

REZISTOARE NELINIARE, TERMISTOARE, VARISTOARE

1. **Scopul lucrării:** Evidențierea caracteristicilor termistoarelor și varistoarelor

2. **Noțiuni teoretice:**

2.1 Termistoare

Termistorul este un rezistor a cărui rezistență depinde puternic de temperatură, ca urmare prezentând o caracteristică U-I neliniară.

Specific acestei dependențe de temperatură comparativ cu cea a rezistoarelor liniare fixe sau variabile este faptul că la variația temperaturii cu un grad valoarea rezistenței termistoarelor se modifică de ordinul zecilor de procente. Cu alte cuvinte, este posibil ca într-un interval îngust de temperatură termistorul să-și înjumătățească sau să-și dubleze valoarea rezistenței.

Micșorarea sau creșterea rezistenței este în strânsă corelație cu tipul termistorului, care poate fi:

- a) cu coeficientul de temperatură negativ, NTC
- b) cu coeficientul de temperatură pozitiv, PTC.

Simbolurile termistoarelor sunt prezentate în figura 1.

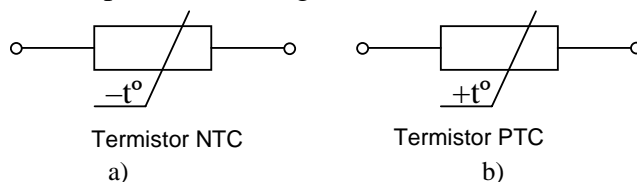


Fig. 1 Simbolurile termistoarelor. a) NTC; b) PTC.

2.1.a Termistoare NTC

Un termistor NTC are caracteristica termică de forma celei din fig.2 și caracteristica electrică de forma celei din fig.3.

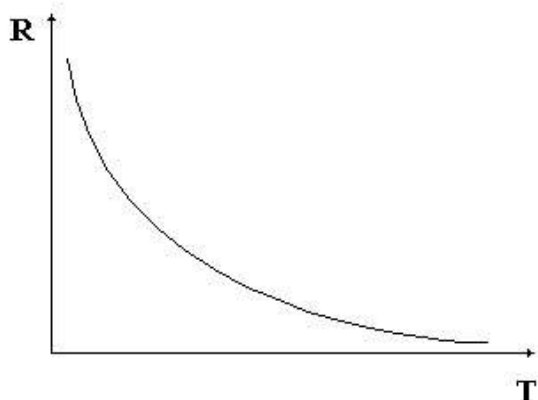


Fig. 2 Caracteristica termică a termistorului NTC.

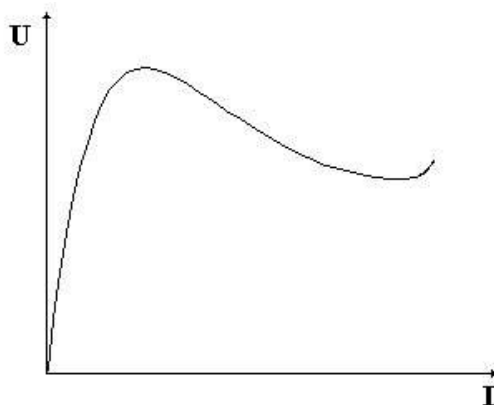


Fig. 3 Caracteristica electrică a termistorului NTC.

Caracteristica termică este dată de relația:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

unde:

- R_T este rezistența termistorului la temperatura T (care este exprimată în Kelvin [K]);

- B este o constantă de material (măsurată în Kelvin) care caracterizează sensibilitatea termistorului; uzual $B = (2000-5000)K$;
- A (se mai notează uneori R_∞) este o constantă care depinde de tipul termistorului, se măsoară în ohmi (Ω) și are semnificația rezistenței termistorului când temperatura tinde (ipotetic) spre infinit.

