

CUPTOARE ELECTRICE CU REZISTOARE

6.1 Probleme generale

Cuptoarele cu rezistoare sunt dispozitive de utilizare care transformă, prin efect Joule-Lenz, energia electrică în energie termică. Dacă această conversie se realizează prin intermediul *rezistoarelor* sau *încălzitoarelor* (elemente specializate de circuit) atunci avem un *cuptor electric cu rezistoare cu încălzire indirectă*. În cazul în care piesa de încălzit, numită și *încărcătura* sau *șarja*, joacă rol de rezistor, cuptorul electric este de tipul *cu rezistoare cu încălzire directă*.

Cuptoarele electrice cu rezistoare cu încălzire indirectă se recomandă pentru tratament termic, încălzire în vederea deformării la cald sau la topirea metalelor și aliajelor ușor fuzibile. Temperatura θ_c din *incinta* sau *camera de lucru* a cuptorului poate fi joasă ($\theta_c < 350^\circ\text{C}$), medie ($\theta_c = 350 \dots 1000^\circ\text{C}$) sau înaltă ($\theta_c > 1000^\circ\text{C}$) și, în funcție de acesta, se aleg materialele de construcție ale cuptorului.

Regimul de lucru al acestor cuptoare poate fi:

- o *intermitent* sau *periodic*, când un ciclu complet de funcționare cuprinde încărcarea, încălzirea, menținerea, răcirea și descărcarea materialelor din cuptor;
- o *continuu* când piesele ce se încălzesc se deplasează permanent sau periodic de la capătul de încărcare spre cel de descărcare.

Din punct de vedere constructiv deosebim cuptoare *tip cameră* ce sunt cu funcționare intermitentă și cuptoare *tip tunel* ce sunt cu funcționare continuă.

6.2 Construcția cuptoarelor electrice cu rezistoare

Din punct de vedere constructiv, un cuptor electric industrial cu rezistoare cu încălzire indirectă (tip cameră) are următoarele elemente principale (fig.6.1):

- *carcasa cuptorului* asigură rezistența mecanică a construcției și este realizată din tablă de oțel rigidizată cu profile din același material. La cuptoarele de joasă temperatură există o carcasă exterioară și una interioară, îmbinate prin elemente elastice, izolate termic, care permit dilatări diferite a celor două structuri.

- *căptușeala cuptorului* se execută din unul sau mai multe straturi de materiale termoizolante și refractare. Ea influențează direct: pierderile termice, timpul de încălzire, calitatea procesului tehnologic, cotele de gabarit, fiabilitatea instalației etc.

La cuptoarele de joasă temperatură căptușeala este constituită dintr-un singur strat de material termoizolant dispus între cele două carcase. La cuptoarele de medie și înaltă temperatură, căptușeala are 1..2 straturi din material refractar și două sau mai multe straturi de izolație termică.

Partea superioară a cuptorului se închide prin bolți plane sau arcuite,

materialele utilizate fiind sub formă de plăci, cărămizi tip pană sau piese fasonate.

- *ușa cuptorului*, la joasă temperatură se confecționează dintr-un singur dtrt termoizolant dispus între două plăci metalice turnate, iar pentru temperaturi medii și înalte se prevede un strat refractar de 1..2 straturi termoizolante. Acționarea ușii este mecanizată la cuptoarele de capacitate medie și mare, iar la cele de capacitate mică se face manual.

- *rezistoarele* sau *elementele încălzitoare* se confecționează din materiale

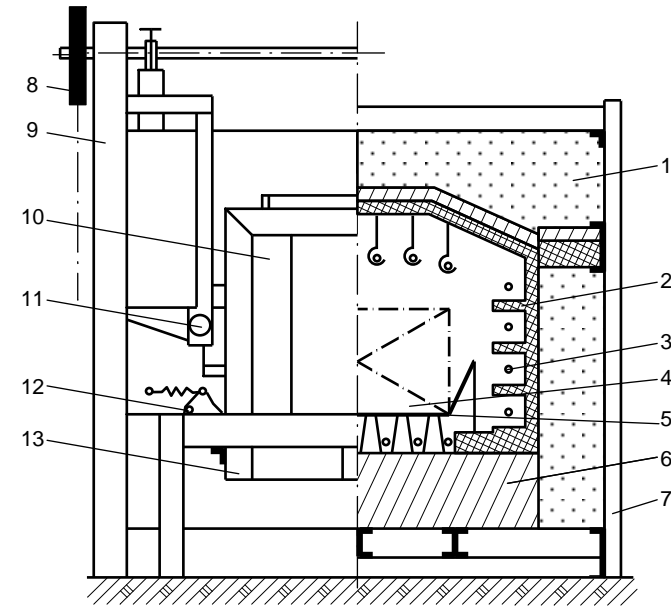


Fig.6.1 Cuptor electric cu rezistoare cu încălzire indirectă,
 1 - izolație termică, 2 - material refractar, 3 - rezistor, 4 - piesă, 5 - placă vatră, 6 - beton refractar,
 7 - carcasă, 8 - mecanism acționare ușă, 9 - carcasă contragreutate ușă, 10 - ușă lucru, 11 - dispozitiv
 prindere ușă, 12 - dispozitiv blocare ușă, 13 - suport ușă

conductive cu rezistivitate electrică mare și coeficient redus de variație a rezistivității cu temperatura, fiind sub formă de sârme sau benzi. Amplasarea rezistoarelor în camera cuptorului (fig.6.2) se face pe pereții laterali, pe boltă, sub vatră etc., elementele de susținere fiind tuburi ceramice, cărămizi fasonate, cârlige și bolțuri din materiale refractare.

