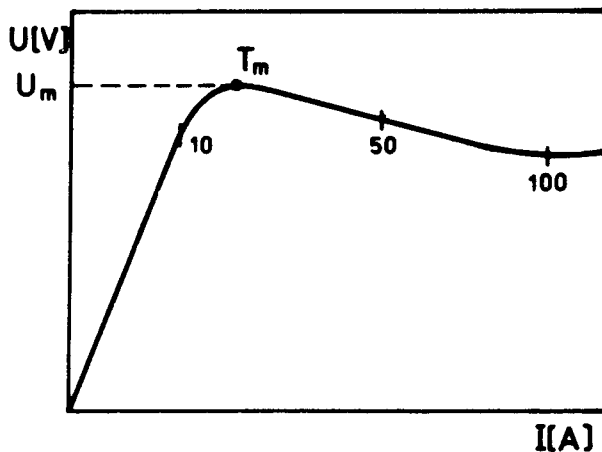
(  $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$  ), dostaneme ze vztahu (2)

$$\Delta U = 2 R B \quad . \quad (7)$$

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 .



Obr. 1

Orientačně jsou u křivky udány číselné hodnoty rozdílu teplot termistoru a jeho okolí. Průchodem proudu 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

$$K P = T - T_0 \quad . \quad (8)$$

V této rovnici znamená  $K$  tepelný odpor termistoru (v technické literatuře se též používá termín výkonová citli-

vost),  $T$  je teplota termistoru a  $T_0$  teplota jeho 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 teplotě vyjádřit vztahem

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

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

$$T_m = \left\{ B - \sqrt{B (B - 4 T_0)} \right\} / 2 \quad . \quad (10)$$

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 respektive 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 závislosti 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 kelvínů se zvětší teplota termistoru při jednotkovém příkonu.

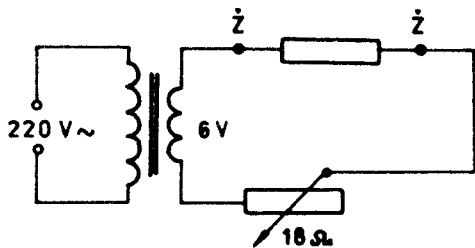
### Použití termistorů

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, tepelné vodivosti a podobně. V elektronických obvodech se používají k omezení náběhových proudů, jako děličové stabilizátory, atd.

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 teplotní citlivostí a termistor se vyrábí o co nejmenších rozměrech. Proud procházející při měření termistorem musí být 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 podstatně vyšším proudu, kdy je termistor elektrickým příkonem vyhřát nad teplotu okolí. V elektronických obvodech se často používají termistory robustní konstrukce, které mohou vyzářit poměrně značný výkon.

## Postup při měření

Termistor je spolu s platinovým odporovým teploměrem umístěn v držáku, který může být vyhříván topnou spirálou. Tento držák vkládáme do Dewarovy nádoby. Před započítím měření teplotní závislosti vlijeme do Dewarovy nádoby asi 0,25 l kapalného dusíku. Při manipulaci s kapalným dusíkem používáme ochranných rukavic a štít z plexiskla. Po odpaření kapalného dusíku se začne držák s termistorem a odporovým teploměrem ohřívát. Ohřívání je možno urychlit přitápěním proudem řádově 1 A. Zapojení topného obvodu napájeného transformátorem 220/6,3 V je zakresleno na obr.2. Jako zdroj topného proudu můžeme



Obr. 2

použít při vyšších teplotách i 24 V = z rozvodu. Je však třeba si uvědomit, že tepelná kapacita odporového teploměru je podstatně větší než termistoru a při velké rychlosti ohřevu budeme mít značnou diferencii v teplotách odporového teploměru a termistoru. Odpor termistoru a platinového teploměru měříme digitálními multimetry G 1001.500 nebo můstky. Multimetry připojujeme spodními svorkami označenými  $R_x$  k platinovému teploměru (zdičky  $R_t$ ) a termistoru (zdičky A, C). Hodnoty odporů odečítáme po skocích cca  $2 \Omega$  na platinovém teploměru. Víme, že odpor termistoru se mění exponenciálně s teplotou a hodnoty jeho odporu postačí číst na 2-3 platné cifry. Kdybychom v okolí pokojové teploty chtěli využít plně citlivosti multimetru a měřili na rozsahu  $0,2 \text{ k}\Omega$ , ohřívát by se termistor Jouleovým teplem. Na rozsahu  $0,2 \text{ k}\Omega$  teče měřeným prvkem proud  $10 \text{ mA}$ . Při odporu termistoru řádově  $10^2 \Omega$  bude jeho příkon řádu  $10^{-2} \text{ W}$  a to je již hodnota postačující k značtelnému ohřátí termistoru. Můžeme se o tom přesvědčit jak experimentálně, tak i srovnáním se stanovenou hodnotou tepelného odporu.

