

LUCRAREA NR.1

DETERMINAREA TRANSMISIVITĂȚII TERMICE GLOBALE PENTRU O CALE DE CURENT

1.1. Regimul tranzitoriu de încălzire a căilor de curent în cazul solicitării termice de lungă durată

Solicitarea termică de lungă durată este produsă sub acțiunea curenților corespunzători regimurilor normale de sarcină. Din momentul stabilirii curentului, pe durata unui regim tranzitoriu de încălzire, temperatura căii de curent crește, evoluând spre o valoare constantă, de regim permanent.

Pentru o cale de curent omogenă, suficient de lungă sau care este prevăzută, la capete cu o izolație termică de foarte bună calitate, gradientul de temperatură pe direcția axială este practic nul, încât ecuația generală a solicitărilor termice [1], se reține sub forma:

$$\rho_0 J^2 [1 + \alpha_R (\vartheta + \theta_a)] = \gamma c \frac{d\vartheta}{dt} + \alpha_t \frac{l_p}{s} \vartheta, \quad \vartheta(0) = \vartheta_0 \quad (1.1)$$

unde:

$$\vartheta(t) = \theta(t) - \theta_a \quad (1.2)$$

reprezintă supratemperatura în °C,

α_R [°C⁻¹] - coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura;

J [A/m²] - densitatea de curent;

c [J/kg·°C] - căldura specifică;

γ [kg/m³] - densitatea materialului la 0°C;

α_t [W/m²·°C] - transmisivitatea termică globală,

s [m²] - suprafața secțiunii transversale,

l_p [m] - lungimea perimetrului corespunzător secțiunii transversale, s;

θ [°C] - temperatura căii de curent;

θ_0 [°C] - temperatura mediului ambiant,

ρ_0 [Ω·m] - rezistivitatea la 0°C.

Dacă se notează:

$$\vartheta_p = \frac{\rho_0 J^2 s (1 + \alpha_R \theta_a)}{\alpha_t l_p - \rho_0 J^2 s \alpha_R}, \quad T = \frac{\gamma c s}{\alpha_t l_p - \rho_0 J^2 s \alpha_R}, \quad J = J_{cr} = \sqrt{\frac{\alpha_t l_p}{\rho_0 \alpha_R s}} \quad (1.3)$$

unde: ϑ_p [°C] este supratemperatura de regim permanent, iar T [s]- constanta de timp termică, ecuația (1.1) se poate scrie sub forma :

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{\vartheta}{T} + \frac{\vartheta_p}{T}, \quad \vartheta(0) = \vartheta_0 \quad (1.4)$$

și admite soluția:

$$\vartheta(t) = \vartheta_p (1 - e^{-t/T}) + \vartheta_0 e^{-t/T} \quad (1.5)$$

În cazul densității de curent critice dată de relația (1.3), soluția ecuației (1.1) rezultă de forma:

$$\vartheta(t) = \frac{\rho_0 J_{cr}^2 (1 + \alpha_R \theta_a)}{\gamma_c} t + \vartheta_0. \quad (1.6)$$

Corespunzător relațiilor (1.5) și (1.6), în figura 1.1 este reprezentat grafic regimul tranzitoriu $\vartheta(t)$ pentru următoarele valori ale densității de curent: $J < J_{cr}$ (curbele 1); $J = J_{cr}$ (curba 2); $J > J_{cr}$ (curbele 3).

Se evidențiază astfel că o condiție necesară de existență a solicitării termice de lungă durată este de forma $J > J_{cr}$ pentru care, din (1.3), rezulta $\vartheta_p > 0$; $T > 0$. În acest caz supra-temperatura de regim tranzitoriu tinde spre o valoare finită, ϑ_p , de regim permanent:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta(t) = \vartheta_p > 0, J < J_{cr} \quad (1.7)$$

Pentru densități de curent $J > J_{cr}$, rezultă $\vartheta_p < 0$, $T < 0$ conform figurii 1.1 și relațiilor (1.3), (1.5), (1.6), în ipoteza $J \geq J_{cr}$, supratemperatura crește nedefinit în timp:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta(t) = \infty; J \geq J_{cr}, \quad (1.8)$$

limitarea supratemperaturii fiind posibilă doar prin limitarea procesului de încălzire. Aceasta este cazul solicitării termice de scurtă durată, produsă în mod obișnuit sub acțiunea curenților de scurtcircuit.

