

STUDIUL REGIMURILOR TERMICE DIN CĂILE DE CURENT ALE APARATELOR ELECTRICE DE COMUTAȚIE ȘI DIN BOBINELE CU MIEZ DE FIER ALE APARATELOR ELECTRICE DE COMANDĂ

1. Notiuni teoretice

În elementele componente ale aparatelor electrice (căi de curent, bobine, miezuri feromagnetice, etc.) se dezvoltă căldură datorită următoarelor surse de căldură: efect Joule-Lenz, curenți turbionari, pierderi histerezis, pierderi în dielectric, efect pelicular și de proximitate. Căldura produsă pe aceste căi datorită nivelelor diferite de temperatură din elementele componente ale aparatelor electrice, este parțial evacuată prin conductibilitatea termică în interiorul aceluiași mediu și prin cedare de căldură pe suprafețele de separație a două medii diferite, iar o parte se înmagazinează în corp determinând o ridicare a temperaturii acestuia.

Transmiterea căldurii prin conductibilitate termică în corpurile omogene și izotrope este descrisă de legea lui Fourier,

$$dq = -\lambda \text{grad} \theta d\bar{A} \quad (1)$$

unde: dq – fluxul termic (cantitatea de energie termică ce străbate elementul de suprafață $d\bar{A}$ în unitatea de timp), [W]

λ – coeficient de conductibilitate termică dependent de material, [W/m.grd.]

Semnul minus din legea lui Fourier se explică prin aceea că transmisia căldurii se face în sens contrar gradientului de temperatură (de la temperatură mare către temperatură mică).

Cedarea de căldură prin suprafața de separație a două medii diferite este descrisă de legea lui Newton:

$$dq = \alpha_{\Sigma} (\theta - \theta_0) dA \quad (2)$$

unde: α_{Σ} - coeficient generalizat de cedarea căldurii prin convecție și radiație, [W/m².grd.]

$\theta - \theta_0$ - diferența de temperatură dintre cele două medii;

dA – element de suprafață, [m²]

Regimurile termice pot fi de lungă durată (căile de curent sunt parcurse de curentul nominal) și de scurtă durată când sunt parcurse de curentul de scurtcircuit un timp scurt limitat (de obicei 1 s). Pentru aceste două regimuri, conform STAS, se definesc temperaturi limită ce nu trebuie depășite, astfel încât solicitările termice să nu provoace degradări ale materialelor căilor de curent.

Ecuția bilanțului termic pentru un element de circuit în formă elementară este:

$$dQ_p = dQ_i + dQ_c \quad (3)$$

unde: dQ_p - cantitatea de căldură produsă în timpul dt în calea de curent, adică pierderile transformate în căldură;

dQ_i - cantitatea de căldură înmagazinată în timpul dt ca urmare a ridicării temperaturii;

dQ_c - cantitatea de căldură cedată în timpul dt mediului ambiant sau elementelor învecinate prin conducție termică, convecție termică sau radiație termică.

Procesele termice sunt influențate și de efectul pelicular și de proximitate în sensul că acestea contribuie la creșterea încălzirii datorită faptului că rezistența în curent alternativ crește datorită repartiției neuniforme a densității de curent pe secțiunea conductorului, crescând și pierderile.

Explicitând termenii ecuației (3) rezultă ecuația transmiterii căldurii:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_1} \Delta \theta - \frac{1}{T} \theta + \frac{p}{c_1} \quad (4)$$

unde: $c_1 = c_\gamma$ - căldură specifică volumică, [$W/m^3 \text{ grad.}$]

$p = \rho J^2$ - pierderile prin efect Joule-Lenz;

T - constanta de timp termică, definită astfel:

$$T = \lim_{v_\Sigma \rightarrow 0} \frac{\int_{v_\Sigma} C \gamma dV}{\int_{\Sigma} \alpha dS} \quad (4')$$

În ecuația (4) s-a considerat $\lambda = \text{ct.}$, corpul având diferențe mici de temperatură între diferite puncte, însă în cazul general λ depinde de temperatură.