Pro potřeby našeho měření postačí, předpokládáme-li, že odpor platinového odporového teploměru se mění lineárně s teplotou. Z odečtených hodnot odporu teploměru vypočítáme teplotu  $t$  ve stupních Celsia podle vztahu

$$t = (R_t - R_0) / (\alpha R_0) \quad , \quad (12)$$

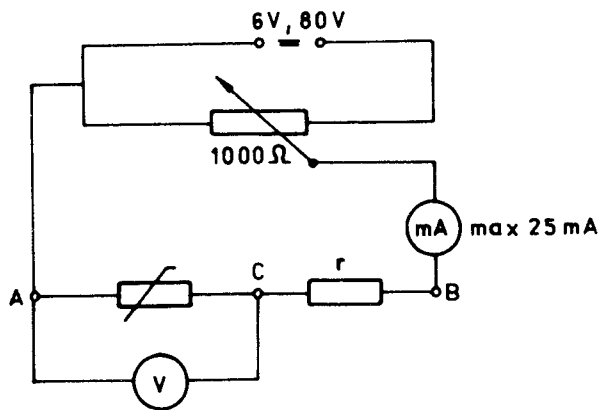
v němž  $R_t$  je odpor teploměru při teplotě  $t$ ,

$R_0$  je odpor při teplotě  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$\alpha$  je teplotní součinitel odporu.

Pro používaný odporový teploměr je  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Schéma zapojení pro měření statické charakteristiky termistoru je zakresleno na obr.3 . Rezistor  $r$  slouží jako ochranný odpor, má zabránit přetížení termistoru v té části charakteristiky, v níž je diferenciální odpor termistoru záporný. Napětí a proud můžeme měřit multimetry



Obr. 3

do maximálního přípustného proudu. Voltampérová charakteristika je zpočátku lineární, napětí se zvyšuje úměrně proudu, ale již při příkonu řádově 0,1 mW se daný termistor znatelně ohřívá a lze pozorovat odchylky od lineárního průběhu.

Z praktického hlediska je výhodnější měřit nejprve statickou charakteristiku a potom teplotní závislost termistoru. Při tomto sledu měření nemusíme čekat na vychladnutí držáku s termistorem a odporovým teploměrem.

#### Poznámky k počítačovému zpracování

Chceme vám v úloze modelovat případ, se kterým se budete poměrně často setkávat, použijete-li cizí program ke zpracování vlastních výsledků. Postup a algoritmy, které použil programátor při tvorbě programu, nelze vždy automaticky považovat za neoptimálnější. Spíše lze říci, že žádný program není tak dokonalý, aby jej nebylo možno zlepšit. Tím spíše, že autorem programu není profesionální programátor.

Programátor a výpočetní technika, kterou máte k dispozici, vám ušetří práci s numerickým a grafickým zpracováním výsledků. Na oplátku chceme, aby jste se seznámili s programem a zaujali k němu vlastní stanovisko. Zhodnoťte proto, zda numerický postup použitý programátorem je vhodný pro stanovení parametrů termistoru  $R_{\infty}$ ,  $B$  a zejména tepelného odporu  $K$ . Jistým vodítkem by vám měly být pracovní úkoly 4 až 8. Napovíme vám, že parametry  $B$  a  $R_{\infty}$  se určují z lineární regrese vycházející ze vztahu (6). Pro určení tepelného odporu  $K$  má zásadní význam vztah (8). Statická charakteristika na grafu 3 (obr.1) už jen demonstruje, nakolik naše představy odpovídají skutečnému chování termistoru.

Při řešení pracovního úkolu 3 využijte toho, že program umožňuje edi-

čítání termistoru v té části charakteristiky, v níž je diferenciální odpor termistoru záporný. Napětí a proud můžeme měřit multimetry G 1001.500, které připojujeme do obvodu horní dvojicí svorek označenou LO a HI. Před připojením ke zdroji je nutno se přesvědčit, zda na výstupu potenciometru je minimální napětí. Proud termistorem nesmí překročit hodnotu  $I_{max} = 25 \text{ mA}$ . Do 1 mA zvyšujeme proud po skocích 0,1 mA, pak po 1 - 2 mA až

tovat zadaná data. Z průběhů zobrazených na obrazovce lze odhadnout, která měření jsou zatížena hrubou chybou a ty vyloučit z daného souboru. Sledujte, jak úpravy v souboru dat ovlivňují hodnoty stanovených parametrů.

