

MASURAREA TEMPERATURII

8.1. Prezentare. Traductoare de temperatură.

Temperatura, una din mărimile neelectrice cel mai des întâlnită ca necesitate de măsură în practică, are, din acest motiv, o documentare asupra traductoarelor și schemelor de măsură foarte bogată. Lucrarea își propune a prezenta pe scurt principalele traductoare utilizate și câteva scheme de măsură aplicabile acestor traductoare și adaptate cerințelor unui laborator de măsură electrice. Traductoarele de tip termocuplu, termorezistență, dispozitiv semiconductor (diodă, termistor, varistor) se utilizează în domeniul - 200 ÷ + 1000 ÷ 1400°C (temperaturi în general reci, neîncalzite în todeauna de emisie luminoasă), în timp ce pirometrele de radiație, lucrând în general în domeniul de temperatură + 600°C ÷ 2000 ÷ 2500°C, deci supraîncalzite și în general însoțite de emisie luminoasă (principiu de fapt pe care sînt și realizate, ele bazîndu-se pe receptarea fascicolului luminos, și intermediul unui sistem optic de convergență și atenuare, de către un traductor fotoelectric și prelucrarea ulterioară într-un circuit de măsură a semnalului generat de acesta) permit acoperirea întregii game de temperaturi uzuale măsurabile. Prin natura laboratorului se va acorda în continuare atenție traductoarelor din primul tip susmenționate (termocuplu, termorezistență, dispozitiv semiconductor).

8.1.1. Termocuplul ca traductor de temperatură.

El reprezintă un traductor generator, constituit din asocierea a două metale diferite (Fe - Constantan, Cromel - copel Pt - PtRh, etc), sau a două aliaje diferite, cu un punct de sudură (vezi fig.8.1) la temperatura de măsură T și punctele libere la temperatura mediului (sau de referință T_0), între capetele libere, în cazul îngrădărității:

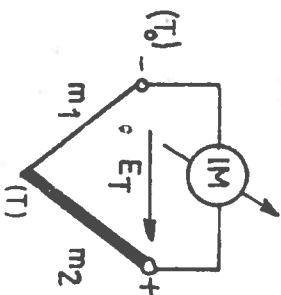
$$T \neq T_0$$


Fig. 8.1

0 ÷ 40°C) și respectiv la limita superioară de măsură, determinată

valoric de timp termocuplului este riguros proporțională cu diferența $(T - T_0)$, conform relației:

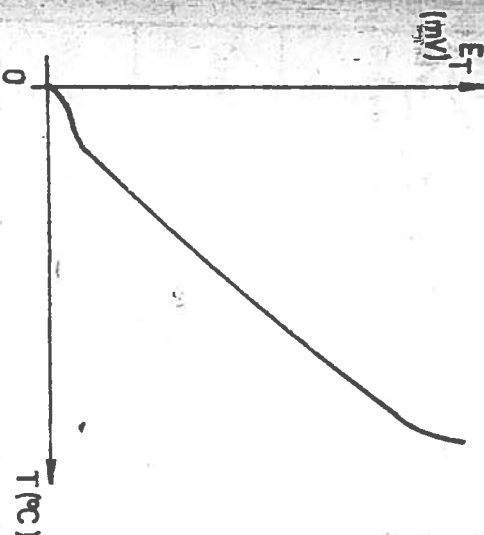
$$E_T = k_T (T - T_0) \quad (8.1)$$


Fig. 8.2

Sensibilitatea termocuplului este de ordinul (2 + 10) mV/100°C, o valoare relativ mică, dar datorită repetabilității valorilor în timp și rigurozității de variație E_T cu temperatura se obțin scheme cu foarte performante de măsură.

Traductorului și schemei de măsurare i se impun o serie de condiții, obligatorii a fi respectate, ca o primă cerință de realizare a unei măsură corecte de temperatură:

- corecta alegere a termocuplului, din punct de vedere a limitelor de măsurare necesare a fi acoperite;
- stabilirea unei valori de referință, T_0 , cât mai învariabilă în timp și temperatură (eventual prin termostatare la schemele mai pretentioase), la limita de liniaritate inferioară a caracteristicii $E_T = f(T)$;
- conectarea traductorului la schema de măsurare cu conductoare din materiale convenabile (alese astfel încît tensiunea contraelectromotoare de contact să fie minimă, avînd în vedere valorile mici ale E_T) și de lungime care să nu depășească 1-2 m, astfel ca rezistența ohmică proprie să fie neglijabilă (și să nu apară căderi de tensiune pe ele, care ar conduce la insensibilizarea schemei de măsură);
- compensarea, la schemele cele mai pretentioase, cu ajutorul unei surse de t.e.m. auxiliare (compensatoare de c.c.c.) a căderilor de tensiune pe firele de conexiune și a tensiunilor contraelectromotoare de contact.

Schema de principiu, la nivel de schemă bloc, de utilizare a termocuplului ca traductor de temperatură, într-o schemă de măsură este dată în fig. 8.3.

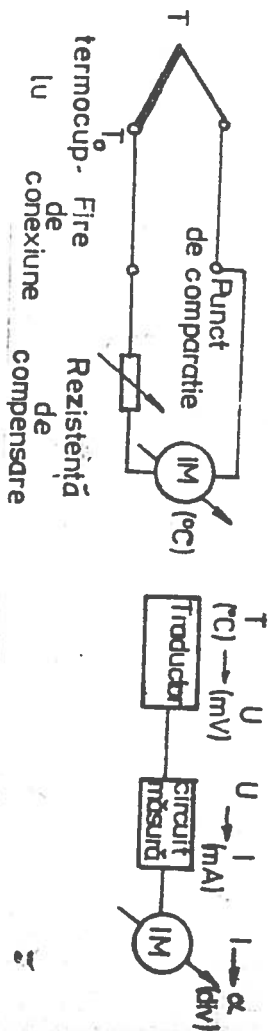


Fig. 8.3

8.1.2 Termorezistența cu traductor de temperatură.

Termorezistența reprezintă de fapt o rezistență ohmică a cărei variație cu temperatura este bine cunoscută. Fig. 8.4 reprezintă principalele tipuri de termorezistență uzual întâlnite în tehnica măsurării temperaturii, permițând o analiză comparativă sintetică, conform celei din tabelul 8.1.