Reprezentând grafic $\ln R$ în funcție de $1/T$ caracteristica termică devine o dreaptă (fig.4), din parametrii căreia se obțin constantele A și B.

$$\ln R_T = \ln A + B \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

$$B = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (3)$$

$$A = R_1 \cdot e^{-\frac{B}{T_1}} \quad (4)$$

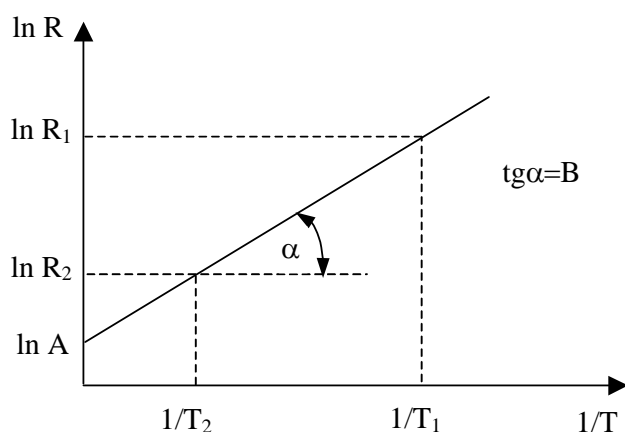


Fig. 4 Caracteristica termică a unui termistor NTC în planul ($\ln R$, $1/T$).

În cataloage se precizează de obicei următorii parametrii:

- Rezistența nominală R_{25} - valoarea rezistenței termistorului la temperatura de $25^{\circ}C$ în condiții de disipație nulă;
- Constanta B;
- Coeficientul de variație cu temperatura (la o temperatură de referință, de obicei $25^{\circ}C$);

$$\alpha_{25} = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} \bigg|_{T=298K} = -\frac{B}{T^2} \bigg|_{T=298K} \quad (5)$$

Observație: Acest parametru se poate deduce cunoscând valoarea constantei B.

- Coeficientul de disipație termică $D[W/K]$ (notat uneori și cu δ) este numeric egal cu puterea disipată în termistor (P) la o diferență de $1^{\circ}C$ (1K) între temperatura corpului termistorului T și temperatura ambiantă T_0 ;

$$D = \frac{P}{T - T_0} \quad (6)$$

- Constanta de timp termică notată cu τ reprezintă timpul după care temperatura corpului termistorului ajunge la 63,2 % din diferența dintre temperatura finală T_f și cea inițială T_i la aplicarea unui salt de temperatură egal cu $\Delta T = T_f - T_i$.

În tabelul 1 sunt indicate câteva din caracteristicile de catalog pentru termistoare cu coeficient de temperatură negativ fabricate la IPEE Curtea de Argeș.

Tabelul 1 Parametrii unor termistoare NTC fabricate la IPEE Curtea de Argeș.

Parametri electrici	U.M	TG 1101	TG1102	TG 1105	TG 1106	TG115 0	TG 121-680
Rezistența nominală R_{25}	Ω	10	12	51	62	510	680
Coeficientul de temperatură α_{25}	% / $^{\circ}\text{C}$	-3,3	-3,3	-3,7	-3,7	-4,1	-4,1
B	K	2900	2900	3300	3300	3650	3650
P_{\max}	W	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Coeficient de disipație D	$\text{mW}/^{\circ}\text{C}$	11	11	11	9,5	9,5	9,5
Constanta de timp τ	s	50	50	60	60	70	60

În ceea ce privește caracteristica electrică $U(I)$, aceasta se poate exprima prin ecuații parametrice pornind de la egalarea puterii disipate de termistor P_d cu puterea evacuată de acesta:

$$P_{ev} = D(T_c - T_a) = D \cdot \Delta T \quad (7)$$

unde T este temperatura corpului termistorului și ΔT supratemperatura corpului componente față de mediul ambiant (T_a)

$$P_d = \frac{U^2}{R_T} = R_T \cdot I^2 \quad (8)$$

unde: U și I reprezintă tensiunea aplicată termistorului, respectiv curentul care trece prin el.