În cazul încălzirii uniforme, derivatele spațiale ale temperaturii ($\frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial y}, \frac{\partial \theta}{\partial z}$) fiind nule ecuația transmiterii căldurii devine:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{T} \theta = \frac{p}{c_1} \quad (4'')$$

cu soluția (fig. 1):

$$\theta(t) = \theta_i + (\theta_m - \theta_i)(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (5)$$

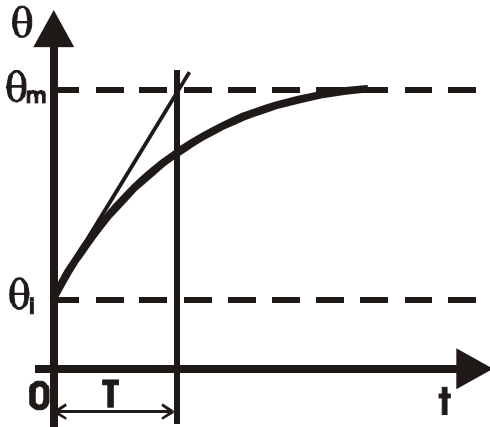


Fig. 1

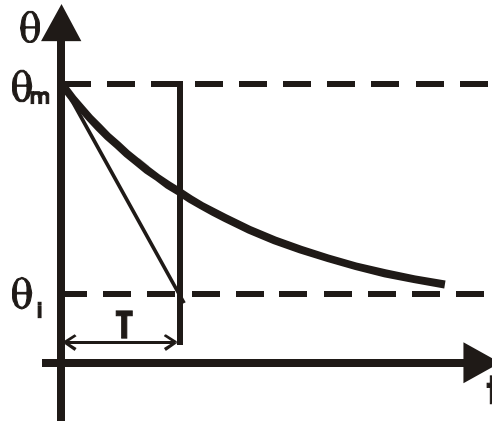


Fig. 2

unde : θ_i – temperatura inițială;

θ_m - temperatura finală maximă în regim staționar.

Notând cu $\tau = \theta_m - \theta_i$ – supratemperatură rezultă:

$$\tau(t) = \tau_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (5')$$

În general temperatura inițială este temperatura mediului ambiant $\theta_i = \theta_a$. Constanta de timp termică are semnificația fizică a timpului necesar elementului respectiv (corp) pentru a atinge supratemperatura τ_m fără cedare de căldură mediului ambiant.

Pentru $t \rightarrow \infty$, rezultă $\frac{\partial \theta}{\partial t} \rightarrow 0$ și $\theta(t) = \theta_m$, astfel că din (4'') avem:

$$\tau_m = \frac{pT}{c_1} \quad (6)$$

și înlocuind, $p = \rho J^2$, iar pentru un corp omogen și izotrop,

$$T = \frac{c_1 V}{\alpha_\Sigma S} = \frac{c_1 A}{\alpha_\Sigma l_p}$$

cu A = aria secțiunii transversale, iar l_p lungimea perimetrului conductorului, vom avea pentru un curent I prin calea de curent:

$$\tau_m = \frac{\rho I^2 A}{\alpha_\Sigma l_p A} \quad (7)$$

Analog considerând $p=0$, pentru răcire se obține (fig. 2)

$$\theta(t) = \theta_i + (\theta_m - \theta_i)e^{-\frac{t}{T}}$$

$$\tau(t) = \tau_m e^{-\frac{t}{T}} \quad (8)$$

Bara cu secțiune variabilă (fig. 3), parcursă de curent se încălzește neuniform, astfel că în porțiunea îngustă densitatea de curent și pierderile sunt mult mai mari.