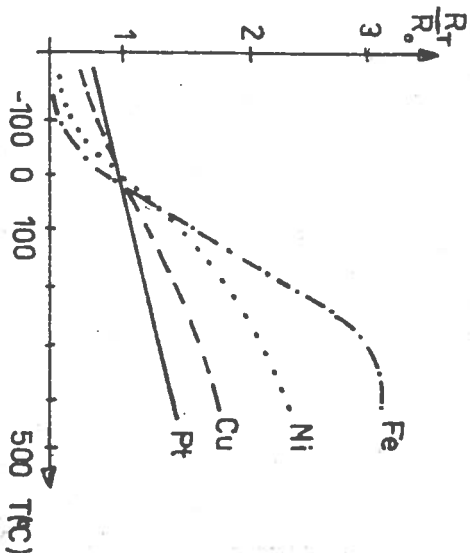


Fig. 8.4

și în timp a rezultatelor ;

- să determine o relație $R = f(T)$ cât mai liniară (motiv pentru care în funcție de materialul din care este confecționată termorezistența, se limitează domeniul de măsurare în domeniul liniar de variație al R_T în funcție de temperatură) ;

- să permită realizarea unor traducătoare cu caracteristici cât mai apropiate, pentru a asigura interschimbabilitatea ;

În general, materialele din care se confecționează termorezistențele trebuie să satisfacă următoarele cerințe :

- să aibă coeficientul de temperatură, α , β cât mai mare ;
- să aibă rezistivitate cât mai mare ;
- să aibă o bună stabilitate în timp a proprietăților electrice și mecanice, fizico-chimice și o bună reproductibilitate cu temperatura

Tabelul 8.1

Termorezistență	Domeniu de temperatură	Ecuație	Caracteristici funcționale
Platină	-200÷+600 (°C)	$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2]$	linearitate bună sensibilitate mică
Cupru	-50÷+200 (°C)	$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$	linearitate bună sensibilitate mică, dar mai mare ca Pt.
Nichel	0 ÷ 300 (°C)	$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2]$	linearitate destul de bună sensibilitate bună (α, β mari)
Fier	0 ÷ 150 (°C)	$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2]$	linearitate corespunzătoare în domeniul mic de temperatură sensibilitate f. bună

- să fie ieftine, ușor de procurat, de montat și de întreținut. Schema de utilizare a termorezistenței ca traductor de temperatură în general este o schemă în punte Wheatstone sau intercalată unui instrument logometric, în unul din brațe fiind termorezistența, iar în celălalt braț o rezistență de comparație corespunzătoare valorii limită (inferioară sau superioară) de măsurare termică, valoare care este de obicei înscrisă pe termorezistența - traductor la livrare.

8.1.3 Termistorul ca traductor de temperatură.

Termistorul este un dispozitiv semiconductor, a cărui rezistență variază cu temperatura (vezi fig. 8.5) conform relației:

$$R_T = R_0 e^{\frac{B}{T_0 - T}} \quad (8.2)$$

fiind definit coeficientul de variație al rezistenței cu temperatura, negativ (vezi fig. 8.5) urmărind alura curbei din fig. 8.5):

$$\alpha_T = - \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = - \frac{B}{T^2} \quad (8.3)$$

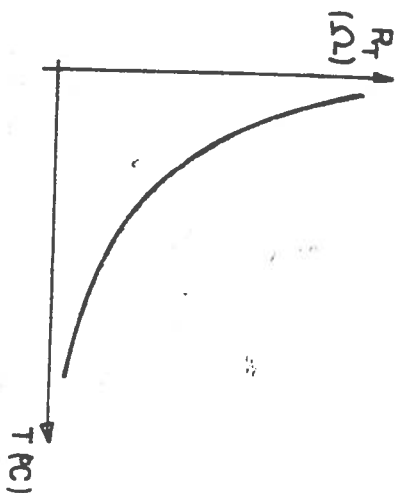


Fig. 8.5

Parametrii principali ai termistoarelor, față de care trebuie să se țină cont la alegerea schemei de măsură, sînt :

- rezistența nominală, denumită cu valoare a rezistenței la o anumită temperatură (la limita inferioară sau superioară de măsurare) ;

- domeniul de măsurare, determinat de o variație acceptabilă a rezistenței cu temperatura, condiționată de neliniaritatea în zonă în care curba de variație a rezistenței devine asimptotică la abscisă (în acest sens, se specifică faptul că termistoarele uzuale au domeniul de lucru 0 - 100 - 150°C ; există însă și termistoare realizate în aliaje și tehnologii speciale permînd măsurarea, cu o sensibilitate bună a unor temperaturi pîna la 500-600°C) ;

- coeficientul termic, exprimat în procente pe grad și definind variația rezistenței pe unitate de temperatură, în zona mediană de variație a $R_T = f(T)$ a termistorului :

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (8.4)$$

- constanta termică de timp, τ_T sau inerția termică, de ordinul 10-15 secunde ;

- curentul maxim admis, pentru a nu produce autoîncălzirea termistorului.

În general materialul din care se realizează termistoarele sînt oxizi de Ni, Mn, Co, Mg. Ei sînt caracterizați la temperaturi peste 1000°C în forme variate (vezi fig. 8.6), conectarea lor în circuite de măsură fiindu-se în punți echilibrate sau neechilibrate, rezistența de echilibrare sau curentul de dezechilibru al punții constituind factori de măsură ai temperaturii.

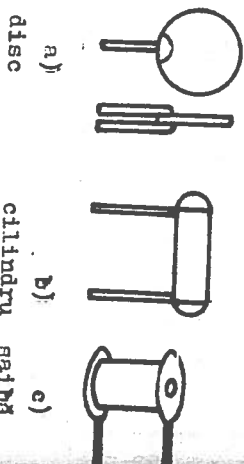


Fig. 8.6

În general valoarea acestui curent este de ordinul 20-30 mA, ceea ce la schemele de măsură în punte utilizate, limitează tensiunea de alimentare a punții la 4-9 V.