Din corelarea relațiilor (7) și (8) rezultă:

$$U = \sqrt{A \cdot D \cdot (T - T_0)} \cdot e^{\frac{B}{2T}} \quad (9)$$

$$I = \sqrt{\frac{D}{A}} (T - T_0) \cdot e^{-\frac{B}{2T}} \quad (10)$$

Reprezentând grafic $U = f(I)$ având temperatura ca parametru se observă că U prezintă un maxim, în domeniul temperaturilor uzuale, la temperatura T_{Um} :

$$T_{Um} = \frac{B - \sqrt{B \cdot (B - 4T_0)}}{2} \quad (11)$$

Pentru a obține acest maxim trebuie să fie îndeplinită condiția $B > 4T_0$

2.1.b Termistoare PTC

Un termistor de tip PTC (cu $\alpha_T > 0$) are o caracteristică termică dată în figura 5 (caracteristică specifică termistoarelor pe bază de BaTiO_3) și o caracteristică electrică dată în figura 6.

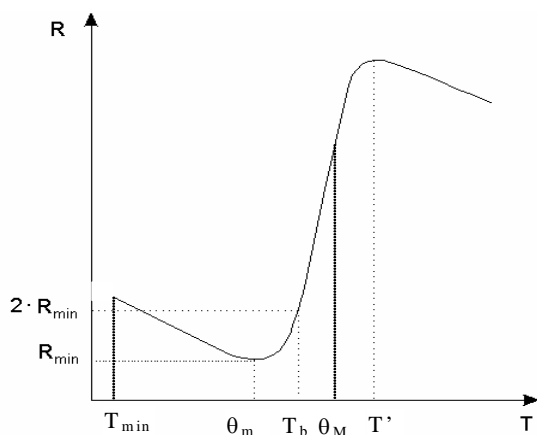


Fig. 5 Caracteristica termică a termistorului PTC.

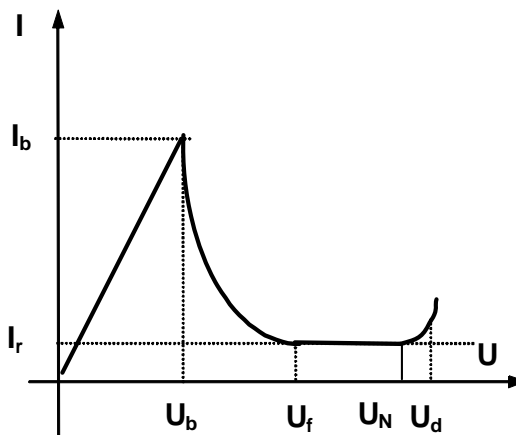


Fig. 6 Caracteristica electrică a termistorului PTC.

Corespunzător figurii 5 rezultă că termistorul PTC prezintă coeficientul de temperatură pozitiv doar într-un domeniu restrâns de temperatură ($\theta_m - \theta_M$), acest interval fiind o caracteristică specifică fiecărui tip de termistor în parte.

În ceea ce privește caracteristica electrică (figura 6) se remarcă două puncte importante: unul definit de tensiunea și curentul de basculare (B), începutul porțiunii descendente a caracteristicii, cel de-al doilea (R) definit de tensiunea de funcționare la curent rezidual (I_r) (zona de palier a caracteristicii). La tensiuni superioare lui U_d termistorul se distruge.

Matematic caracteristica termică este dată (aproximativ) de formula:

$$R_T = A + C \cdot e^{BT} \quad (12)$$

Relația este valabilă în intervalul ($\theta_m - \theta_M$) din figura 5 cu A, B și C constante ce depind de material și de dispozitiv. Cunoscându-se valoarea rezistenței termistorului la trei temperaturi T_1 , T_2 și T_3 se pot determina parametrii A, B, C.

În prezent termistoarele cu coeficient de temperatură pozitiv PTC, deși au multe alte scheme de utilizare, sunt utilizate preponderent ca elemente de protecție a circuitelor (consumatorilor) prin conectarea lor în serie cu sarcina ce trebuie protejată. Ele se comportă ca siguranțe reversibile (sau resetabile). La apariția unui supracurent în circuit, termistorul are un salt (o excursie), rezistența componentei crescând semnificativ și reducând în acest fel curentul prin circuitul protejat la o valoare de siguranță, care să fie nedistructivă pentru elementele de circuit. Saltul de rezistență se datorează creșterii rapide de temperatură a PTC în conformitate cu legea Joule – Lenz. La scăderea curentului (eventual la remedierea defectului care a condus la creșterea lui) termistorul PTC va comuta în starea de rezistență mică, siguranța reversibilă redevenind "bună", deci aptă de a funcționa în continuare.