V plnění pracovních úkolů 4 a 5 vám pomůže tištěný výpis programu. Používají se v něm některé vám neznámé příkazy modifikovaného Basicu, které slouží pro obsluhu kreslicího zařízení. Seznámit se s nimi můžete v manuálu, který vám bude vydán na požádání.

Pro lepší orientaci v programu uvádíme význam důležitějších identifikátorů používaných v programu.

#### SEZNAM PROMĚNNÝCH

- R0 - odpor teploměru při  $t = 0^{\circ}\text{C}$
- A - teplotní součinitel odporu
- X(NN) } - pracovní pole
- Y(NN) }
- RT(NN) - odpor teploměru
- R(NN) - odpor termistoru
- T1(NN) - teplota vypočtená z odporu teploměru
- T2(N) - teploty termistoru
- I(N) - proud termistorem
- U(N) - napětí na termistoru
- B } - parametry termistoru  $R = R_N \exp\left(\frac{B}{T}\right)$
- RN }
- P1 - počet měření RT, R
- P2 - počet měření U, I
- DU - aktivační energie  $\Delta U$
- PT - pokojová teplota
- AL - součinitel odporu
- AA } - parametry obecné regrese
- BB }
- K - tepelný odpor
- TT - teplota okolí ( $T_0$ )
- NS - konstanta určující počet platných cifer zaokrouhlovaných hodnot
- NA - konstanta 1000 pro přepočet z mA, mV na A a V
- PL - proměnná 0 nebo 1 pro zapojený nebo nezapojený PLOTTER

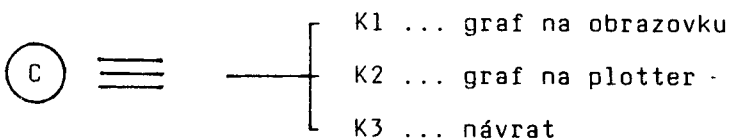
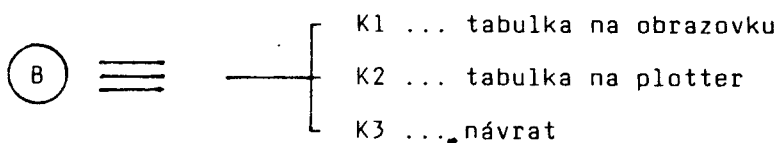
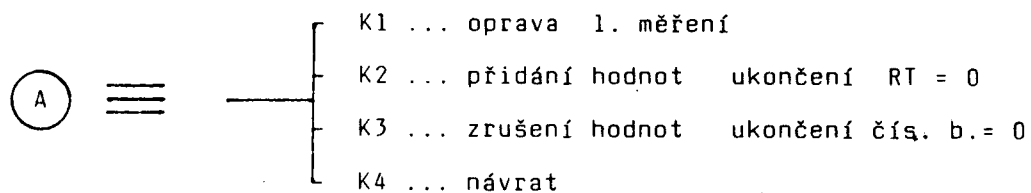