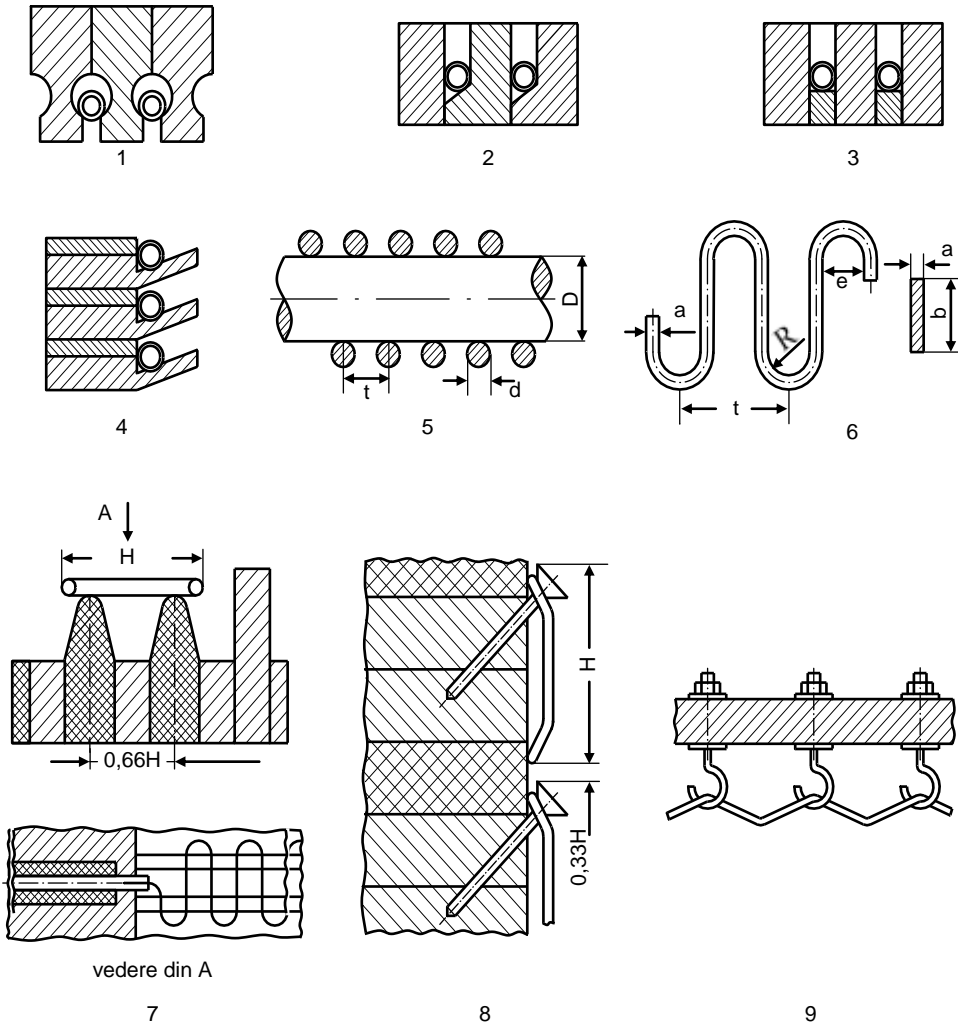


Fig.6.2 Amplasarea rezistoarelor în camera cuptorului.

a) *dispunerea rezistoarelor spiralate din sârmă*: 1 – pe boltă; 2, 3 – sub vatră; 4 – pe pereții laterali; 5 – pe tub ceramic; d – diametrul sârmei, t – pasul spiralei, D – diametrul tubului ceramic;

b) *dispunerea rezistoarelor în zigzag*: 6 – zigzag din sârmă sau bandă; 7 – încălzitor montat sub vatră; 8 – încălzitor din sârmă în zigzag montat pe peretele lateral; 9 – încălzitor din bandă în zigzag montat pe boltă; a – grosimea materialului, t – pasul zigzagului, R – raza curbă, H – înălțimea zigzagului, e – distanța dintre două spire.

- dispozitivele rezistente la temperaturi înalte (șine de rulare, ghidaje, plăci de vatră etc.) sunt din oțel refractar și au rolul de a susține sau a permite deplasarea

încărcăturii în camera de lucru.

Încălzitoarele din sârmă se confecționează sub formă de spirale sau de zigzag, iar cele din bandă numai de zigzag. Referitor la dimensiunile spiralei, acestea se aleg astfel încât să asigure o rigiditate mecanică suficientă, iar ecranarea să fie cât mai redusă.

Diametrul D al tubului ceramic (fig.6.2–5), pe care se dispune spirala, se alege din considerente de rezistență mecanică a materialului. Pentru a diminua ecranarea încălzitoarelor de către căptușeala cuptorului, rezistoarele de sârmă în zigzag montate pe pereții laterali (fig.6.2–8) se fac profilate, iar cele dispuse sub vatră (fig.6.2-7) sau boltă (fig.6.2-9) se distanțează de zidăria refractară prin suporturi speciali sau cârlige de oțel.

6.3 Schimbul de căldură

Căldura este forma de energie generată de agitația termică a particulelor ce compun materia, iar schimbul de căldură într-un sistem de corpuri sau între elementele aceluiași corp este guvernat de principiile I și II ale termodinamicii.