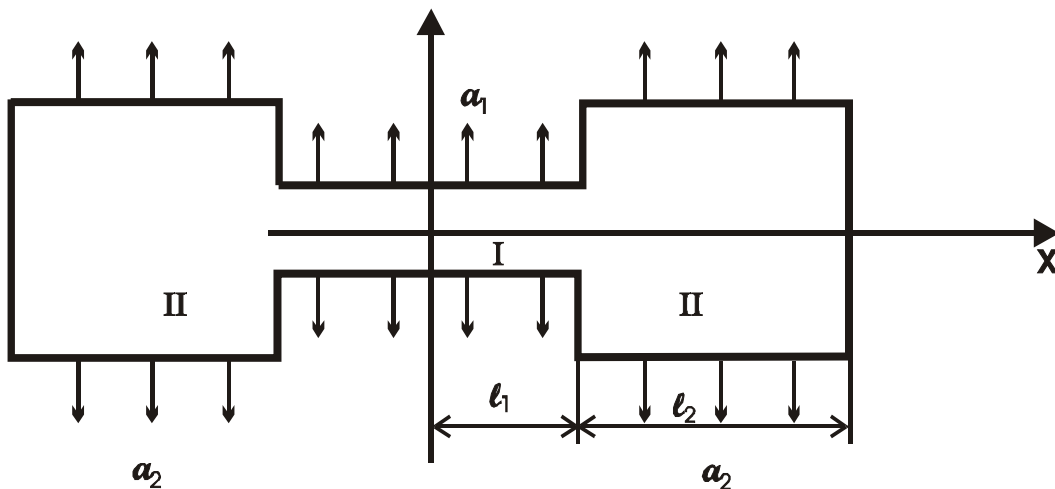


Fig. 3

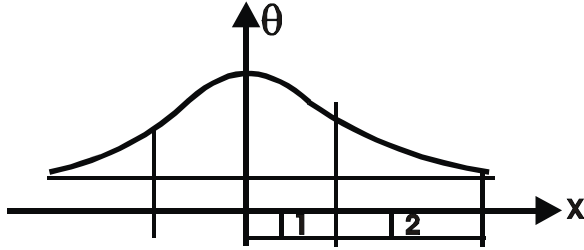
Căldura produsă în fiecare porțiune este parțial înmagazinată, ducând la încălzirea acesteia și parțial cedată în exterior. Din porțiunea îngustă **I**, căldura este evacuată pe două căi; prin cedare de căldură cu coeficientul α_1 și prin conductibilitate termică cu coeficientul λ către porțiunile late, de unde împreună cu cea produsă în ele este evacuată în exterior cu coeficientul α_2 . Porțiunile late joacă rol de radiator pentru porțiunile înguste.

Scriind ecuația (4) pentru fiecare porțiune și rezolvând sistemul [2] se obține repartiția spațială a temperaturilor (fig. 4)

$$\theta_I(x) = \theta_{m1} - \frac{\theta_{m1} - \theta_{m2}}{1+k} \cdot \frac{ch\nu_1 x}{ch\nu_1 L_1} ; \quad \nu \cong \sqrt{\frac{\alpha_i L_{pi}}{\lambda_i A_i}} \quad , \quad i=1,2$$

$$\theta_{II}(x) = \theta_{m2} - \frac{\theta_{m1} - \theta_{m1}}{1 + 1/k} \cdot \frac{chv_2(L_1 + L_2 - x)}{chv_2L_2} \quad k = \frac{\lambda_1 A_1 v_1 th v_1 L_1}{\lambda_2 A_2 v_2 th v_2 L_2} \quad (9)$$

unde θ_{m1} și θ_{m2} sunt temperaturile pe care le-ar fi avut bara infinită dacă ar fi fost în întregime subțire, iar θ_{m2} dacă ar fi fost lată, în regim permanent de încălzire, calculate cu relația (7).



Pentru determinarea lui θ_{max} și lui T se folosesc:

$$\theta_m = \frac{\theta_{0m}}{1 - \alpha_R \theta_{0m}}$$

$$\theta_{0m} = \frac{\rho_0 I^2}{\alpha_\Sigma L_p A} \quad (10)$$

Fig. 4

unde: $\alpha_{RCu} = \frac{1}{234.5} \text{ grad}^{-1}$, coeficient de creștere a rezistenței

$$\alpha_{RAI} = \frac{1}{245} \text{ grad}^{-1}$$

$$\alpha_{RFe} = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1}$$

$$\alpha_{RAm} = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1}; \quad \alpha_\Sigma \cong 10 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{grad}$$

$$T = \frac{c_1 A}{\alpha_\Sigma l_p} \quad [3] \quad (11)$$

	Cu	Al	Fe	Am
$c_1 [W / \text{m}^3 \cdot \text{grad}]$	$3.45 \cdot 10^6$	$2.4 \cdot 10^6$	$3.66 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^6$

- metode grafice expuse în [1].

În aprecierea regimului termic al bobinelor se utilizează în mod curent metoda variației rezistenței care constă în următoarele: se măsoară rezistența electrică a bobinei în stare rece (la temperatura mediului ambiant θ_a) R_a ; se măsoară după un trecerea unui timp t a unui curent constant prin bobină, o valoare R_1 a rezistenței bobinei. Se pot scrie relațiile:

$$R_a = R_0 (1 + \alpha_R \theta_a)$$

$$R_1 = R_a \cdot (1 + \alpha_R \cdot \theta_1) \quad (12)$$

De unde se obține:

$$\theta_1 = \frac{R_1 - R_a}{R_a} \left(\frac{1}{\alpha_R} + \theta_a \right) + \theta_0 \quad (13)$$

unde: θ_1 este temperatura medie a bobinei iar R_1 este rezistența bobinei după un timp egal cu $(4...5) T$, când se poate considera că s-a ajuns la regimul permanent (staționar).