8.1.4. Varistorul ca transductor de temperatură

Caracteristicile de funcționare ale varistorului, dispozitiv semiconductor a cărui rezistență depinde de tensiunea aplicată la borne sau curentul ce îl străbate, precum și de polaritatea acestora, sînt arătate în fig. 8.7 și sînt descrise de rela-

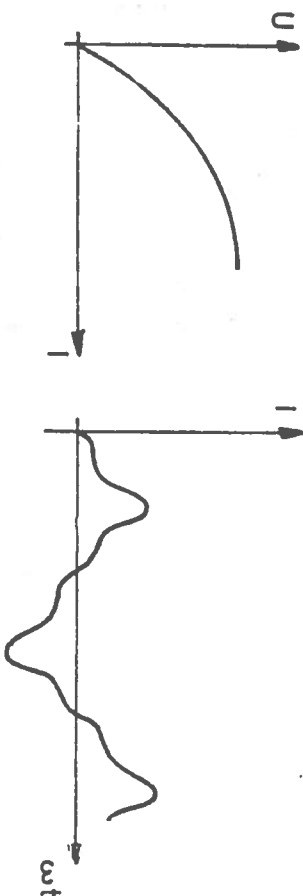


Fig. 8.7

ția de dependență :

$$I = kU^n \quad (8.5)$$

unde n se numește coeficient de neliniaritate. Utilizarea deci a varistorului în scheme de măsurare a temperaturii este condiționată de includerea sa într-un circuit la care modificarea de temperatură să se traducă într-o variație de tensiune sau de curent, sau de conectarea sa în vecinătatea surselor de alimentare fiind la tensiune constantă, se va utiliza caracteristica crescătoare de variație a rezistenței cu temperatura (respectiv cu mișcarea curentului prin el) (fig. 8.8).

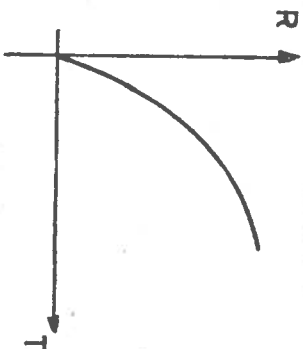


Fig. 8.8

8.1.5. Diode semiconductor ca transductor de temperatură.

Domeniul de măsurare al temperaturii se stabilește în intervalul (-200 ÷ +150)°C, domeniul în care tensiunea la bornele diodei variază aproximativ liniar la menținerea constantă a

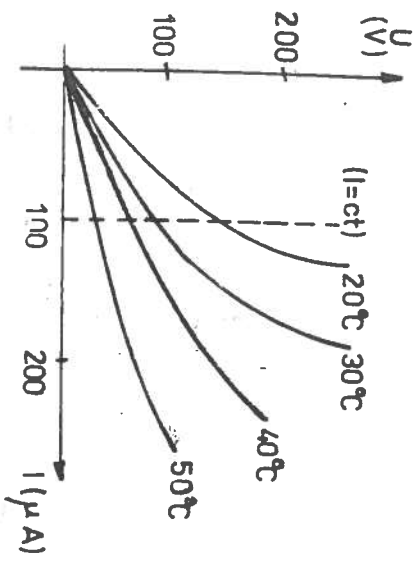


Fig. 8.9

curenului (vezi fig. 8.9), schema de principiu de măsură bazându-se pe măsurarea curenului invers pe diodă sau a căderii de tensiune pe rezistența de sarcină R_g (vezi schema din fig. 8.10).

Sensibilitatea c.c. temperatura se definește de relația:

$$S_T = \frac{\partial U_D}{\partial T} = \left\{ \begin{aligned} &= \eta \frac{k}{e} \ln\left(\frac{i_d}{i_{inv}} + 1\right) \end{aligned} \right. \quad (8.6)$$

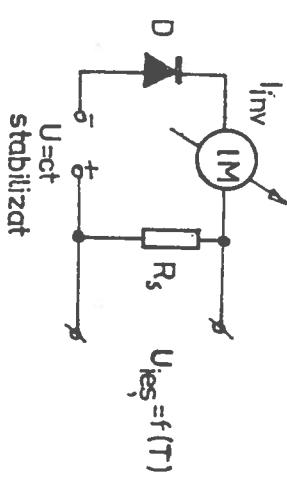


Fig. 8.10

unde η este o constantă ($\eta=2$ pentru Si), k este constanta lui Boltzmann ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), e , este sarcina electronului ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C), i_d , curent în sens direct, i_{inv} , curentul sens invers prin diodă, între ele existând relația:

$$i_d = i_{inv} \left(e^{\frac{U_D}{\eta U_T}} - 1 \right) \quad (8.7)$$

$$U_D = \eta U_T \ln\left(\frac{i_d}{i_{inv}} + 1\right) \quad (8.8)$$

$$\text{și respectiv: } U_T = \frac{kT}{e} \quad (8.9)$$

unde T este temperatura de măsură. De aici rezultă prin înlocuire o funcție:

$$i_{inv} = f(T) \quad (8.10)$$

exprimînd tocmai principiul de utilizare al diodel semiconductoroare ca transductor de temperatură. Revendind, valoric, la sensibilitatea față de temperatură, ea este de ordinul:

$$S_T \approx (2+6) \cdot 10^{-3} \text{ V/}^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

8.1.6 Transistorul ca transductor de temperatură.

Din caracteristica $I_c = f(U_{BE})$ prezentată în fig. 8.11 se remarcă sensibilitatea bună față de temperatură și rezultă totodată principiul de măsură definit de relația:

$$\frac{U_{BE}}{I_c} = \text{constant} = f(T) \quad (8.12)$$

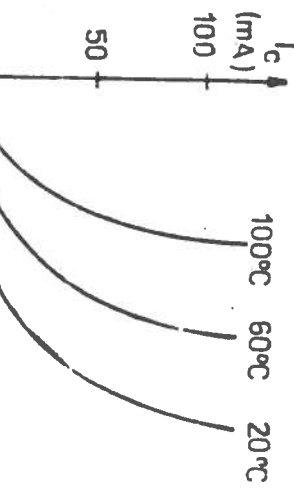


Fig. 8.11

etalonarea unghiului de rotire al potențiometrului de compensare a curenților I_c , putîndu-se face direct în grade C.

Se menționează constanta de timp de ordinul 10-15 secunde și sensibilitatea de ordinul $(2+5) \text{ mV/}^\circ\text{C}$, de același ordin de mărime ca la fiola semiconductoră.