Mulțimea valorilor instantanee ale temperaturii din spațiul cercetat formează un *câmp de temperatură* θ , variabil sau nu în timp. Dacă $\theta = f(x,y,z,t)$ câmpul de temperatură este *nestaționar* (variabil), iar dacă $\theta = f(x,y,z)$ câmpul de temperatură este *staționar* (permanent).

Locul geometric al punctelor care au aceeași temperatură la un moment dat poartă numele de *suprafață izotermă*, ce are poziții fixe sau nu în spațiu.

Procesul de propagare al căldurii este un fenomen complex și clasificarea sa în moduri mai simple de realizare (conducție, convecție, radiație) are drept scop facilitarea calculelor, dar fără a neglija procesul în toată amploarea sa. În cazul cuptoarelor electrice cu rezistoare, schimbul de căldură prin zidăria cuptorului are loc, în special, prin conducție termică.

Conducția termică se caracterizează prin transportul direct al căldurii între două suprafețe izoterme ale aceluiași corp sau între două corpuri în contact nemijlocit, ca urmare a unei diferențe de temperatură. Fluxul termic transmis prin

conducție termică este dat de relația: $\Phi_{cond} = \frac{\Delta\theta}{R_{\theta}}$, unde $\Delta\theta$ este diferența

temperaturilor, iar R_{θ} este rezistența termică de conducție între suprafețele considerate.

Convecția termică reprezintă procesul de transmitere a căldurii la suprafața unui solid spălat de un lichid sau un gaz, dacă între mediul solid și cel fluid există o diferență de temperatură. Fluxul termic transmis prin convecție termică este dat de

relația: $\Phi_{conv} = \frac{\Delta\theta}{R_{\theta}}$, unde $\Delta\theta$ este diferența temperaturilor, iar $R_{\theta} = \frac{1}{\alpha_c \cdot A}$ este

rezistența termică de convecție, unde α_c este coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție, iar A este suprafața de cedare a căldurii.

Radiația termică reprezintă transmiterea căldurii între două corpuri solide prin radiații electromagnetice cu lungimi de undă între 0,4μm și 1mm. Fluxul termic transmis prin radiație termică este dat de relația:

$$\Phi_{rad} = C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot A_{12}, \text{ unde } C_{12} \text{ este coeficientul redus de}$$

radiație, T_1 și T_2 temperaturile (în grade Kelvin) ale suprafețelor celor două corpuri, iar A_{12} – suprafața de calcul a radiației transmise.

6.4 Determinarea pierderilor de căldură în regim staționar

Bilanțul termoenergetic al unui cuptor electric cu rezistoare cu încălzire indirectă se face pentru regimul staționar, când energia absorbită din rețea este cedată în totalitate mediului ambiant, sub formă de pierderi termice.

La cuptoarele de temperaturi joase sau medii acest proces se realizează prin conducție și convecție termică.

În cazul unui perete plan paralel (fig.6.3-a) din material omogen și izotrop, a cărui fețe delimitative sunt finite și au temperaturile constante θ_1 și θ_2 , cu $\theta_1 > \theta_2$,

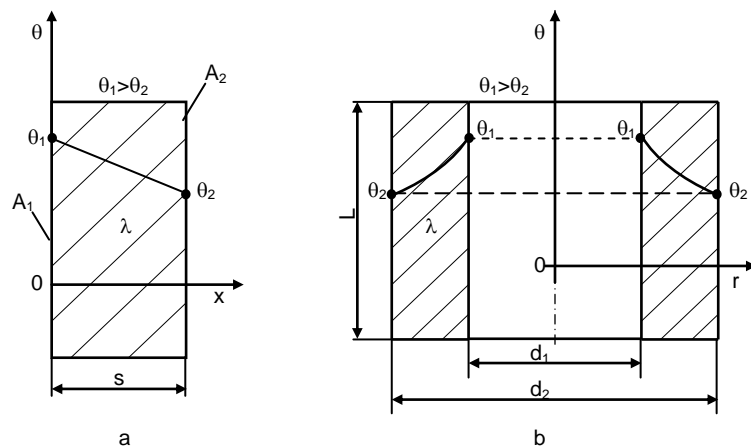


Fig.6.3 Explicativă la conducția termică
a – perete plan paralel, b – perete cilindric

fluxul termic de pierderi prin conducție termică va fi:

$$\Phi_{pp} = \frac{\lambda(\theta_1 - \theta_2)A_c}{s} \quad [W]$$

cu: λ - coeficientul de conductivitate termică al materialului peretelui, θ_1, θ_2 - temperatura suprafeței interioare A_1 și exterioare A_2 a peretelui, [grd];
 s – grosimea peretelui, [m]; A_c – suprafața de calcul a peretelui, [m²]

$A_c = 0.5(A_1 + A_2)$, dacă $A_1/A_2 < 2$ sau $A_c = \sqrt{A_1 A_2}$, dacă $A_2/A_1 \geq 2$.