În ipotezele $J < J_{cr}$, $\vartheta_0 = 0$, din (1.5) se obține:

$$\vartheta(T) = 0,632 \vartheta_p; \quad (1.9)$$

constantă de timp termică T , se definește astfel: ca durată în care supratemperatura de regim tranzitoriu, inițial nulă, atinge valoarea $0,632 \vartheta_p$. În ipotezele menționate din relația (1.5) se obține:

$$\vartheta(4T) = 0,982 \vartheta_p, \quad (1.10)$$

evidențiindu-se astfel că după durata $t = 4 \cdot T$ se poate considera atinsă supratemperatura de regim permanent (cu o eroare sub 2% în supratemperatură).

În cazul suprasolicitării termice de lungă durată corespunzătoare unei căi de curent de lungime l , prin neglijarea celui de-al doilea termen de la numitorii relațiilor (1.2, 1.3) se obțin expresiile simplificate:

$$\vartheta_p = \frac{R_a I^2}{\alpha_r S}, \quad T = \frac{mc}{\alpha_r S} \quad (1.11)$$

unde: $R_a [\Omega]$ - rezistența căii de curent la temperatura Q_a a mediului ambiant;
 $S [m^2]$ - suprafața de cedare a căldurii;
 $I [A]$ - intensitatea curentului;
 $m [kg]$ - masa căii de curent.

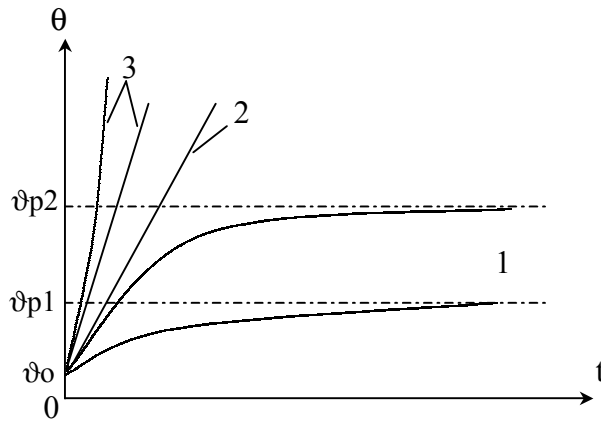


Fig. 1.1: Reprezentarea graficului regimului tranzitoriu $\vartheta(t)$

1.2. Regimul permanent de încălzire a căilor de curent

În regim permanent supratemperatura este constantă, căldura degajată prin efect Joule în volumul căii de curent fiind cedată în întregime, prin suprafața laterală a acesteia, mediului ambiant; ecuația generală a solicitărilor termice [1], se particularizează în acest caz sub forma:

$$p = \alpha_t \frac{l_p}{s} (\theta - \theta_a), \quad (1.12)$$

unde p [W/m³] reprezintă pierderile specifice de putere în volumul căii de curent

Potrivit legii Joule-Lentz, pierderile specifice în volumul unei căi de curent omogene se calculează cu relația:

$$p = k_p \rho_0 (1 + \alpha_R \theta) J^2, \quad (1.13)$$

unde k_p este coeficientul pierderilor suplimentare, datorate efectelor pelicular și de proximitate; aceasta se consideră cu valori supraunitare numai la încălzirea sub acțiunea curentului alternativ a unor căi de curent masive sau a mai multor căi de curent amplasate la distanțe mici una în raport cu celelalte (de exemplu la cabluri multifilare).

Din ecuațiile (1.12), (1.13), pentru temperatura de regim permanent se obține expresia:

$$\theta = \frac{\rho_0 k_p I^2 + \alpha_t l_p s \theta_a}{\alpha_t l_p s - \rho_0 k_p \alpha_R I^2} \quad (1.14)$$

unde:

$$I = J \cdot s \quad (1.15)$$

reprezintă intensitatea (valoarea efectivă) a curentului care produce încălzirea.

Relația (1.14) permite:

- calculul intensității I_{ad} , a curentului admisibil printr-o cale de curent, pentru care se impune condiția $\theta = \theta_{ad}$, θ_{ad} fiind temperatura limită admisibilă corespunzătoare solicitării termice de lungă durată;
- verificarea încălzirii de regim permanent a unei căi de curent, produsă sub acțiunea unui curent de sarcină de intensitate $I < I_{ad}$; prin calcul, în acest caz trebuie să rezulte $\theta < \theta_{ad}$;
- dimensionarea unei căi de curent care, parcursă de curentul nominal cu intensitatea $I = I_n$ atinge la regim permanent temperatura $\theta = \theta_p < \theta_{ad}$.