8.2. Scheme de măsură. Aparate.

8.2.1 Termometru cu termorezistență și termocuplu.

Utilizînd un termocuplu IEMI Fe - constantan, C-350°C se realizează schema de măsură în punte din fig. 8.12, în

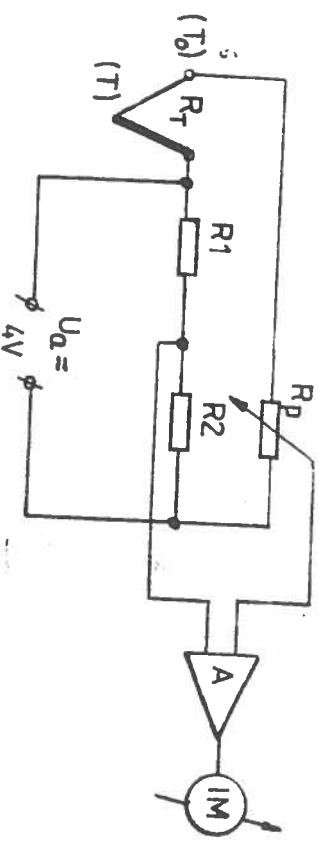


Fig. 8.12

care R_1, R_2 și R_3 sînt constituite din rezistențe decadaice 0+111 11152, A este un etaj de amplificare cu factor $10^2 \div 10^3$, iar IM un miliampermetru. Schema poate lucra în regim de punte echilibrată (IM este un instrument dc zero), iar echilibrarea făcîndu-se din R_p se va etajona R_p în valori de temperatură, sau în regim de

punte dezechilibrată, R_p servind pentru o echilibrare inițială (la $T = T_0$), după care dezechilibrul punții (datorat $T \neq T_0, E_{TH}$) areare sub forma unei deviații la instrumentul de măsură, el fiind testat în valoarea de temperatură.

Utilizarea termorezistenței ca transductor de temperatură se realizează prin înglobarea ei, așa cum s-a arătat la par. 8.1.2 într-o schemă în punte sau o schemă cu logometru indicator (vezi fig. 8.13 a, respectiv b), în care:

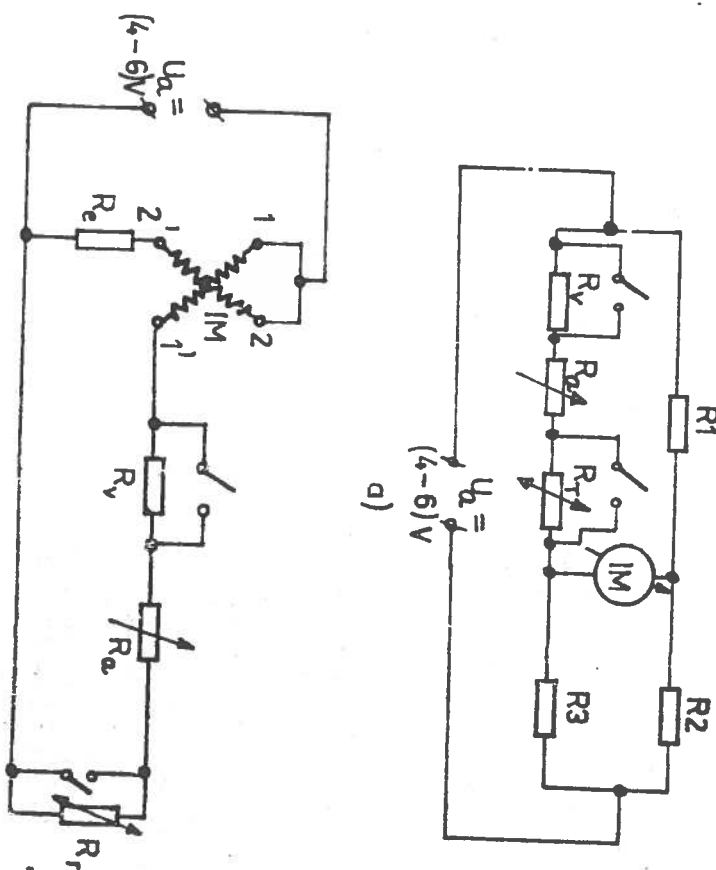


Fig. 8.13

IM - instrument de măsură (microampermetru - fig. 8.13 a, logometru - fig. 8.13 b);

R_{TH} - termorezistență;

R_v - rezistență de verificare (vezi par. 8.1.2);

R_a - rezistență de ajustare (pentru echilibrare fină inițială la zero a IM la $R_{TH} = R_0$ - fig. 8.13 a, și aducerea acului milivoltmetru - lui indicator la valoarea descrisă la începutul măsurătorii - fig. 8.13 b);

R_1, R_2, R_3 - rezistențe de referință pentru echilibrarea punții, 0-111.111 Ω .

Utilizarea R_v, R_{TH}, R_{TH} se face în modul următor: la începutul măsurării, se scurtcircuitează R_{TH} , se introduce în circuit R_v și din R_a se ajustează valoarea zero indicată la IM sau valoarea indicată pe scala milivoltmetrului cu logometru, după care se scurtcircuitează R_v și se reintroduce R_{TH} în circuit, când milivoltmetrul trebuie să indice o valoare corespunzătoare cu temperatura inițială la (T_0). Dimensiunile schemelor trebuie astfel făcute încât cureții de măsurare să nu producă autoîncălzirea rezistenței de măsurare și deci erori de măsurare. Se alege deci o tensiune de alimentare scăzută (4-6V c.c.) cu care curentul de lucru nu depășește valoarea de ordinul 10-30 mA.