În cazul unui perete cilindric (fig.6.3-b), din material omogen și izotrop, de lungime L și diametre d_1 și d_2 (interior și exterior), fluxul termic de pierderi prin conducție termică va fi:

$$\Phi_{pc} = \frac{2\pi\lambda(\theta_1 - \theta_2)L}{\ln(d_2/d_1)} \quad [W]$$

În cazul pereților multistrat, din materiale omogene și izotrope, de formă plană (indice p) sau cilindrică (indice c), fluxurile termice de pierderi prin conducție sunt:

$$\Phi_{pp} = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} \frac{1}{A_{cj}}} \quad [W] \quad \Phi_{pc} = \frac{2\pi\lambda(\theta_1 - \theta_{n+1})L}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j}} \quad [W]$$

cu: $A_{cj} = 0.5(A_j + A_{j+1})$ sau $A_{cj} = \sqrt{A_j A_{j+1}}$, arii de calcul [m²];

θ_{n+1} - temperatura pe ultima față delimitativă a peretelui [grd].

La determinarea fluxurilor termice de pierderi prin conducție termică, se consideră o variație liniară cu temperatura a conductivității termice a materialului, conform relației:

$$\lambda_j = a_j + b_j \theta_{mj}$$

cu: $\theta_{mj} = 0.5(\theta_j + \theta_{j+1})$ - temperatura medie aritmetică a stratului considerat, [grd], iar a_j și b_j sunt coeficienții de material (dați în tabele).

Fluxul termic de pierderi prin convecție termică între peretele exterior al cuptorului și mediul ambiant (figura 6.4) este dat de relația:

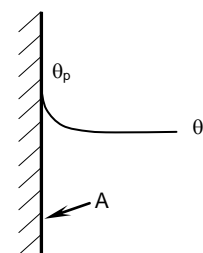


Fig.6.4 Explicativă la convecția termică
 θ_p – temperatură perete,
 θ_a – temperatură mediu ambiant

$$\Phi_{cp} = \frac{\theta_p - \theta_a}{R_\theta}, \text{ unde } R_\theta = \frac{1}{\alpha_c \cdot A} \quad (\alpha_c \text{ este}$$

coeficientul de transmitere prin convecție, iar A este suprafața de cedare a căldurii).

Fluxul termic de pierderi transmis prin suprafața A a unui strat de fluid de grosime s și temperaturile θ_1 , respectiv θ_2 , pe suprafețele ce

delimitează stratul, este: $\Phi_{cpp} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{s}{\lambda^*} \frac{1}{A}}$, unde λ^*

este conductivitatea fluidului majorată datorită convecției termice, iar $\lambda^* = \chi \cdot \lambda_a$, unde χ – este un coeficient de majorare, iar λ_a - conductivitatea termică a aerului, considerată la temperatura medie $\theta_m = (\theta_p + \theta_a)/2$.

6.5 Regimul tranzitoriu termic al cuptorului electric cu rezistoare

Ecuția de bilanț termic a unui cuptor electric cu rezistoare cu încălzire indirectă reflectă legea conservării energiei care este de forma:

$$dQ = dQ_u + dQ_p$$

cu: $dQ = Pdt$ - energia termică dezvoltată prin efect Joule –Lenz în elementele încălzitoare, [J];

P - puterea absorbită de cuptor din rețea, [W];

$dQ_u = mcd\theta$ - căldura utilă necesară încălzirii materialului, [J];

m - masa piesei, [kg];

c - căldura specifică a materialului, [J/kg.grd];

$dQ_p = \alpha(\theta - \theta_a)Adt$ - pierderi termice prin convecție și radiație ce au loc între mantaua cuptorului și mediul ambiant, [J];

α - coeficient de schimb de căldură prin convecție și radiație, [W/m²grad];

A - suprafața de schimb de căldură cuptor-mediul ambiant, [m²];

θ, θ_a - temperatura curenta din camera cuptorului, respectiv temperatura mediului ambiant, [grad].

Cu notațiile: $K = mc$, [J/grad]; $L = \alpha A$, [w/grad]; $T_i = K/L$, [s], obținem:

$$\frac{P}{L} = T_i \frac{d\theta}{dt} + (\theta - \theta_a)$$

La limită, în regim staționar, când $d\theta/dt = 0$, $\theta = \theta_{max}$ rezultă $P/L = \theta_{max} - \theta_a$ și:

$$\frac{d\theta}{\theta_{max} - \theta} = \frac{dt}{T_i} \Rightarrow T_i \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_{max}$$

Soluția ecuației diferențiale reprezintă *curba de încălzire a cuptorului*:

$$\theta = \theta_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}\right) + \theta_a e^{-\frac{t}{T_i}} \quad [\text{grad}]$$

unde: θ - temperatura din camera cuptorului în faza de încălzire,
 T_i - constanta de timp a regimului de încălzire.

Dacă instalația se deconectează de la rețea după atingerea regimului staționar, atunci ecuația de echilibru termic devine, în condiția $P = 0$:

$$T_r \frac{d\theta}{dt} + \theta - \theta_a = 0$$

Soluția acestei ecuații diferențiale reprezintă *curba de răcire a cuptorului*:

$$\theta = (\theta_i - \theta_a) \cdot e^{-\frac{t}{T_r}} + \theta_a \quad [\text{grad}]$$

cu: θ_i - temperatura inițială, T_r - constanta de timp a regimului de răcire.

Relațiile de mai sus permit determinarea *constantelor de timp* T_i și T_r ale cuptorului, ce reprezintă duratele procesului tranzitoriu ideal, în ipoteza că nu au loc

pierderi de energie în mediul înconjurător. Geometric, fiecare constantă de timp este dată de subtangenta la origine a curbei ce descrie procesul tranzitoriu considerat.