1.3. Curenți de suprasarcină. Caracteristica timp – curent

În regimuri de sarcină, solicitarea termică de lungă durată este produsă sub acțiunea unor curenți având intensitatea $I_s \leq I_n < I_{ad}$, unde I_n , I_{ad} reprezintă intensitățile curenților nominal respectiv admisibil; temperaturile de regim permanent ale căilor de curent ating valori θ_p , θ_{ad} , θ_{ad} fiind temperatura admisibilă.

Datorită unor receptoare având sarcina variabilă în limite largi, de exemplu motoare asincrone, în instalații apar regimuri de suprasarcină pe durata cărora curenții au intensități $I_{sc} > I_{ad}$ (orientativ $I_{sc} = I_{ad} \div 6 \cdot I_{ad}$). În aceste cazuri temperatura crește în timp, tinzând să depășească valoarea θ_{ad} .

Dacă durata de existență a curenților de sarcină poate fi oricât de mare, durata de menținere a curenților de suprasarcină trebuie limitată la valoarea admisibilă τ , corespunzătoare momentului în care temperatura $\theta(t)$ a căii de curent atinge valoarea limită admisibilă, θ_{ad} .

Ținând seama de aceste considerente condiția necesară și suficientă de existență a solicitării termice de lungă durată este $I \leq I_{ad}$ ($J \leq J_{ad}$), J_{ad} fiind valoarea admisibilă a densității de curent.

Dacă se notează:

$$I^* = \frac{I_{sc}}{I_{ad}}, \quad I^* > 1, \quad (1.16)$$

dependența $\tau = \tau(I)$ reprezintă caracteristica timp-curent pentru o cale de curent.

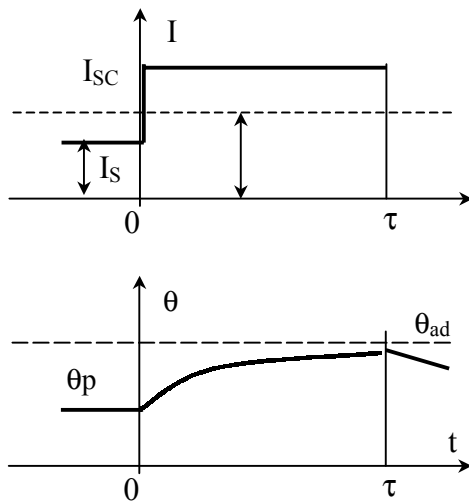


Fig.1.2: Caracteristica $\tau(I^*)$

Expresia caracteristicii $\tau(I)$ se determină impunând condiția ca temperatura de regim tranzitoriu, $\theta(t)$, înregistrată din momentul $t=0$ al apariției curentului de suprasarcină, figura 1.2, să atingă valoarea admisibilă θ_{ad} în momentul $t=\tau$, adică:

$$\theta(\tau) = \theta_{ad}. \quad (1.17)$$

Ținând seama de relațiile (1.2), (1.5), condiția (1.17) se scrie sub forma :

$$\vartheta_{psc}(1 - e^{-\tau/T}) + \vartheta_p e^{-\tau/T} + \theta_a = \theta_{ad} \quad (1.18)$$

ϑ_{psc} , ϑ_p fiind supratemperaturile de regim permanent produse sub acțiunea curenților având intensitățile I_{sc} , respectiv I_a .

Potrivit relațiilor (1.11), (1.16), se obține:

$$\vartheta_p = (\theta_{ad} - \theta_a)\eta^2, \quad \vartheta_{psc} = (\theta_{ad} - \theta_a)I^2, \quad (1.19)$$

unde η reprezintă gradul inițial de încărcare a căii de curent, dat de relația :

$$\eta = \frac{I_s}{I_{ad}}, \quad \eta < 1 \quad (1.20)$$

Ținând seama de (1.18), (1.19) expresia caracteristicii timp-curent se obține din relația (1.17) de forma :

$$\tau = \left(\ln \frac{I^2 - \eta^2}{I_*^2 - 1} \right) \cdot T \quad (1.21)$$

Reprezentarea grafică a caracteristicii $\tau(I)$ este data în figura 1.3, curbele 1,2.