Schema din fig. 8.14 permite utilizarea simultană atât a term

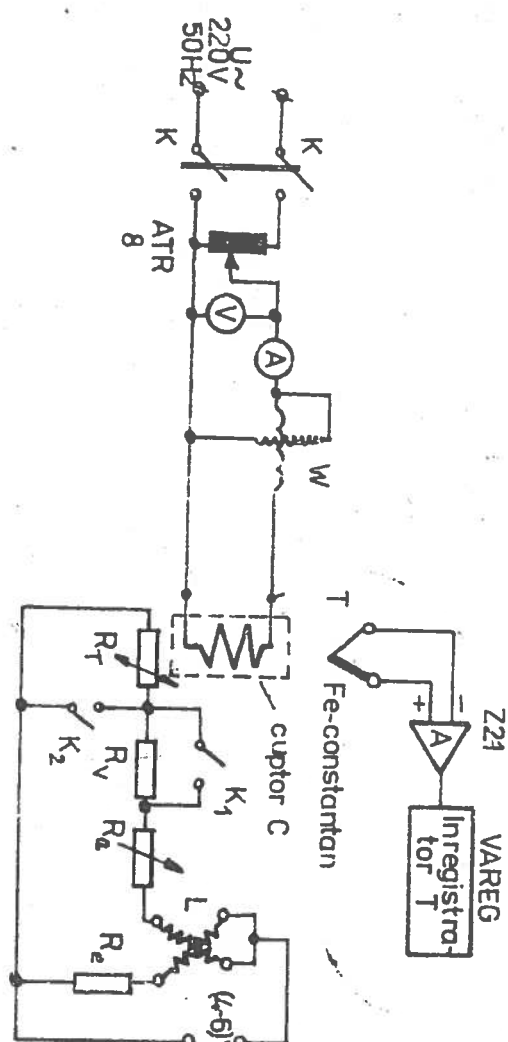


Fig. 8.14

cupului cât și a termorezistenței la măsurarea și urmărirea variației temperaturii la un cuplor de laborator, aparatura utilizată fiind prezentată în continuare:

C - cuplor cu rezistență electrică;

L - logometru (milivoltmetru) indicator 0 + 250°C, limita de reglaj la 200°C, clasă 1,5, pentru termorezistență de cupru;

R_{TH} - termorezistență de cupru, 0-150°C;

R_v - rezistență de verificare = 136,415 Ω la $T = 250^\circ\text{C}$;

R_a - rezistență de ajustare - decadal 10 x 152 + 10 x 0,152;

U_0 - sursă de alimentare 0+6V;

K - întrerupător bipolar capsat 250 V, 6+10 A;

K_1, K_2 - întrerupătoare monopolare (se pot realiza și din tire de conexiuni);

T - termocupla Fe - constantan 0-350°C;

ATH 8 - autotransformator 8 A, 1/2 A, 0-250V;

A - ampermetru de c.a., clasă 1-1,5, domeniu 0-1-5A;

V - voltmetru de c.a., clasă 1-1,5, domeniu 0-1-75V;

A(Z21) - amplificator pentru înregistratorul VAREG (RSC);

VAREG - înregistrator, voltampermetru cu domenii multiple, producție Metra Hlansko (RSC);

W - wattmetru electrodinamic, clasă 1-1,5, domenii 0-1-5A, 0-1-20V.

NOTA: Se vor urmări cu atenție chestiunile referitoare la alimentarea montajului în c.a., pentru a nu produce distrugerea cuplei și înstrăinările de conectare ale înregistratorului și amplificatorului său, prezentate în par. 8.1.3.

8.2.2 Termometre cu termistori.

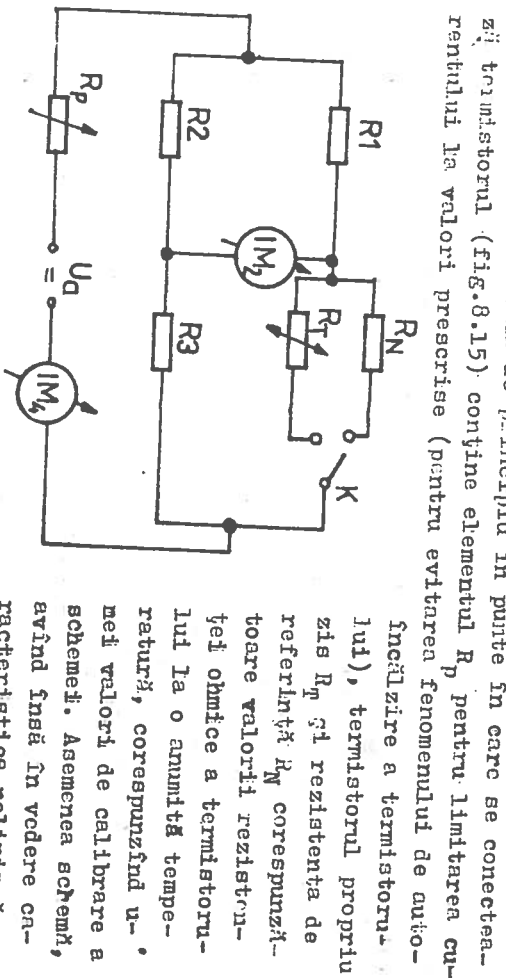


Fig. 8.15

meniu restrâns de temperatură, considerând liniarizată o porțiune a caracteristicii $R_T = f(T)$. Extinderea domeniului se realizează prin liniarizarea pe porțiuni a caracteristicii, la valori minime de temperatură (fig. 8.16 a) sau minime de rezistență (fig. 8.16 b).

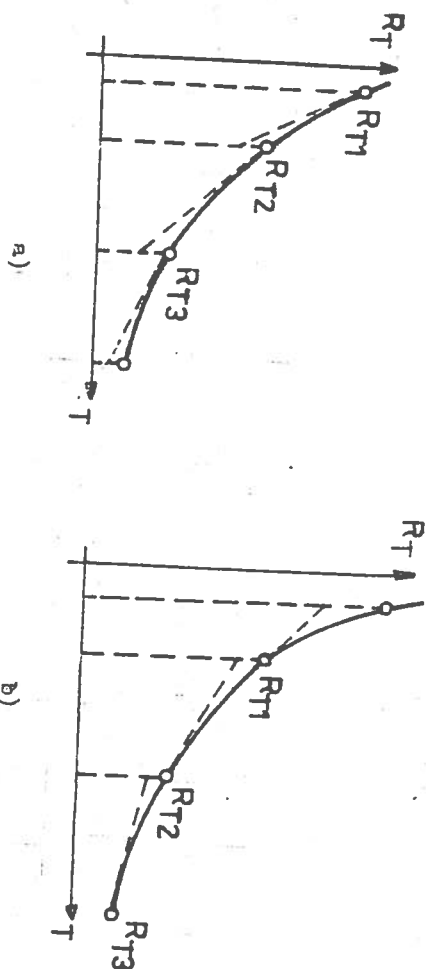


Fig. 8.16

corecțiunile citirii se realizează schema din fig. 8.17 cu stabilizator de temperatură.