În studiul încălzirii bobinelor se poate defini un coeficient global de cedare a căldurii și un coeficient de conductivitate termică echivalent conform relațiilor de mai jos:

$$\alpha = \frac{P}{S_{ex} \theta_s} = \frac{R_1 I^2}{2r_{ex} h \theta_s}, \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{grad}] \quad (14)$$

unde: r_{ex} - raza exterioară a bobinei;

r_{in} - raza interioară a bobinei;

r_m - raza pentru care $\theta = \theta_{max}$

h - înălțimea bobinei;

I - curentul prin bobină

Pentru regimul intermitent (fig. 5) de încălzire sunt valabile relațiile (5) și (8) de unde rezultă temperatura maximă stabilizată, θ și temperatura minimă stabilizată θ_s .

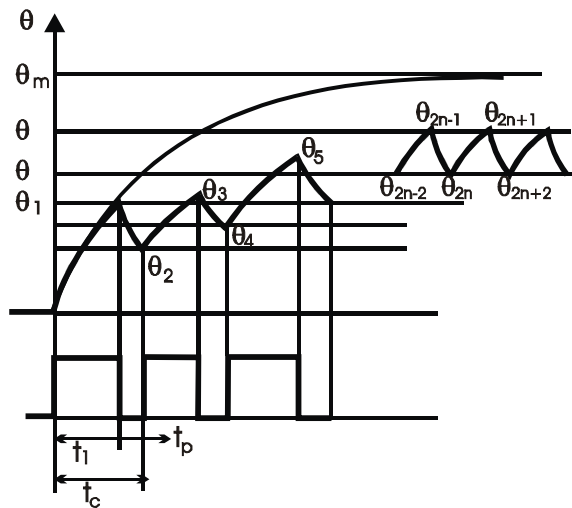


Fig. 5

t_l = timp de lucru

t_p = timp de pauză

t_c = timpul unui ciclu

$$\theta^* = \theta_m \cdot \frac{1-A}{1-AB} ; \quad A = e^{-\frac{t_l}{T}} , \quad B = e^{-\frac{t_p}{T}} \quad (15)$$

$$\theta_* = \theta_m \cdot \frac{(1-A)B}{1-AB}$$

2. Chestiuni de studiat

- 2.1. Se va studia transmisia căldurii prin conducție determinând variația temperaturii $\theta = f(t)$ la o bară cu secțiune variabilă.
- 2.2. Se va determina repartiția temperaturii în lungul axei barei $\theta = f(x)$ pentru bara de la pct. 2.1., după stabilizarea regimului termic și se va compara curba experimentală cu cea obținută analitic cu relațiile (9).
- 2.3. Se va studia efectul radiației prin determinarea variației temperaturii $\theta = f(t)$ pentru trei bare de aluminiu identice însă cu stratul de acoperire diferit.
- 2.4. Se va studia transmisia căldurii prin conducție determinând $\theta = f(t)$ pentru trei bare de forme geometrice identice însă din materiale diferite (Cu, Al, Fe).
- 2.5. Se va studia transmisia căldurii prin convecție naturală prin determinarea variației temperaturii $\theta = f(t)$ pentru două bare identice (ca material și formă geometrică) așezate pe lat, respectiv pe cant.
- 2.6. Se va studia răcirea determinând $\theta = f(t)$ pentru barele de la pct. 2.2; 2.3; 2.4; 2.5.
- 2.7. Se va determina grafic și analitic (în cadrul referatului) constanta de timp termică și temperatura de regim stabilizat θ_m a căilor de curent de la pct. 2.3; 2.4; 2.5.
- 2.8. Determinarea experimentală și grafoanalitică a caracteristicii $\theta = f(t)$ pentru încălzirea în curent continuu în regim intermitent, a bobinei cu miez de fier.
- 2.9. Determinarea experimentală a caracteristicii $\theta = f(\text{raza})$ pentru încălzirea în regim permanent în c.c. și c.a.