O protecție la suprasarcină avantajoasă sub raport tehnico-economic trebuie să aibă caracteristica de protecție timp (de acționare)- curent curba 3, figura

1.3, de aceeași formă cu caracteristicile $\tau(I)$ ale instalației protejate. Pentru asigurarea protecției la orice valoare I a curentului de suprasarcină, caracteristica de protecție trebuie să se găsească sub caracteristicile $\tau(I)$, în aceste condiții, curentul de suprasarcină este întrerupt înainte de momentul atingerii temperaturii limită admisibile în instalația protejată.

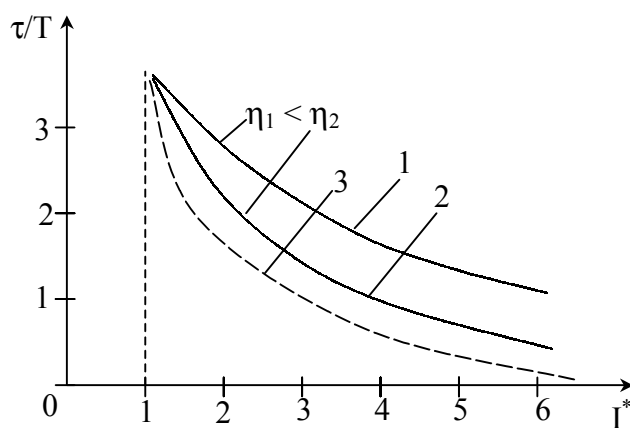


Fig. 1.3. Caracteristica $\tau(I^*)$

1.4. Programul lucrării

1.4.1. Înregistrarea supratemperaturii de regim tranzitoriu pentru o cale de curent

Cu ajutorul montajului având schema electrică reprezentată grafic în figura 1.4, se înregistrează curbele de variație a supratemperaturii la încălzirea căii de curent AB, într-un punct al acesteia; drept traductor de supratemperatură se utilizează termoelementul TE cuplat la un aparat de măsură numeric indicator de temperatură (IT). Calea de curent este tubulară și dispusă solenoidal pentru micșorarea spațiului ocupat în instalație; cedarea căldurii se consideră efectuată numai prin suprafața exterioară.

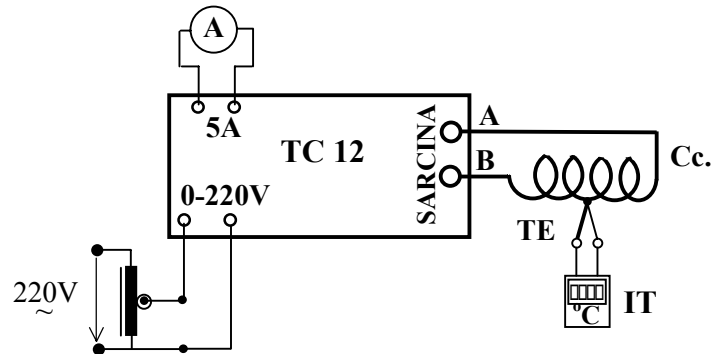


Fig. 1.4: Schema de montaj în laborator.

Pentru o valoare J_1 a densității de curent precizată de conducătorul lucrării, se determina cu relația (1.15) intensitatea I_1 a curentului; cunoscând constanta trusei de curent TC-12, se calculează indicația I_{1a} a ampermetrului din schemă. Se citește la anumite intervale de timp (din 30 în 30 de secunde) temperatura ϑ și apoi se reprezintă la scară curba $\vartheta(t)$, de variație a supratemperaturii în regim tranzitoriu $\vartheta_0 = 0$.

Datele înregistrate se centralizează în tabelul 1.1

Tabelul 1.1.

t [s]	0	30	60	90	120	150	180
ϑ_1 [°C] la încălzire							
ϑ [°C] la răcire							

1.4.2. Determinarea temperaturii de regim permanent prin metoda grafică

Ecuția încălzirii în regim permanent, pentru cantități finite, se poate scrie:

$$\theta = \theta_{\max} - T \frac{\Delta\theta}{\Delta t},$$

unde: $\Delta\theta$ - creșterea de temperatură în intervalul de timp Δt ;

θ - temperatura.

Încălzirea se reprezintă printr-o dreaptă care taie axa absciselor ($\theta = 0$) la $\Delta\theta = \frac{\theta_{\max}}{T} \cdot \Delta t$, iar axa ordonatelor la $\theta = \theta_{\max}$ (când creșterea de temperatură este nulă, $\Delta\theta = 0$).