Experimental, constanta de timp T_r se determină din curba de răcire, prin cronometrarea timpului t_r după care temperatura din camera de lucru a cuptorului scade de la valoarea θ_{r1} la valoarea θ_{r2} , adică :

$$\theta_{r2} = (\theta_{r1} - \theta_a) \cdot e^{-\frac{t_r}{T_r}} + \theta_a \quad [\text{grad}]$$

de unde rezultă că:

$$T_r = \frac{t_r^*}{\ln(\theta_{r1} - \theta_a) - \ln(\theta_{r2} - \theta_a)} \quad [\text{s}]$$

Asemănător, cunoscând θ_{max} , se poate determina și T_i , folosind curba de încălzire.

6.6 Dimensionarea rezistoarelor cuptorului

Dimensionarea rezistoarelor urmărește stabilirea parametrilor secțiunii transversale s - aria secțiunii transversale a încălzitorului, [m²] și ai lungimii încălzitorului - L [m]. Calculele se conduc în ipoteza că puterea dezvoltată de rezistor prin efect Joule-Lenz se transmite integral, prin radiație, piesei și căptușelii, adică:

$$P_f = \frac{U_f^2}{R} = \frac{s}{L} \frac{U_f^2}{\rho} \quad - \text{ecuația de echilibru electric} \quad [\text{W}]$$

$$P_f = P_s A \quad - \text{ecuația de echilibru termic} \quad [\text{W}]$$

Necunoscutele sistemului - s și L - se determină efectuând produsul celor două relații și în final obținem:

- pentru rezistor de secțiune transversala circulară:

$$d = 3 \sqrt{\frac{4\rho \cdot P_f^2}{\pi^2 U_f^2 P_s}} \quad [\text{m}]; \quad L = 3 \sqrt{\frac{U_f^2 P_f}{4\pi\rho P_s^2}} \quad [\text{m}]$$

- pentru rezistor de secțiune transversală dreptunghiulară:

$$b = 3 \sqrt{\frac{\rho P_f^2}{2m(m+1)U_f^2 P_s}} \quad [\text{m}]; \quad L = 3 \sqrt{\frac{mU_f^2 P_f}{4(m+1)^2 \rho P_s^2}} \quad [\text{m}];$$

unde: $P_f \leq 20000$ W - puterea pe fază a încălzitorului;

$U_f \leq 500$ V - tensiunea de alimentare a rezistorului;

ρ - rezistivitatea materialului încălzitorului la temperatura de lucru, [Ω];

L - lungimea pe fază a încălzitorului, [m];

s - aria secțiunii transversale a încălzitorului, [m²];

$s = \pi d^2/4$ - rezistoare circulare; $s = a \cdot b = mb^2$ - rezistoare dreptunghiulare,

d – diametrul rezistorului, $m=a/b=5\dots 12$ raportul dintre lungimea a și lățimea b a laturilor dreptunghiului ce constituie secțiunea transversală;

A - suprafața laterală a încălzitorului, $[m^2]$; $A = \pi \cdot d \cdot L$ - rezistor circular;

$A = 2(a+b)L = 2b(m+1)L$ - rezistor dreptunghiular;

$P_s = \varepsilon_r \alpha_{ef} \sigma (T_r^4 - T_p^4)$ - puterea specifică admisibilă a încălzitorului, $[W/m^2]$

ε_r - grad redus de înnegrire;

α_{ef} - coeficient de eficiență a radiației încălzitorului;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – constanta Stefan-Boltzmann;

θ_r, θ_p - temperaturile de lucru ale rezistorului și piesei, $[^\circ C]$;

La calculul puterii specifice P_s , valorile $\varepsilon_r, \alpha_{ef}$ se extrag din anexă, în funcție de natura materialului piesei și tipul constructiv al rezistorului.

$\theta_r = \theta_p + (50\dots 150)$ și se alege un material a cărei temperatură de lucru admisibilă (recomandată de producător) satisface la $\theta_{ad} \approx (1,02\dots 1,1)\theta_r$.

$T_r = \theta_r + 273$; $T_p = \theta_p + 273$ - temperaturile absolute ale încălzitorului și piesei, $[K]$.

6.7 Reglarea regimului termic la cuptoarele cu rezistoare

Temperatura din interiorul unui cuptor cu rezistoare poate fi reglată manual sau automat. Reducerea consumului specific de energie electrică se face prin reglarea automată a temperaturii cuptoarelor electrice, reglare care pune în concordanță puterea absorbită de cuptorul electric cu regimul necesar de temperatură. Reglarea automată a temperaturii se poate efectua sub forma celor trei metode de reglare: continuă, semicontinuă și discontinuă.

Reglarea continuă este în comparație cu reglările discontinue mai complexă și scumpă, fiind utilizată din acest motiv mai rar.

Reglarea discontinuă este cea mai simplă și ieftină dintre toate metodele de reglare a temperaturii, asigurând o precizie relativă de 1...3%. Ea se folosește practic la peste 90% din cuptoarele electrice, în majoritatea cazurilor sub forma reglării bipoziționale. Cea mai simplă și uzuală metodă de reglare bipozițională a temperaturii constă în modificarea în două trepte a puterii cuptorului prin cuplarea și decuplarea alternativă de la rețea a elementelor încălzitoare.

Variațiile temperaturii și puterii la reglarea bipozițională sunt redate în fig.6.4. În figură a fost considerat timpul mort al cuptorului t_{mc} (timpul în care nu este sesizată o modificare a temperaturii, deși curentul prin elementele încălzitoare s-a modificat).