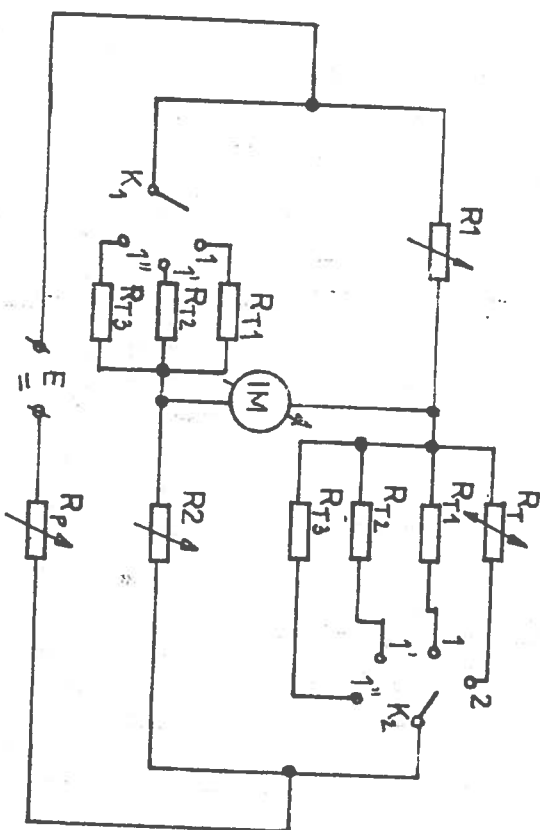


Fig. 8.17

rea prin R_1, R_2 și R_p cu K_1 pe 1, 1' sau 1'' a condițiilor inițiale de măsurare (început de scală, R_{T1} din fig. 8.16 a, capăt de scală, R_{T3} din fig. 8.16 b) și măsurare cu K_2 pe 2 cuplând R_T .

Se studiază de asemenea un termometru cu termistor METRA (RSC) cu domenii 0-60°C, 0-120°C și 0-180°C, cu reglaj de zero inițial la început de scală, deci cf. fig. 8.16 a, liniarizarea făcându-se la valori inițiale de temperatură pe fiecare domeniu. În domeniul de

realizarea unor termistori care să acopere asemenea game de temperatură sînt relativ greu de executat, motiv pentru care termometrele uzuale au domenii de temperatură ce nu acoperă mai mult de $40\pm 50^\circ\text{C}$ (un domeniu); acest deziderat vine și în întîlnirea cerinței de a realiza o scală cît mai liniară de citire a valorilor de temperatură.

Caracteristica termistorului utilizat pentru schema 8.17, tip IPRS, avînd $R_{T20^\circ\text{C}} \approx 64\Omega$ este prezentată în fig. 8.18 pentru care

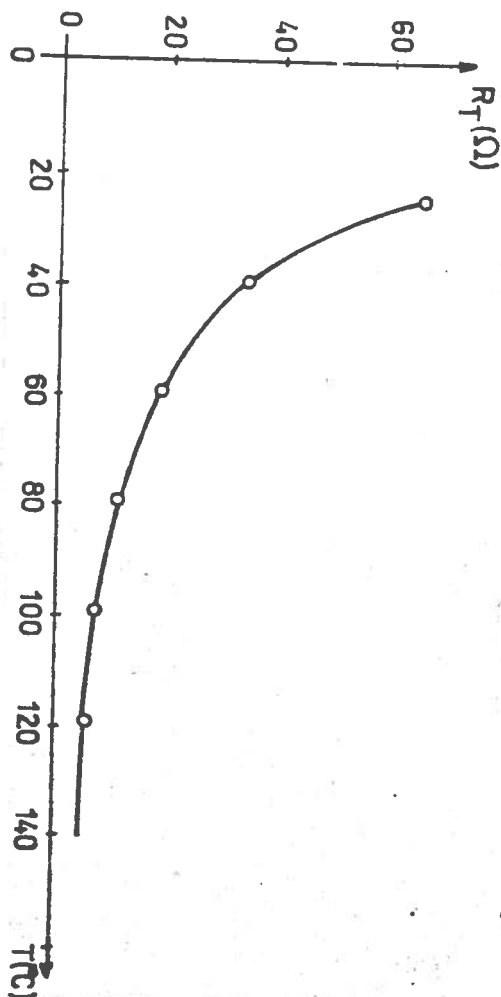


Fig. 8.18

elementele schemei din fig. 8.17 sînt :

$$R_{T1} = 66\Omega ; R_{T2} = 33\Omega ; R_{T3} = 20\Omega ;$$

$$R_1 = 47\Omega \text{ potențiometru} ; R_2 = 47\Omega \text{ potențiometru} ;$$

$$R_p = 100\Omega \text{ trimmer} ; E = 4 \text{ V c.c.} ;$$

IM - MAVO 35 utilizat pe c.c., scala "mA".

Realizarea plăcuței imprimate a circuitului este arătată în fig. 8.19, punctele de conectare ale punții și comutatoarelor K_1, K_2 fiind realizate prin capse și cordoane de conexiuni.

Domeniile de măsurare ale temperaturii sînt dictate de sensibilitatea de variație a rezistenței cu temperatura la $20-40^\circ\text{C}$, $40-60^\circ\text{C}$ și $60-80^\circ\text{C}$; peste 80°C observăm o aplatizare a caracteristicii termistorului, conducînd la o relativă insensibilizare a schemei de măsură.