În ultimul timp alături de termistoarele PTC ceramice au fost dezvoltate termistoare pe bază de polimeri conductivi care prezintă o caracteristică apropiată de cea PTC clasică. Modalitatea de realizare a protecției circuitelor va fi studiată la punctul 3.4.

2.2 Varistoare

Varistoarele sunt rezistoare a căror rezistență se modifică în funcție de tensiune, deci caracteristica curent-tensiune este neliniară (figura 7). În figura 8 sunt prezentate câteva simboluri ale varistoarelor.

Caracteristica electrică curent-tensiune poate fi prezentată simplificat prin relațiile (13).

$$I = k \cdot U^\alpha \quad \text{sau} \quad U = C \cdot I^\beta \quad (13)$$

unde: k (sau C) este o constantă;

α (sau $\beta = 1/\alpha$) este coeficientul de neliniaritate care depinde de materialul folosit la realizarea varistoarelor ($\alpha \approx 5$ pentru SiC și $\alpha \in [20, 40]$ pentru ZnO).

Principalii parametri ai varistoarelor cu oxid de zinc sunt:

- tensiunea nominală (U_n) – reprezintă valoarea tensiunii continue la care funcționează varistorul când este parcurs de curentul nominal, de obicei de 1mA.
- Tensiunea maximă de limitare U_c ("Maximum Clamping Voltage") Varistoarele sunt utilizate în prezent aproape în totalitatea cazurilor la limitarea tensiunilor perturbatoare. Din acest motiv, oricare solicitare a varistorului la un curent mai mare de 1mA este realizată sub formă de impulsuri. Tensiunea maximă de limitare U_c este valoarea de vârf a tensiunii care apare la bornele varistorului în condițiile aplicării unui impuls de curent "standard" de 8/20μs.
- Supracurentul maxim nerepetitiv I_{nrp}
- Energia maximă absorbită în mod nerepetitiv $W_M(J)$. Pentru varistoarele cu carbură de siliciu se definește și puterea nominală disipată P_n .
- Asimetria curenților – reprezintă o mărime ce caracterizează abaterea relativă a curenților (I_1 , I_2) pentru aceeași tensiune aplicată varistorului cu ambele polarități.

$$asimetria = \frac{I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (14)$$

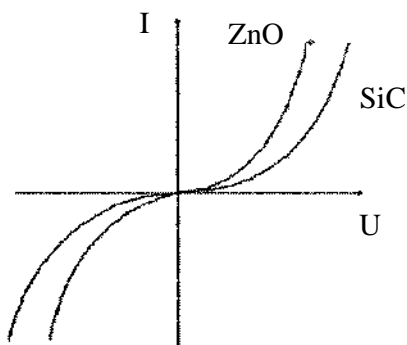


Fig. 7 Caracteristica $I(U)$ a varistorului.

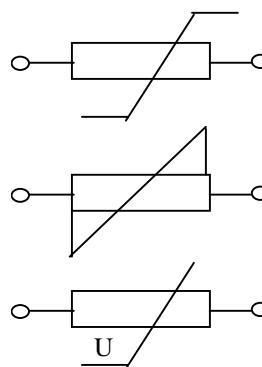


Fig. 8 Simboluri ale varistoarelor.

3. Desfășurarea lucrării

3.1 Determinarea caracteristicilor termice ale termistoarelor.

Pentru ridicarea caracteristicilor termice ale termistoarelor se folosește montajul din figura 9.

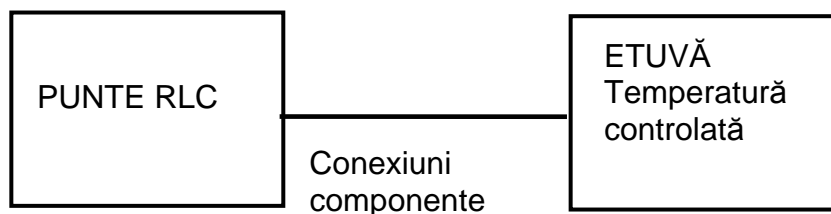


Fig. 9 Montaj pentru ridicarea caracteristicilor $R(T)$.