2.10. Determinarea coeficientului global de cedarea căldurii pentru bobine cu relația (13).

2.11. Determinarea coeficientului de conductivitate termică echivalent.

2.12. Determinarea temperaturii medii a bobinei prin metoda variației rezistenței (relația 12).

3. Scheme electrice de lucru și aparate utilizate

Pentru determinările experimentale de la pct. 2.1; 2.2; 2.3; 2.4; 2.5; 2.6 se execută schema din fig. 7

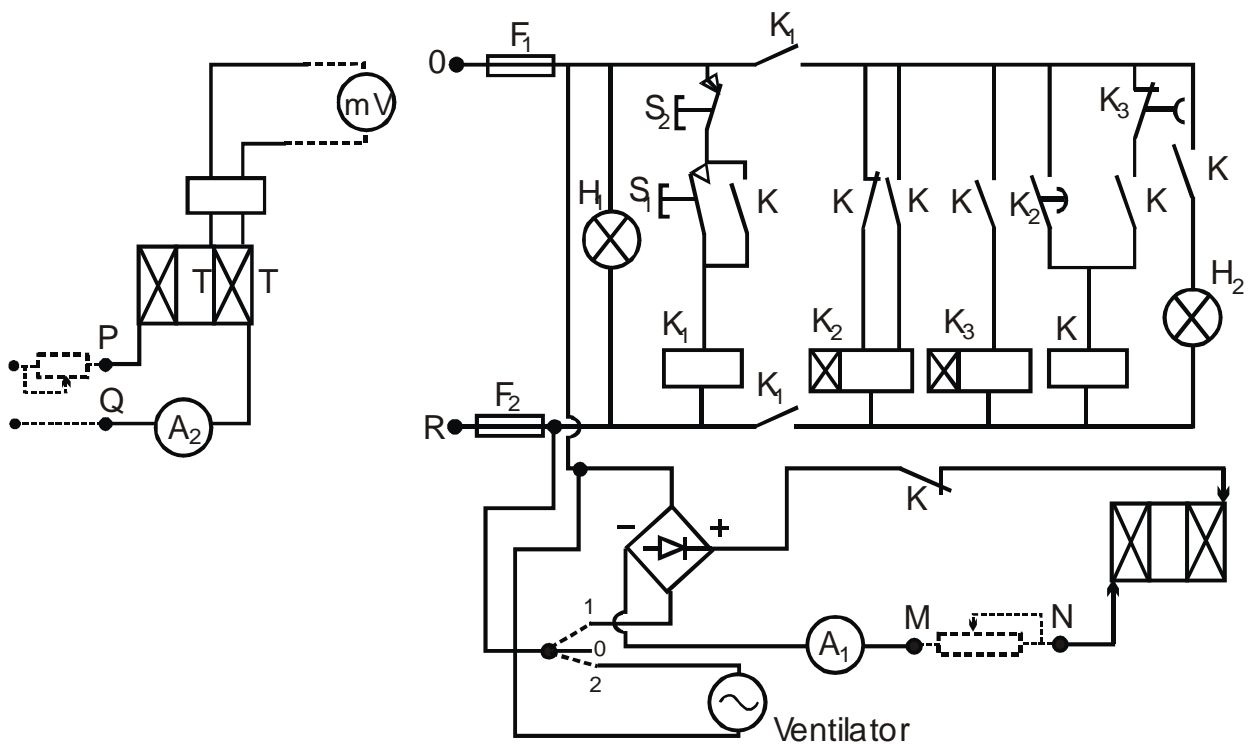


Fig. 6

a0 – întreruptor bipolar; **m501** – autotransformator; ATR – 18; **m502** – transformator pentru obținerea curenților intenși; **f101** – transformator de curent : 300/5 A; **g101** – ampermetru 15/5 A; **g102** – milivoltmetru 15 mV c.c.; **g103** – ohmmetru electronic; **b601** – comutator pentru citirea succesivă a termotradoatoarelor (termocuple sau termistori); **B1 ... B6** – barele de studiat.

Constanta grupului de măsură va fi:

$$K_A = \frac{300}{5} \cdot \frac{5}{n} = \frac{300}{5} \cdot \frac{5}{n} = 20A / div$$

Pentru determinările experimentale de la 2.8; 2.9; 2.10; 2.11; 2.12, se execută montajul din fig. 6 (numai porțiunile punctate).