În lipsa reglării temperatura are tendința de a evolua spre temperatura de regim staționar ϑ_{max} – care se obține după circa $(4\dots 5)T$, unde T este constanta de timp a regimului de încălzire. Cu linie punctată în fig. 6.5 este prezentată această evoluție. Constanta de timp se poate determina grafic ducând tangenta la curba de încălzire care va intersecta dreapta de regim staționar ϑ_{max} .

În cazul reglării bipoziționale, atât timp cât ϑ (temperatura sesizată de traductorul de temperatură) este sub valoarea temperaturii prescrise ϑ_p , regulatorul va comanda alimentarea elementelor încălzitoare ale cuptorului. La depășirea temperaturii prescrise ϑ_p , la timpul t_1 , regulatorul comandă întreruperea alimentării. Datorită inerției termice a cuptorului, temperatura mai crește până la temperatura ϑ_s , după care începe să scadă.

La timpul t_2 , la scăderea temperaturii sub valoarea ϑ_p , regulatorul comandă din nou alimentarea elementelor încălzitoare. Tot datorită inerției termice a cuptorului, temperatura va scădea până la valoarea ϑ_j , după care va crește din nou. Procesul se reia ciclic, astfel încât temperatura în incinta cuptorului evoluează între ϑ_j și ϑ_s .

Puterea absorbită din rețeaua electrică evoluează ciclic (durata ciclului – t_c) între două valori: puterea nominală (pe durata t_i) și zero (pe durata t_r), iar puterea medie devine:

$$P_{cmed} = \frac{P_{cnom} \cdot t_i}{t_c}$$

În cazuri practice, regulatorul bipozițional are o zonă de insensibilitate (regulator cu histerzis), iar traductorul de temperatură prezintă o constantă proprie de timp – T_{em} , dependentă de construcția, masa și natura materialelor componente.

În această situație, variația temperaturii și a puterii cuptorului, în cazul reglării bipoziționale, se prezintă în figura 6.6 (linie continuă - 1 - temperatura în incinta cuptorului; linie întreruptă - 2 - temperatura sesizată de traductorul de temperatură).