Într-o etuvă se vor plasa termistoarele ce trebuiesc măsurate. Acestea sunt de tipul celor din tabelul 2

Tabelul 2 Caracteristicile termistoarelor (componentelor) supuse încălzirii în etuvă

NTC1	EPCOS K164 470Ω
NTC2	EPCOS K164 1kΩ
PTC1	PTC265V 80 °150Ω (EPCOS C890)
PTC2	PTC30V13
R1	Rezistor peliculă de carbon
R2	Rezistor peliculă metalică

Se completează câțiva din principalii parametri ai termistoarelor pe baza foilor de catalog. Pentru termistoarele NTC se vor nota: R25, B, Puterea la 25 grade, coeficientul de disipație termică, constanta de timp. Pentru termistoarele PTC se vor nota: rezistența nominală, tensiunea maximă, temperatura de referință

Se trece apoi la completarea tabelului 3 pentru diferite valori ale tensiunii sursei de alimentare U_a. Rezistențele se măsoară cu o punte RLC. Prima măsurătoare va fi la temperatura ambiantă. Etuva termostatăă se va regla apoi începând cu 50 °C din 10 în 10 grade. Dacă se constată bascularea termistoarelor PTC evidențiată prin creșterea puternică a valorii rezistenței se poate opri măsurătoarea înainte de 150 °C.

Tabelul 3

Nr. crt.	Temperatura [°C]	Rezistența NTC1 [Ω]	Rezistența NTC2 [Ω]	Rezistența PTC1 [Ω]	Rezistența PTC2 [Ω]	R1 [kΩ]	R2 [kΩ]
1	θ ambiantă						
2	50						
3	60						
n	150						

Observație: 1. După schimbarea temperaturii trebuie să se aștepte o perioadă de timp (cca. 10 min) pentru realizarea regimului termic staționar. O indicație în acest sens este stabilizarea valorii rezistenței termistorului NTC.

2. Rezistorul R1 este cu peliculă de carbon, iar R2 cu peliculă metalică. Pentru măsurarea valorilor rezistențelor se poate folosi puntea RLC

3.2 Ridicarea caracteristicii U(I) pentru termistoarele NTC.

Se folosesc termistoarele plasate pe placa de laborator cu aspectul din figura 10.

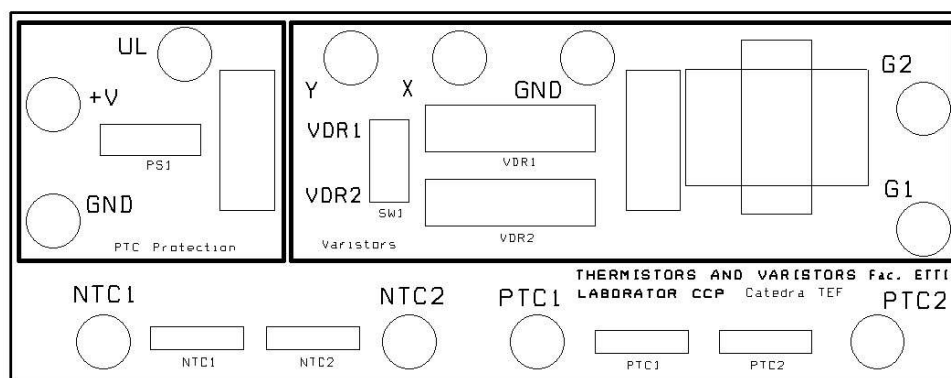


Fig. 10 Placa de laborator

Pentru determinarea caracteristicii $U(I)$ a termistoarelor NTC se utilizează schema din figura 11.