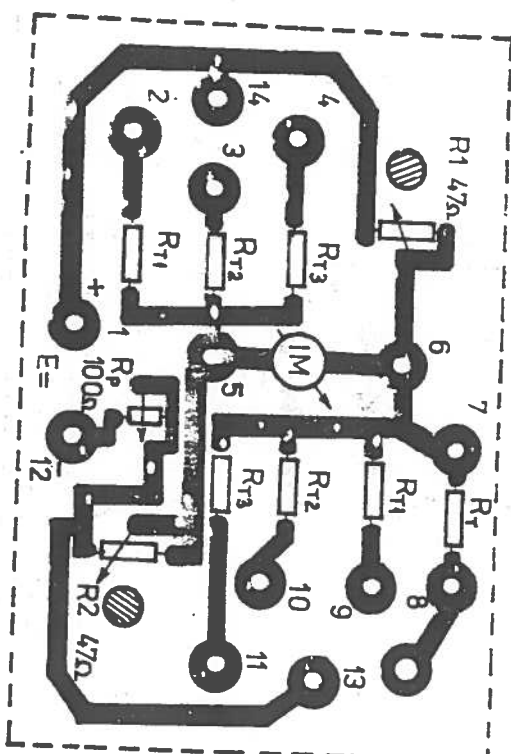


Fig. 8.19

8.2.3 Termometre cu diode semiconductor.

Conform celor exprimate în par. 8.1.5 referitor la utilizarea diodei semiconductor ca traductor de temperatură, schema bloc de măsură este prezentată în fig. 8.20, materializată

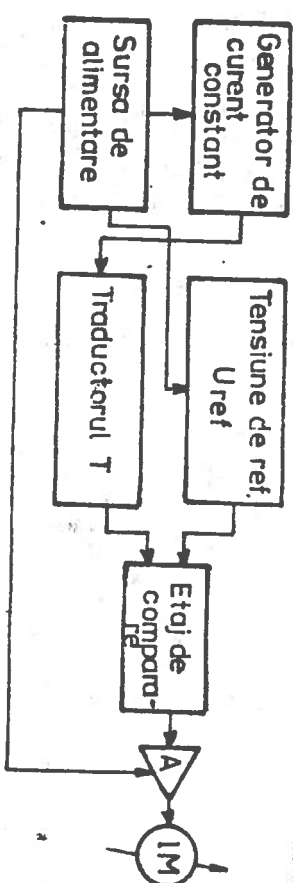


Fig. 8.20

prin schema din fig. 8.21.

Diada D_1 în divizorul de polarizare a bezei T_1 face ca acest tranzistor să lucreze la un curent de colector de valoare redusă, departe de zona de saturare:

$$I_C = I_{D_2} \approx 0,5 \text{ mA}$$

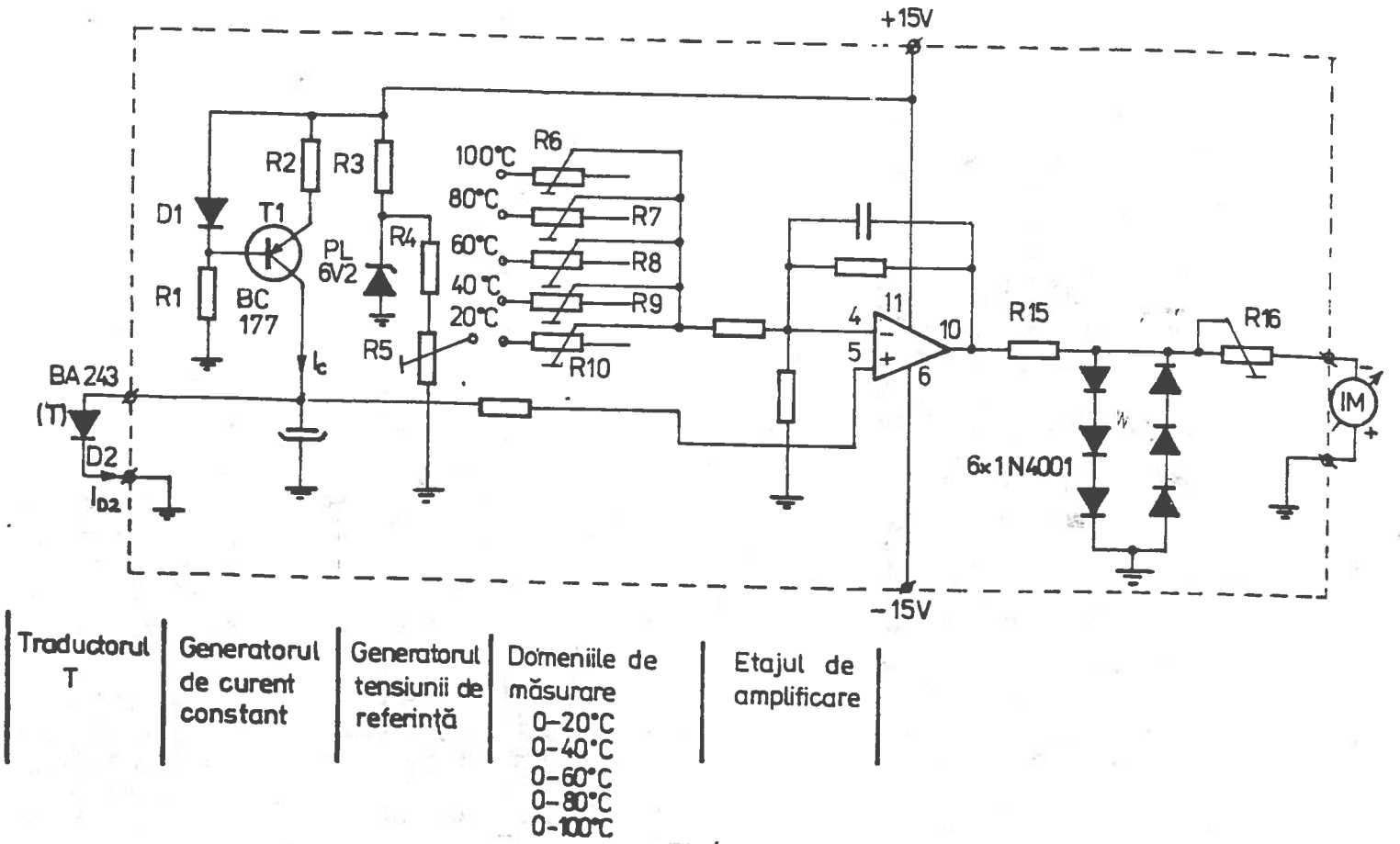


Fig. 8.21

variabile temperaturii U_{BE} al tranzistorului T_1 cu temperaturii fiind compensat de D_1 și rezistența R_2 cu rol de a introduce o tensiune negativă serie.

Tensiunea emișoră de pe traductor este compensată cu o tensiune de referință stabilită de dioda Zener PL6V2, schema generatorului de tensiune de referință fiind o schemă mult simplificată, având în vedere alimentarea întregii scheme de la o sursă stabilizată $\pm 15V$. Semnalul de la R_5 permite reglarea tensiunii de referință în domeniul 0-1,8V, suficientă pentru a compensa tensiunea pe diodă la temperatura de 0°C (ca fiind aproximativ 0,7V).