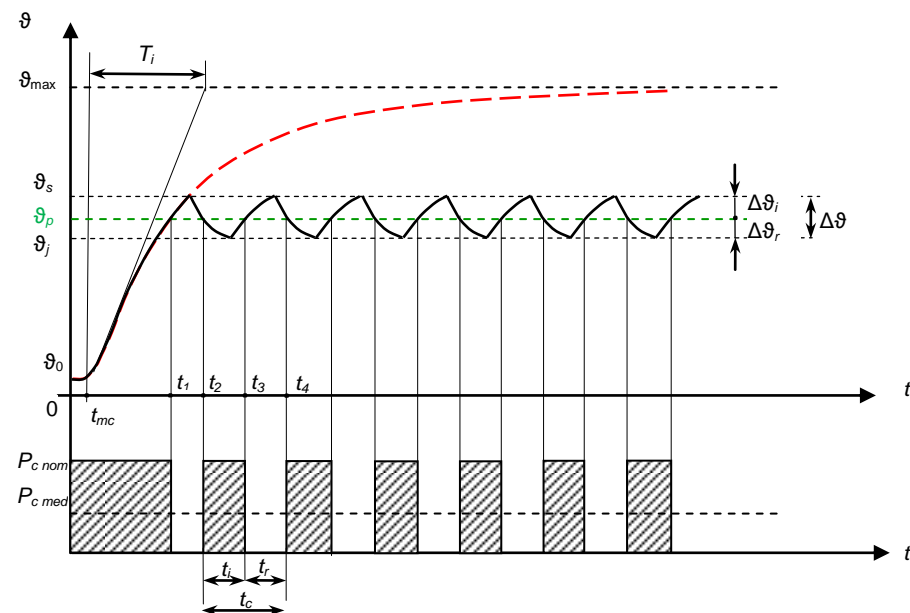


Fig.6.5 Variația temperaturii și a puterii la reglarea bipozițională

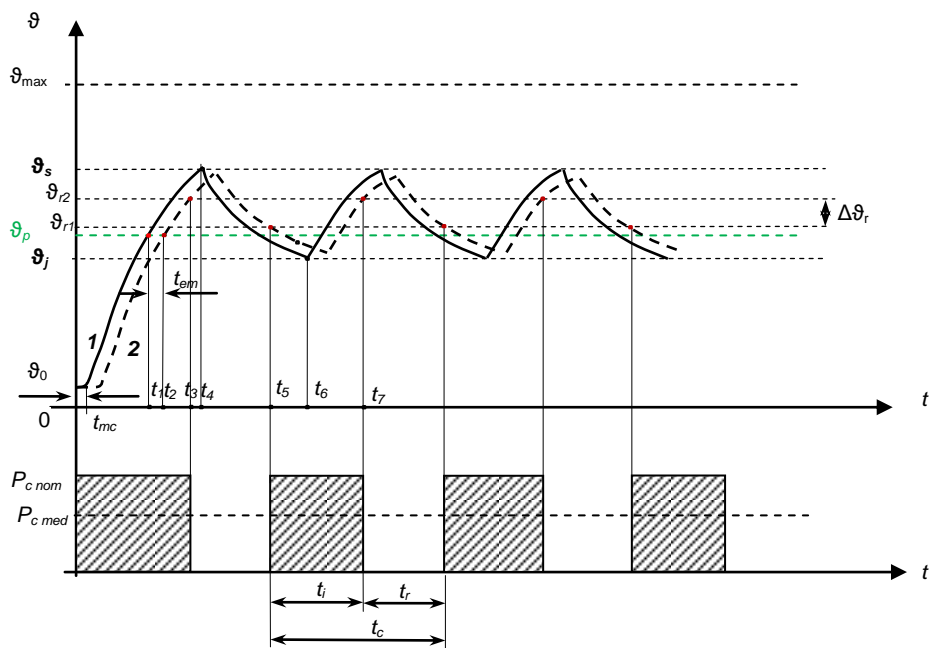


Fig.6.6 Variația temperaturii și a puterii, folosind regulator bipozițional cu histerezis și traductor cu constantă de timp nenulă

Regulatorul bipozițional cu histerezis prezintă o fereastră de insensibilitate de lățime $\Delta\vartheta_r$ (între ϑ_{r1} și ϑ_{r2}), care poate fi în jurul sau în afara temperaturii prescrise.

Temperatura prescrisă ϑ_p este atinsă la momentul t_1 , dar traductorul o sesizează abia la momentul t_2 , datorită constantei proprii de timp. Regulatorul va interveni abia la momentul t_3 (la atingerea temperaturii ϑ_{p2}), când comandă deconectarea elementelor încălzitoare. Datorită inerției termice temperatura cuptorului urcă până în momentul t_4 , după care descrește. Traductorul urmărește această variație cu întârziere.

Reconectarea elementelor încălzitoare se face la momentul t_5 (la atingerea temperaturii ϑ_{p2}). Inerția termică a cuptorului conduce la scăderea temperaturii până în momentul t_6 , după care fenomenele se reiau (la momentul t_7 se comandă deconectarea, etc.).

6.8 Descrierea instalației din laborator

Standul de laborator folosește un cuptor cu rezistoare (fig.6.7) având puterea nominală $P=600W$, alimentat la tensiunea monofazată a rețelei 230V.

Cuptorul are în componență două elemente încălzitoare, fiecare de 300W, conectate în paralel. Elementele încălzitoare sunt realizate din fir Cr20-Ni80, cu diametrul de 0,26 mm, dispus sub forma de zig-zag între plăci de mică. Capetele

elementelor încălzitoare sunt izolate electric prin mărgelile din ceramică. În fig. 6.8 este prezentată imaginea unui element încălzitor. Cele două plăci cu elementele încălzitoare și cu izolația de mică sunt montate presat în exteriorul peretelui cuvei cuptorului, în partea superioară, respectiv în partea inferioară.

Izolația termică este constituită din două straturi de materiale termoizolante. Stratul interior este realizat din carton din vată minerală de zgură de înaltă densitate, cu grosime de 5 mm. Peste acest strat s-a plasat un strat antiradiativ termic, din folie de aluminiu. Între carcasa exterioră, din tablă de oțel, și folia de aluminiu este plasat un strat termoizolant din vată de sticlă.

Instalația este dotată cu trei sisteme de măsură/control a temperaturii, folosind:

- Termorezistență din platină Pt100, care îndeplinește atât funcția de element de măsurare a temperaturii, cât și de traductor de temperatură într-un sistem de reglare automată. Termorezistența este realizată din fir din platină spiralat dispus în tub ceramic. Constanta de timp a acestui element este mică, estimată la 15 secunde.

- Termistor cu teacă metalică integrat într-un sistem de măsură cu afișaj numeric. Domeniul de măsură este $-50 \dots + 300 \text{ }^\circ\text{C}$, cu o precizie de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Constanta de timp a acestui element este extrem de mică, estimată la 3 secunde. Din acest motiv, se poate considera că folosind acest sistem de măsură în sisteme termice (sisteme lente) răspunsul obținut este instantaneu.

- Termometru cu mercur, precizie de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, domeniu de măsură $0 \dots + 300 \text{ }^\circ\text{C}$, având constanta de timp de timp de ordinul zecilor de secunde (datorită masei mari de mercur din bulbul termometrului).



Fig. 6.7 Panoul și imaginea generală a instalației



Fig. 6.8 Element încălzitor cu fir CrNi în zigzag dispus între plăci de mică

6.9 Schema electrică de alimentare a cuptorului

În figura 6.9 este prezentată schema electrică a instalației. Rolul ei de a realiza stabilizarea temperaturii pe principiul elementului bipozițional.

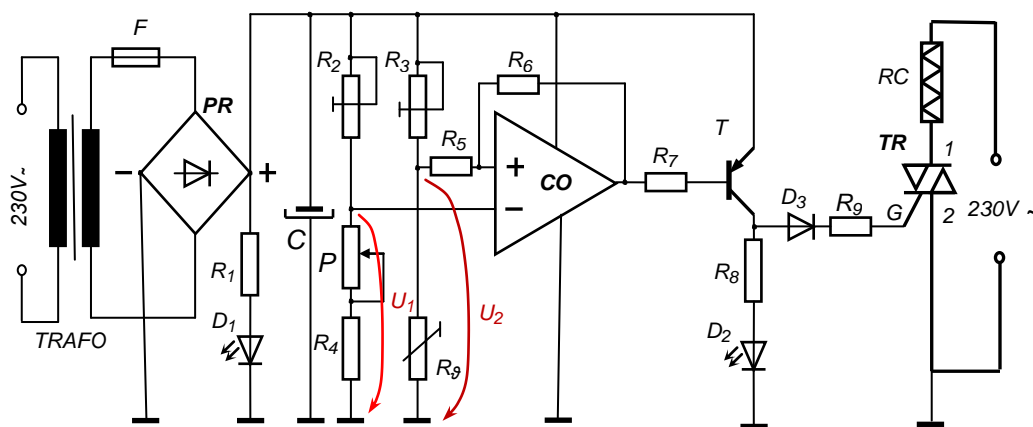


Fig 6.9 Schema electrică a instalației

Gruparea paralel a elementelor încălzitoare ale cuptorului este marcată prin rezistența de putere RC .