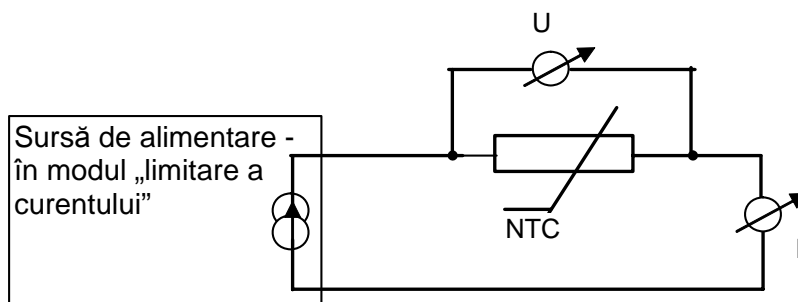


Fig. 11 Montaj pentru ridicarea caracteristicii $U(I)$ a termistoarelor NTC.

La ridicarea caracteristicii $U(I)$ trebuie să nu se depășească tensiunea ce corespunde maximului caracteristicii, în caz contrar termistorul se ambalează termic și se distruge. Pentru a nu depăși tensiunea maximă, se alimentează termistorul cu curent constant. Acest lucru este posibil dacă se utilizează sursa de alimentare în regim de limitare a curentului. Tensiunea sursei de alimentare se stabilește la $U = 10\text{ V}$, aceasta fiind tensiunea maximă. Reglajul curentului se face stabilind curentul limită al sursei. Se completează tabelele 4a și 4b. Pentru termistorul NTC1 cu valoarea rezistenței de $470\ \Omega$ se va alege curentul între 0-80 mA din 10 în 10 mA iar pentru NTC2 cu valoarea 1k curentul va fi între 0-40 mA cu pas de 5 mA.

Tabelul 4a

I [mA]	0	10	20	80....
U [V]	0						

Tabelul 4b

I [mA]	0	5	10	40....
U [V]	0						

Observație: După schimbarea valorii curentului se așteaptă un timp (≈ 3 constante de timp) necesar atingerii regimului termic staționar.

3.3 Ridicarea caracteristicii $I(U)$ a varistoarelor.

Pentru a vizualiza caracteristicile varistoarelor se folosește partea din dreapta a plăcii de laborator. Se identifică cele două varistoare VDR1 de tip JVR 11 și SIOV07K25 de la EPCOS

Schema electrică este dată în figura 12.

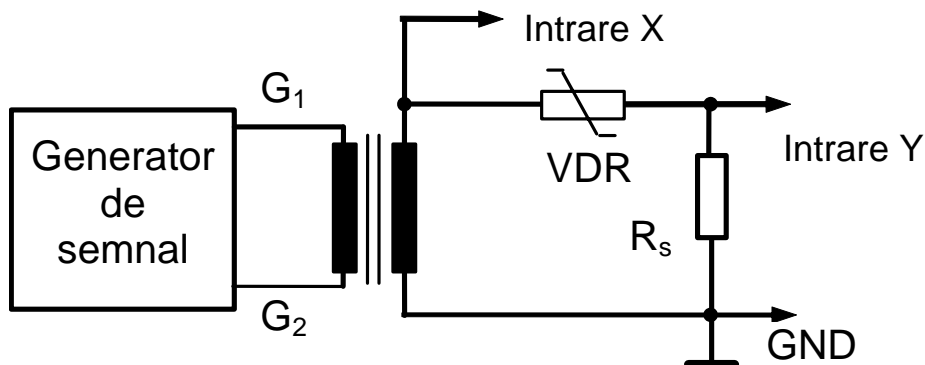


Fig.12 Montaj pentru vizualizarea caracteristicii $I(U)$ a varistoarelor.

Pentru a vizualiza pe ecranul unui osciloscop caracteristica $I(U)$ a unui varistor este necesar să aplicăm pe intrarea X a osciloscopului o tensiune proporțională cu tensiunea aplicată varistorului, iar pe intrarea Y, simultan, o tensiune proporțională cu curentul prin varistor. Tensiunea proporțională cu curentul prin varistor este obținută prin introducerea unei rezistențe R_s (șunt) în serie cu varistorul. ($R_s=100\Omega$)

Generatorul permite aplicarea unor tensiuni până la 20 V_{vv}. Pentru mărirea tensiunii se utilizează un transformator ridicător. Frecvența se va alege în jur de 50 Hz.