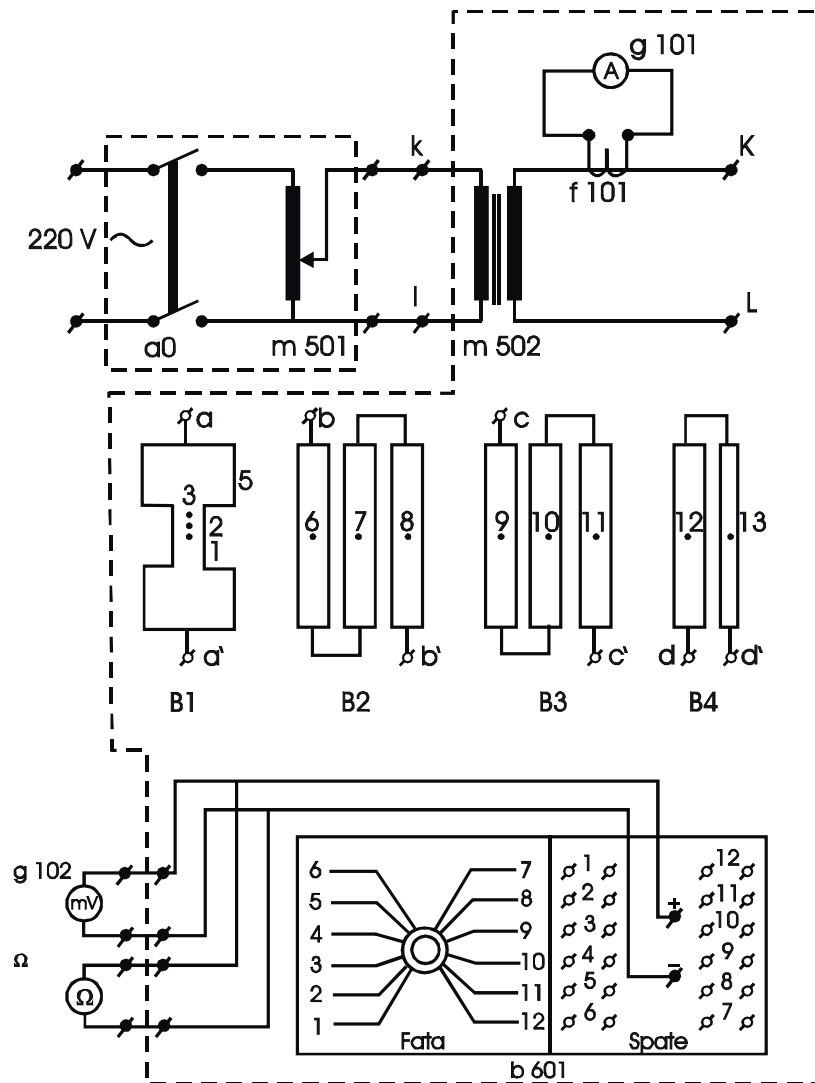


Fig. 7

4. Modul de lucru

Pentru determinările de la pct. 2.1 se conectează bornele **K** și **L** la **aa'** și milivoltmetrul la **1-2** și se fixează un curent de 100 ... 200 A, citind la intervale de timp egale, cu ajutorul comutatorului **b 601** la milivoltmetru, întocmind tabelul 4.1, iar pentru pct. 2.2 se completează tabelul 4.2.

Se deconectează bornele **K** și **L** de la **aa'** și se conectează la **bd'**, legând împreună **B'** cu **c** și **c'** cu **d**, iar la bornele **1-2** se conectează un ohmmetru electronic. Stabilind un curent de 150 – 300 A se fac citirile corespunzătoare completând tabelul 4.3.

Valorile temperaturilor se completează folosind curba de etalonare a termistoarelor din fig. 8. Analog se procedează pentru pct. 2.6, completând un tabel asemănător cu 4.2, după ce montajul a fost scos de sub tensiune (barele se răcesc).

Pentru determinările de la pct. 2.8 și 2.9 se utilizează echipamentul a cărui schemă e prezentată în fig. 6, astfel:

Se conectează reostatul **R1** la bornele **M** și **N**;

Se măsoară cu ajutorul unei punți Wheastone rezistența termistorului **Th** plasat în înfășurarea bobinei **B1** și rezistența ohmetrului a bobinei **B1** și temperatura mediului ambiant θ_a

Se conectează la bornele „+” și „-” prin intermediul reostatului **R2** prin bornele **P** și **Q** bobina **B2** (220 V c.c.);

Se pune echipamentul sub tensiune cu **K** pe poziția **1** și se fac citiri ale valorii rezistenței termistorului **Th** conform tabelului 4.4.