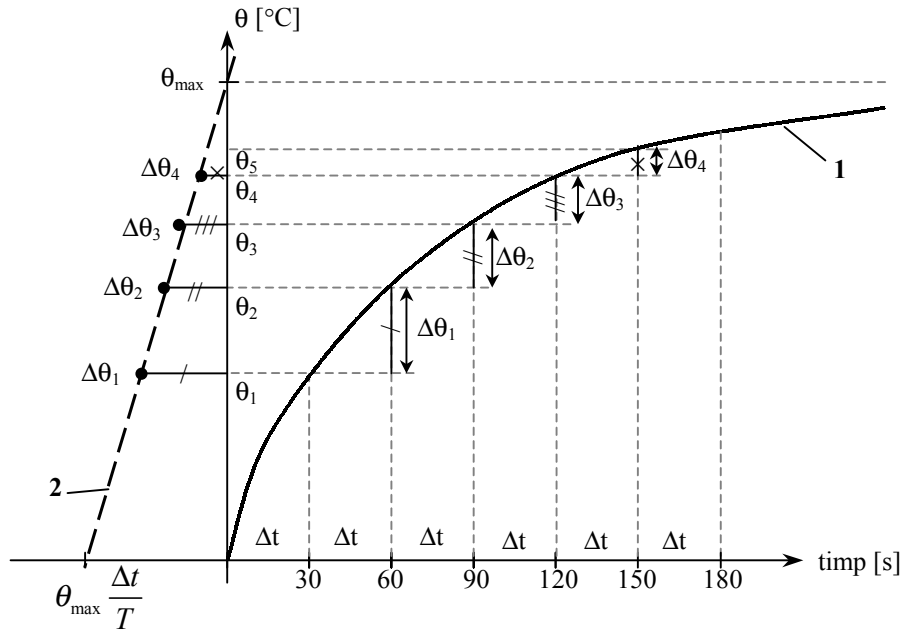


Fig. 1.5: Metoda grafică de determinare a temperaturii de regim permanent θ_{\max} .

Graficul se va trasa pe hârtie milimetrică, iar pașii pentru realizarea sa sunt următorii:

- 1) se trasează curba **1** cu datele obținute experimental din tabelul 1.1;
- 2) în dreptul ordonatei θ_1 se trasează pe orizontală o dreaptă egală cu lungimea segmentului corespunzător creșterii de temperatură $\Delta\theta_1$ (notat cu /);
- 3) în dreptul ordonatei θ_2 se trasează o dreaptă de lungime $\Delta\theta_2$ (notată cu //);
- 4) în dreptul ordonatei θ_3 se trasează o dreaptă de lungime $\Delta\theta_3$ (notată cu ///);
- 5) și așa mai departe, până se termină toate valorile obținute;
- 6) dreapta (**2**) ce trece prin capetele segmentelor orizontale trasate anterior intersectează ordonata în punctul corespunzător temperaturii de regim permanent θ_{\max} .

1.4.3. Determinarea transmisivității termice globale

Înregistrările obținute sunt de forma $\vartheta(t)$, supratemperatura ϑ fiind dată în °C, iar timpul t în secunde.

Pentru determinarea constantei de timp termice T , se folosește sistemul de ecuații:

La încălzire:

$$\begin{cases} \vartheta_1(t_1) = \vartheta_p \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}} \right) \\ \vartheta_1(t_2) = \vartheta_p \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T}} \right) \end{cases} \quad (1.22).$$

unde $\vartheta_1(t_1)$ și $\vartheta_1(t_2)$ sunt valori ale supratemperaturilor măsurate în momentele t_1 și $t_2 = 2 \cdot t_1$. În aceste condiții, din sistemul de ecuații (1.22) se obține:

$$\frac{\vartheta_1(2t_1)}{\vartheta_1(t_1)} = \frac{1 - e^{-2t_1/T}}{1 - e^{-t_1/T}} = 1 + e^{-\frac{t_1}{T}} \quad (1.23)$$

de unde rezultă:

$$T = -\frac{t_1}{\ln\left[\frac{\vartheta_1(2t_1)}{\vartheta_1(t_1)} - 1\right]} \text{ [s]} \quad (1.24)$$

Transmisivitatea termică globală α_t se calculează, pentru $J = J_1$, din relația (1.32); valorile parametrilor termofizici de material sunt date în Anexa nr.1.