Pe ecranul osciloscopului citirea se face în diviziuni. Comutatorul SW1 (figura 12) permite comutarea între VDR 1 și VDR2. Se vor măsura 2 varistoare, ambele cu ZnO, completând pentru fiecare varistor tabelul 5.

Osciloscopul va avea următoarele reglaje:

- Pe axa X, amplificarea 2V/div. , sonda osciloscopului va fi 10:1
- Pe axa Y amplificare 200 mV/div, sonda 1:1

Cu aceste date rezultă coeficienții de scală $K_x=20 \text{ V/div}$, $K_y=2\text{mA/div}$.

Tabelul 5

	VDR1					VDR2				
Iv [div]										
Uv [div]										
Iv [mA]										
Uv [V]										

Se va alege un număr suficient de mare de puncte (10-16) pentru a permite trasarea unui grafic sugestiv. Valorile pentru Iv și Uv se calculează utilizând coeficienții de scală K_x și K_y : $I_v [\text{mA}] = K_y \cdot I_v [\text{div}]$ și $U_v [\text{V}] = K_x \cdot U_v [\text{div}]$.

3.4 Studiul protecției cu termistoare PTC polimerice

Se utilizează partea din stânga plăcii de laborator din figura 10. Termistorul este de tipul Polyswitch RXE030 iar rezistența de sarcină are valoarea de 33Ω . Se completează datele pentru termistorul PTC pe baza foilor de catalog, completând tabelul 6.

Tabelul 6 Datele termistorului polimeric

Nr. crt.	Curentul de reținere (hold) I_H (A)	Curentul de salt (trip) I_T (A)	Timpul maxim de salt (s) la $5 \times I_H$	P_d (W)	Rezistența inițială R min. R max.		Rezistența Post-trip R1 max. ()
RXE030							

Detalii despre termistoarele polimerice se găsesc în foile de catalog și în lucrările [2] și [4].

Schema de măsură este prezentată în figura 13.

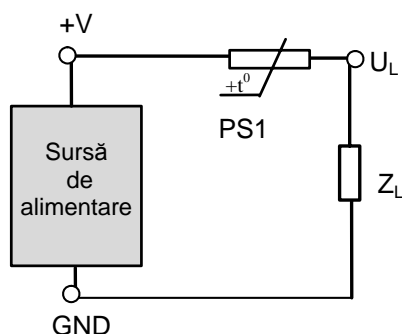


Fig. 13 Schema electrică a protecției cu termistor PTC cu rol de siguranță reversibilă

Se completează tabelul 7 în situațiile :

- Se aplică o tensiune de 10 V între bornele +V și GND care duce la stabilirea unui curent prin circuitul PS1-ZL mai mic decât curentul de menținere I_H . Ca urmare, aproape toată tensiunea sursei este aplicată sarcinii $R_L=33\ \Omega$, aceasta fiind situația normală de funcționare. Puterea disipată de sarcină este sub nivelul puterii nominale (5W).
- Se simulează apariția accidentală a unei tensiuni periculoase prin creșterea tensiunii sursei de alimentare la 20V care ar duce la depășirea puterii nominale a sarcinii, putând duce în situații reale la distrugerea acesteia. Datorită termistorului PTC curentul prin circuit se va limita la o valoare nepericuloasă.
- Se întrerupe alimentarea, resetând astfel protecția. Se revine la tensiunea de 10V a sursei. Se reface punctul a)

Tabelul 7

Caz	U_A [V]	U_L [V]	$I_L = U_A/R_L$ [mA]	$U_{PTC} = U_A - U_L$ [V]	$P_L = U_A \times I$ [W]	P_{PTC} [W]
a	10V					
b	20V					
c	10V					

U_A - tensiunea sursei de alimentare, U_L – tensiunea pe rezistența de sarcină, I_L curentul prin circuit, U_{PTC} tensiunea la bornele PTC, P_L puterea disipată de sarcină, P_{PTC} puterea disipată de PTC.