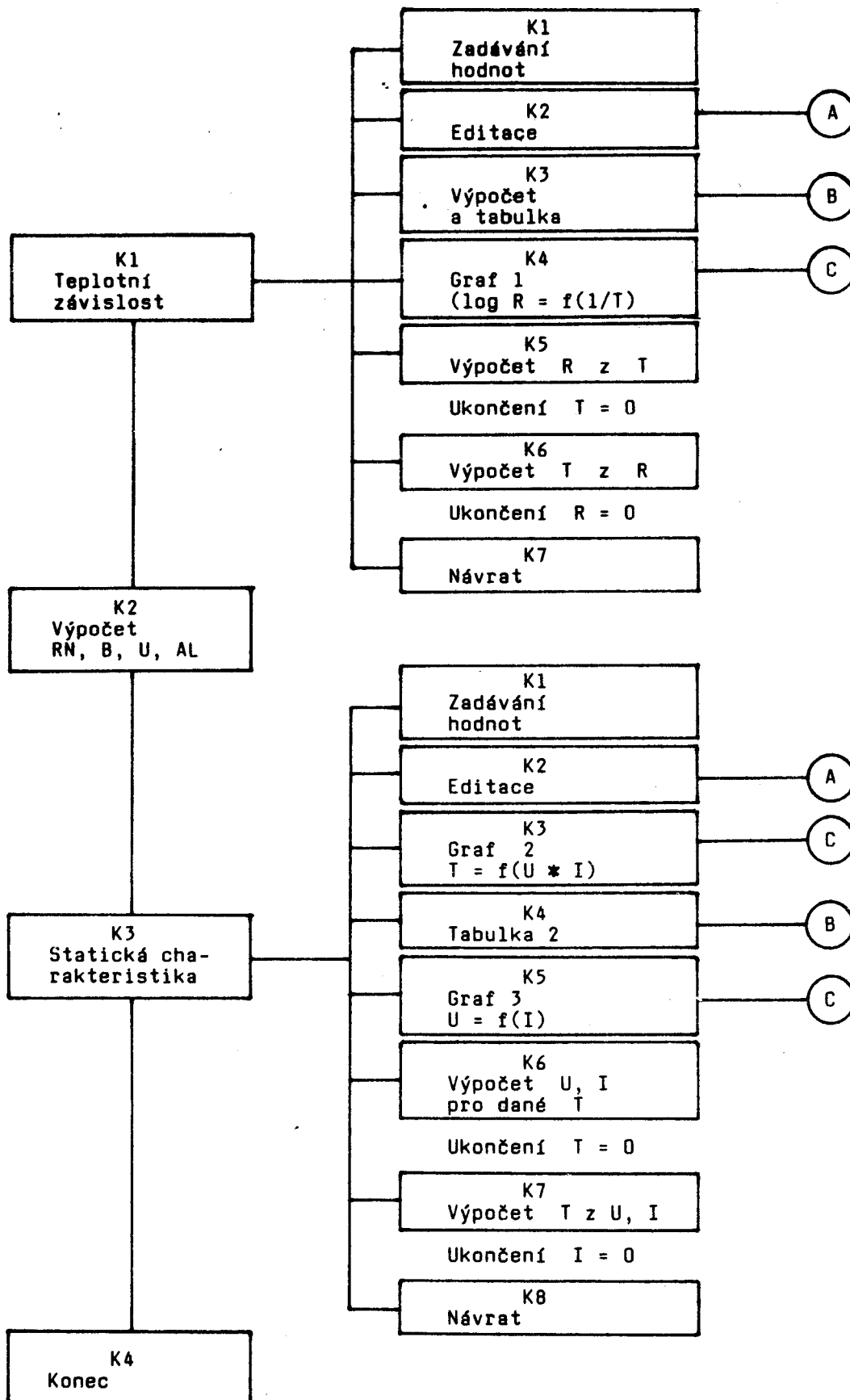
## SEZNAM FUNKCÍ

- L(X) - dekadický logaritmus  
OD(X) - výpočet odporu podle (1)  
T(X) - výpočet teploty z (6)  
G(X) - výpočet log R z (6)  
U(X) - výpočet U z (9)

## BLOKOVÉ SCHÉMA PROGRAMU

V blokovém schéma jsou písmeny A, B, C označeny následující větvení programu.





## Oznámky k obsluze programu

Program je zpracován pro počítač PMD 85-1 a uložen v ROM modulu.

Spuštění programu se provede příkazy :

BASIC G	<input type="checkbox"/>	(povel k nahrání BASICu do počítače)
ROM 5	<input type="checkbox"/>	(povel k nahrání vlastního programu do počítače)
		Počítač na tento povel bude reagovat atypicky opětným tištěním hlášení BASIC G na obrazovku
RUN	<input type="checkbox"/>	spuštění vlastního programu

2. Přesnost výpočtu parametrů termistoru podstatněji nezvýšíme zadáním velkého počtu dat získaných z měření charakteristik termistoru. Tím zvýšíme spíše pravděpodobnost nesprávného zadání hodnoty. Při zpracování dat z měření statické charakteristiky se nesmí zadat hodnota proudu  $I = 0$ .
3. Pro zkrácení jsou v poznámkách (REM) jednotlivé části programu označeny symboly klíčových kláves. Například část programu, ve které se provádí zrušení hodnoty při editaci dat teplotní závislosti by byla označena K1 K2 K3.
4. Opravné spuštění programu (po chybě uživatele) lze provést příkazem

GOTO 21

Po tomto příkazu by měla být zachována dříve uložená data. Je však třeba projít znovu programem s výjimkou nového zadávání dat. Jestliže došlo k chybě například při zadávání dat pro statickou charakteristiku (v části K3 K1), je nutno znovu provést :

- a) výpočet a tabelování (na obrazovku) teplotní závislosti odporu termistoru, část K1 K3
- b) výpočet parametrů termistoru (část K2)

Zpracování statické charakteristiky nelze provést bez vyhodnocení parametrů termistoru.

## Literatura

- [1] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983, čl. 4.5.2.5, 4.5.3.5
- [2] Pasynkov, V.V., Čirkin L.K., Šinkov A.D.: Poluprovodnikovye pribory, Vysšaja škola, Moskva, 1981, kap. 11
- [3] Frank H., Šnejdar 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