1.4.4. Înregistrarea supratemperaturii de regim tranzitoriu pentru $J \geq J_{cr}$

Cu ajutorul relație (1.33) se calculează valoarea densității de curent critice, J_{cr} . Procedând ca la § 4.1, se trasează curbele de regim tranzitoriu $\vartheta_2(t)$, $\vartheta_3(t)$, pentru curenții I_2 , I_3 , corespunzător densităților de curent $J_2 = J_{cr}$ și $J_3 = 0,5 \cdot J_{cr}$, considerând de fiecare dată condițiile inițiale nule $\vartheta_0 = 0$; pentru realizarea condițiilor inițiale nule, se răcește forțat calea de curent până se obține $\vartheta(0)=0$ (adică până când calea de curent tubulară atinge temperatura mediului ambiant).

1.4.5. Verificarea experimentală a unor puncte de pe caracteristica timp-curent

Cu valorile precizate de conducătorul lucrării pentru parametrii k_p , θ_{ad} , θ_a se calculează, utilizând relația (1.14), intensitatea I_{ad} a curentului admisibil. Se determină apoi, cu relația (1.16), curenții I_1^* , I_2^* , I_3^* , dând pe rând intensitățile I_{sc} valorile I_1 , I_2 , I_3 de la § 4.1, § 4.3. Deoarece înregistrările s-au făcut pentru $\vartheta_0 = 0$, cu relația (1.21) în care se consideră $\eta = 0$, se calculează duratele admisibile τ_1 , τ_2 , τ_3 , corespunzătoare respectiv curenților I_1^* , I_2^* , I_3^* . Se verifică pe înregistrările $\vartheta_1(t)$, $\vartheta_2(t)$, $\vartheta_3(t)$ valorile duratelor τ_1 , τ_2 , τ_3 . Rezultatele obținute se trec în tabelul 1.2

Tabelul 1.2.

$\theta_{ad} = 60 \text{ [}^\circ\text{C]}$ $\theta_a = \dots\dots\dots \text{ [}^\circ\text{C]}$ $I_{ad} = \dots\dots\dots \text{ [A]}$	I [A]				
	I*				
	τ [s]	Calculat			
		Măsurat			

1.5. Conținutul lucrării

- 1) Schema electrică a montajului utilizat pentru încercările experimentale;
- 2) Prezentate tabelat, valorile dimensiunilor măsurate ale secțiunii transversale a căii de curent și valorile calculate ale parametrilor s , l_p ;
- 3) Graficul de determinare a temperaturii de regim permanent, trasat pe hârtie milimetrică;
- 4) Înregistrările regimurilor tranzitorii de variație a temperaturii de la § 4.1, § 4.3;
- 5) Rezultatele obținute la § 4.2, 4.5 și tabelele de date completate;
- 6) Observații și concluzii.

1.6. Bibliografie

- /1/ Baraboi A., Echipamente electrice, curs. Universitatea tehnică "Gh. Asachi", Iași, p-51-55, 65-69, 79-81.
- /2/ Gheorghiu Ioan, Popa Sorin Eugen, Puiu-Berizintu Mihai, "Echipamente electrice pentru centrale, stații și posturi de transformare", Ed. Tehnica-Info Chișinău, 2003.

2. ANEXA 1.

Parametrii termo-fizici ai cuprului:

$\alpha_R = 4,3 \cdot 10^{-3} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura;
$c = 390 [\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}]$	căldura specifică;
$\gamma = 8890 [\text{kg/m}^3]$	densitatea cuprului;
$\theta_{\text{Cu}} = 1083 [^{\circ}\text{C}]$	temperatura de topire a cuprului;
$\rho_o = 1,6 \cdot 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$	rezistivitatea la 0°C .
$D_{\text{ext}} = 6 \cdot 10^{-36} [\text{m}]$	diametrul exterior al conductorului;
$D_{\text{int}} = 4 \cdot 10^{-36} [\text{m}]$	diametrul interior al conductorului;
$\theta_{\text{ad}} = 60 [^{\circ}\text{C}]$	temperatura admisibilă a căii de curent în regim de lungă durată;
$\theta_{\text{kad}} = 200 [^{\circ}\text{C}]$	temperatura admisibilă a căii de curent în regim scurtcircuit;
$H_{\text{Cu}} = 70 [\text{kgf/mm}^2]$	duritatea cuprului.