Se determină timpul în care are loc activarea protecției pe baza graficului din catalog („time to trip”)

4 Prelucrarea datelor experimentale

4.1 Cu datele din tabelul 3 se reprezintă grafic variația rezistenței în funcție de temperatură pentru cele 4 termistoare.

4.2 Pentru termistoarele NTC se calculează cu (3) și (4) parametrii A și B cu $\theta_1 \approx \theta_a$ și $\theta_2 \approx 100^\circ\text{C}$.

4.3 Pentru Termistoarele PTC se identifică temperatura de basculare T_b conform figurii 5. Se calculează apoi constantele A, B și C. Pentru B și C se aleg două temperaturi pentru care rezistența este mare, neglijându-se A. Parametrul A se calculează alegând o temperatură pentru care rezistența este mică, utilizând B și C determinați anterior.

4.4 Se compară variațiile cu temperatura ale rezistoarelor R1 și R2 între ele și cu cele ale termistoarelor.

4.5 Cu datele din tabelul 4a și 4b se ridică graficele $U(I)$ pentru termistoarele NTC. Se precizează valoarea maximului de tensiune U_m . Se calculează valorile maximului de tensiune și se compară cu valorile măsurate.

4.6 Cu datele din tabelul 5 se reprezintă grafic $I_v(U_v)$. Cu ajutorul datelor din tabel se calculează coeficienții α și k. Pentru o tensiune oarecare U_v aleasă în zona crescătoare a curentului se

verifică simetria caracteristicii $I(U)$. Dacă este posibil se calculează asimetria curenților cu formula (14).

4.7 Se completează datele din tabelul 7.

4.8 Observații, concluzii privind caracteristicile termistoarelor și varistoarelor, privind rezultatele, metoda de măsură, etc. (Se vor face după fiecare din punctele anterioare)

5. Întrebări, concluzii

5.1 Care este efectul creșterii temperaturii ambiante asupra caracteristicii $U(I)$ a termistorului NTC? Se va observa efectul pe baza relațiilor 9-10.

5.2 Coeficientul de disipație termică al termistorului se modifică când termistorul este imersat în ulei față de cazul în care este în aer?

5.3 Ce efect ar avea ridicarea caracteristicii $U(I)$ folosind termistorul NTC în etuva termostată încălzită?

5.4 Care este explicația pentru care caracteristica $U(I)$ a termistorului NTC prezintă o porțiune liniară spre valori mici ale curentului și tensiunii?

5.5 Cum ar arăta caracteristica $U(I)$ a unui termistor NTC dacă, teoretic, măsurătoarea s-ar efectua foarte rapid, într-un timp $t \ll \tau$?

5.6 Deduceți relația (11).

5.7 Dacă schimbați valorile temperaturilor în calculul parametrului B de la punctul 4.2 ce se observă? Comentați pe baza bibliografiei.

5.8 Calculați parametrii k și α pentru varistorul echivalent obținut prin conectarea în serie a două varistoare identice.

5.9 Cum se explică forma caracteristicii $R(T)$ pentru termistorul PTC? Se va studia bibliografia.

5.10 De ce factori depinde timpul după care se atinge regimul termic staționar la punctul 3.1?

5.11 Variația temperaturii ambiante în timpul experimentului poate afecta principal precizia măsurătorilor?

5. Conținutul referatului

5.1 Date experimentale, prelucrarea lor, concluzii și interpretări.

5.2 Răspunsuri la întrebări.

Bibliografie

1. Cătuneanu V. ș.a., Tehnologie electronică, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1984.
2. Svasta P. ș.a., Componente pasive, Rezistoare, Cavaliotti, 2007.
3. Svasta P. ș.a., Tehnologie electronică, Componente pasive (îndrumar de laborator) editura UPB 1990.
4. Svasta P. ș.a., Componente electronice pasive - probleme, editura UPB, 2005.
5. *** Rezistoare, termistoare, varistoare, diverse cataloage.
6. Svasta P. ș.a., Componente electronice pasive - Întrebări și răspunsuri, editura UPB, 1996.
7. www.cetti.ro