Tabelul 4.4

Ciclul 1		Ciclul 2		Ciclul 3		Ciclul 4	
t	R	t	R	t	R	t	R
0''		9'30''		19'		28'30''	
20''		9'50''		19'20''		28'50''	
40''		10'10''		19'40''		29'10''	
60''		10'30''		20'		29'30''	
1'20''		10'50''		20'20''		29'50''	
1'40''		11'10''		20'40''		30'10''	

2'	11'30"	21'	30'30"
4'30"	14'	23'30"	
7'	16'30"	26'	
9'30"	19'	28'30"	

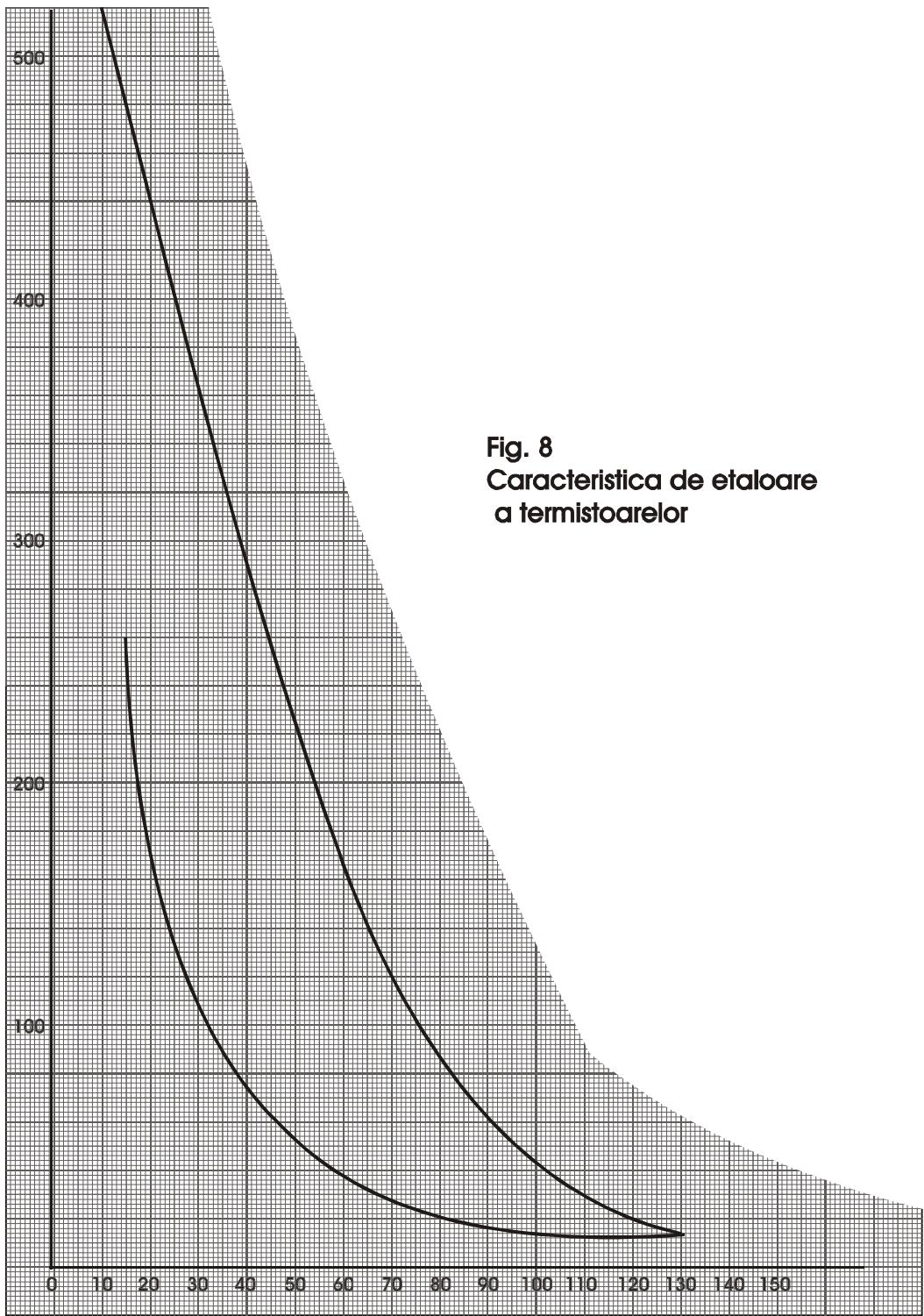


Fig. 8
Caracteristica de etaloare
a termistoarelor

Tabel 4.1

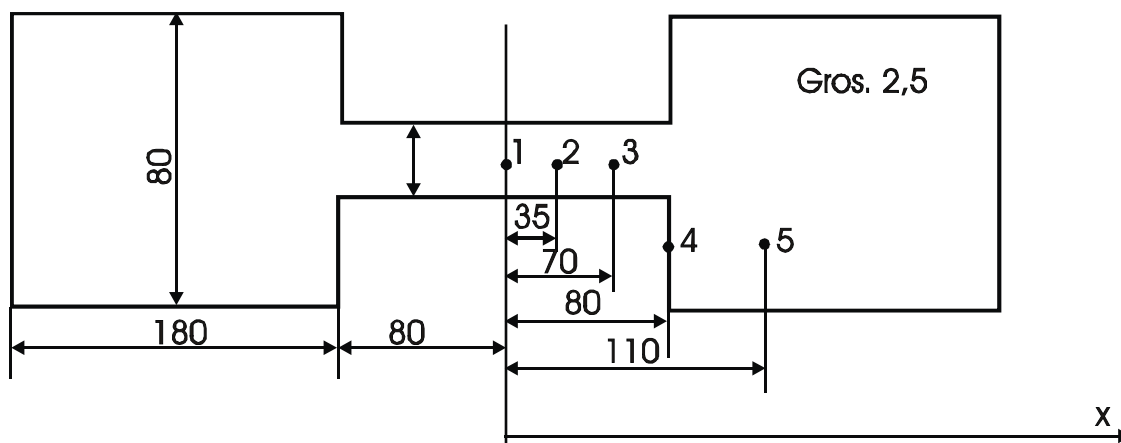
Termocuplu 1				Termocuplu 3				Termocuplu 5			
t	α	τ	θ	t	α	τ	θ	t	α	τ	θ
min.	mV	°C	°C	min	mV	°C	°C	min	mV	°C	°C
15''				30''				45''			
60''				75''				90''			
105''				120''				135''			
150''				165''				180''			
4'				5'				6'			
.				.				.			
.				.				.			
.				.				.			
n'				(n+1)'				(n+2)'			

Tabel 4.2

Termocuplu	1	2	3	4	5
t [min.]	(n+3)' 00''	(n+3)' 15''	(n+3)' 30''	(n+3)' 45''	(n+3)' 00''
α [mV]					
τ [°C]					
θ [°C]					

Tabel 4.3

Bara nevopsită				Bara vopsită roșu				Bara vopsită negru			
t	α	R	θ	t	α	R	θ	t	α	R	θ
min.	Ω	Ω	$^{\circ}\text{C}$	min	Ω	Ω	$^{\circ}\text{C}$	min	Ω	Ω	$^{\circ}\text{C}$