Tensiunea de pe dioda traductor de temperatură (D_2) se aplică la intrarea neînversoare a unui A.O. (pA 741) realizând astfel o impedanță mare de intrare în schema de amplificare. Pe borna inversoare se aplică tensiunea de referință prin decade de rezistență, stabilind domeniile de măsurare, conform celor ce reies din fig. 8.21 și asigurând diferite valori ale factorului de amplificare astfel ca instrumentul de măsură IM (MAVO -35) să poată fi utilizat pe scară "mA".

8.2.4 Termometre cu tranzistoare metalice.

Figura 8.22 prezintă scheme simple de asemenea termometre, măsurarea temperaturii făcându-se fie măsurând curentul

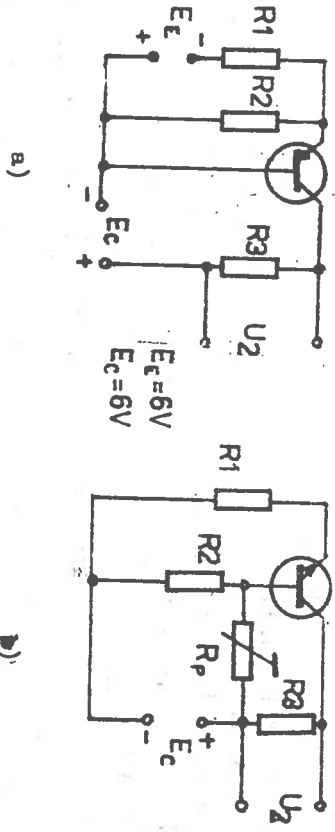


Fig. 8.22

de colector:

$$I_c = f(R_1, R_2, R_3, \alpha, E_o, E_e, U_{BE}) \quad (8.13)$$

iar cum:

$$\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} = (2+4) \text{ mV}/^\circ\text{C} \Rightarrow I_c = f(T) \quad (8.14)$$

Dimensionarea principală a schemei de măsură se face în modul

următor : cunoscând valorarea curentului rezidual de colector I_{co} la valorarea maximă T de măsurat, se alege R_3 astfel ca $U_{CE} = U_{CE}^{max}$, cunoscând E_0 (0+10V, de obicei 6V). Considerând o sensibilitate medie:

$$\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} = 2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

se determină amplificarea în tensiune necesară, cu relația:

$$A_U = \frac{E_0 - U_{CE}}{(T_{max} - T_{min})} \cdot \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} \quad (8.15)$$

Iar din relația amplificării în funcție de elementele circuitului și rezistența de intrare:

$$A_U = \frac{\alpha R_3}{R_{intr} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad (8.16)$$

admițând că $R_2 \ll R_1$ se determină R_2 . Rezistența R_1 se determină din condiția:

$$\frac{U_{BE}}{T - T_{min}} = \frac{R_2 E_0}{R_1 + R_2} \quad (8.17)$$

Pentru a contracara eroarea care poate apărea ca urmare a influenței temperaturii mediului ambiant asupra traductorului de temperatură, se utilizează în general scheme cu două tranzistoare, unul de măsură și unul de compensare termică (vezi fig.8.23); realizate în montaj în punte și instrumentul IM dispus în diagonala de măsură (IAVO-35, scala "mA") etalonat în grade C sau cu o curbă de corecpondență ($\alpha \sim ^{\circ}\text{C}$). Dacă în locul instrumentului de măsură se utilizează un instrument de zero, cursorul rezistenței R_p la echilibrul

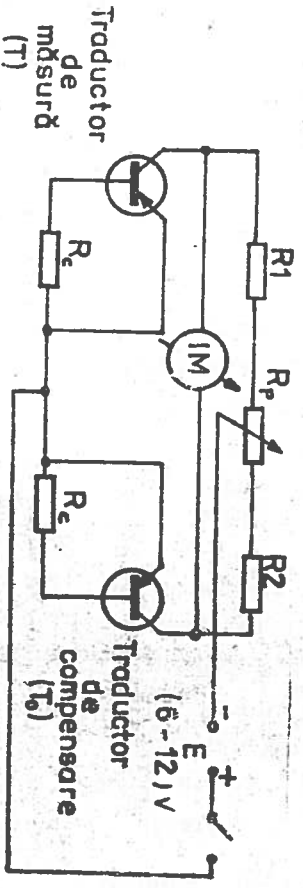


Fig. 8.23

punte, poate fi etalonat în valori de temperatură.

8.3 Mod de lucru. Măsurători. Rezultate experimentale. Concluzii.

8.3.1 Termometre cu termorezistență și cu termocuplu.

Se realizează schema din fig.8.12 cu traductor termocuplu Fe - constantan 0-350°C și se echilibrează inițial la T_0 din R_3 ($\alpha_{IM} = 0$). Se realizează apoi încluzirea termocuplului în baie de ulei de transformator și se notează deviația instrumentului de măsură în comparație cu temperatura indicată de un termometru de precizie înlocuit în vecinătatea traductorului. Se trec rezultatele în tabelul 8.1 și se ridică curba de etalonare, comparând alura acestei curbe cu cea a termocuplului $R_T = f(T)$.

Tabel 8.1

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)									
Indicația instrumentului de măsură IM									

Se realizează apoi schema din fig.8.13.a și după echilibrarea inițială (descrie la par.8.2.1) se introduce în circuit R_p și se începe procesul de încluzire notând valorile de temperatură și indicațiile instrumentului de măsură, completând datele într-un tabel de forma 8.1 și ridicând graficul $I=f(T)$. Din expresia curentului de dezechilibru al punții, în care s-a notat:

$$R_4 = R_a + R_p \quad (8.18)$$

$$I_g = \frac{E (R_2 R_4 - R_1 R_3)}{R_0 R_1 (R_2 + R_3 + R_4) + R_0 (R_1 + R_4) (R_2 + R_3) + R_1 R_3 (R_2 + R_4) + R_2 R_4 (R_1 + R_3)} \quad (8.19)$$

în care:

R_0 este rezistența internă a sursei $\approx 10^{-2} \Omega$;

R_1 este rezistența internă a instrumentului de măsură, calculată pe domeniul de utilizare,

se poate determina R_4 , respectiv R_p , prin notarea:

Table 8.4