15''				30''				45''			
60''				75''				90''			
105''				120''				135''			
150''				165''				180''			
4'				5'				6'			
.				.				.			
.				.				.			
.				.				.			
n'				(n+1)'				(n+2)'			



Pentru determinările de la punctul 2.9 se întocmește tabelul 4.5

Tabel 4.5

Termocuplul							
1	2	3	4	5	6	7	8
div. °C	div. °C	div. °C	div. °C	div. °C	div. °C	div. °C	div. °C
15'	- -						
30'	c.c.						
15'	- -						
30'	c.a.						

unde :

Se întrerupe alimentarea echipamentului și se măsoară din nou rezistența ohmică a bobinei **B1**.

Se trece **Ic** pe poziția 2 (ventilator) pentru răcirea bobinei.

Se alimentează bobina **B2** la tensiune alternativă (380 V) și determinările se trec în tabelul 4.5.

Dimensiunile geometrice ale bobinei cât și distanțele **ri** ale fiecărui termocuplu față de axa bobinei rezultată din figura 9.

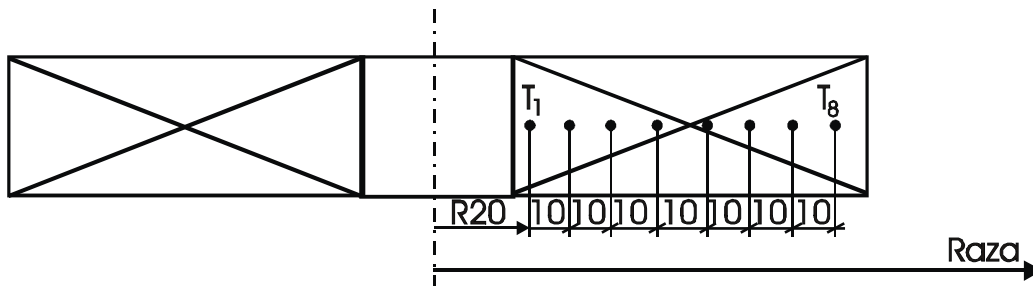


Fig.9

5.Bibliografie

1. Steinberg, C., Teoria și proiectarea aparatelor electrice, vol.1, Ed. Didactică și pedagogică, București, 1964.
2. Cividjian, G.A., Aparate electrice, Reprografia Universității din Craiova, 1979.