Elementul de execuție care realizează conectarea și deconectarea elementelor încălzitoare la tensiunea rețelei este triacul (TR).

Schema de comandă conține în principal o punte de măsură Wheatstone alimentată cu tensiune continuă de 15V. Această tensiune se obține de la un redresor realizat cu puntea redresoare (PR) - punte alimentată de la un transformator de mică putere ($TRAFO$).

Filtrarea tensiunii continue este realizată cu ajutorul condensatorului electrolitic C de $600\mu F$. Prezența tensiunii continue în schema de comandă este semnalizată prin LED-ul D_1 , cu lumină verde.

Pe unul din brațele punții de măsură este montat potențiometrul P cu rol de prescriere a temperaturii. Pe celălalt braț al punții este montat traductorul de temperatură R_9 - în acest caz termorezistența de platină Pt 100.

Cu aceste elemente s-au format două divizoare de tensiune folosind rezistențele R_2 și R_3 . Deoarece rezistența electrică R_9 la temperatura de $0^\circ C$ este de 100Ω , pentru a realiza o reglare convenabilă cu ajutorul potențiometrului P , pornind de la valoarea 0 a acestuia, s-a intercalat o rezistență R_4 în serie cu P , de valoare 100Ω .

Tensiunea U_1 de pe elementul de prescriere este aplicată bornei inversoare a unui comparator CO , realizat cu circuit integrat LM339.

Tensiunea U_2 la bornele traductorului de temperatură este aplicată intrării neinversoare a aceluiași comparator.

Dacă potențialul intrării inversoare (tensiunea U_1) este mai mare decât potențialul intrării neinversoare (tensiunea U_2), ieșirea comparatorului este la potențial scăzut, ceea ce determină intrarea în conducție a tranzistorului bipolar T , de tip pnp (tip BD140). Prin intrarea tranzistorului în conducție, circulă un curent de la plusul sursei spre poarta triacului. Acest curent, de cca $100mA$, este limitat de rezistența de putere R_9 .

Dioda D_3 , de tipul 1N4007, împiedică circulația inversă a unui curent de la electrodul 1 la G într-o semialternanță a tensiunii rețelei.

Situația $U_1 > U_2$ corespunde atunci când temperatura prescrisă este superioară celei din incinta cuptorului. Traductorul de tip termorezistență este plasat chiar în incinta cuptorului, de unde preia valoarea temperaturii.

Curentul prin poarta G a triacului determină intrarea triacului în conducție și circulația curentului prin elementul încălzitor RC .

Triacul, fiind element bidirecțional, permite circulația curentului pe ambele alternanțe ale tensiunii de alimentare.

Temperatura în cuptor crește, iar termorezistența își crește rezistența electrică proporțional cu această temperatură. Acest fapt conduce la creșterea tensiunii U_2 .

În momentul în care $U_1 = U_2$, ieșirea comparatorului trece brusc la potențial ridicat, de aproape 15V. Tranzistorul T se blochează, curentul electric prin poarta G se anulează, triacul TR se blochează, deci este blocată circulația curenților prin elementele încălzitoare.

Datorită inerției termice a cuptorului, temperatura mai crește câteva grade, după care urmează scăderea temperaturii până la valoarea prescrisă. În momentul când $U_1 < U_2$ ieșirea comparatorului trece la potențial scăzut, ceea ce determină

intrarea în conducție a tranzistorului T . Prin intrarea tranzistorului în conducție, circulă din nou un curent de la plusul sursei spre poarta triacului, comandându-l la conducție. Datorită inerției termice, temperatura mai scade câteva grade sub valoarea prescrisă, după care va crește din nou.

Pentru a vizualiza starea ieșirii lui CO , respectiv starea tranzistorului T (în conducție sau blocare), s-a montat LED-ul D_2 , cu lumină roșie și clipire.

Deoarece în situația $U_1 = U_2$ comparatorul are o indecizie în funcționare, accentuată de faptul că fenomenele termice sunt procese lent-variabile, au fost introduse două rezistențe R_5 și R_6 , care realizează o reacție pozitivă. Se crează astfel un comparator cu histerezis, tip trigger Schmitt. Lățimea ferestrei ciclului de histerezis depinde de raportul

$$\frac{R_5}{R_5 + R_6}.$$

Dacă raportul de mai sus este ridicat, variațiile temperaturii în jurul valorii prescrise sunt mari. Așadar, folosirea unui comparator cu histerezis nu este favorabilă dacă se dorește obținerea în incinta cuptorului a unei temperaturi cât mai staționare (foarte puțin variabilă față de temperatura prescrisă), dar este favorabilă pentru situația dorită ca această instalație să funcționeze pentru determinarea constantelor de timp a regimului de încălzire și de răcire.

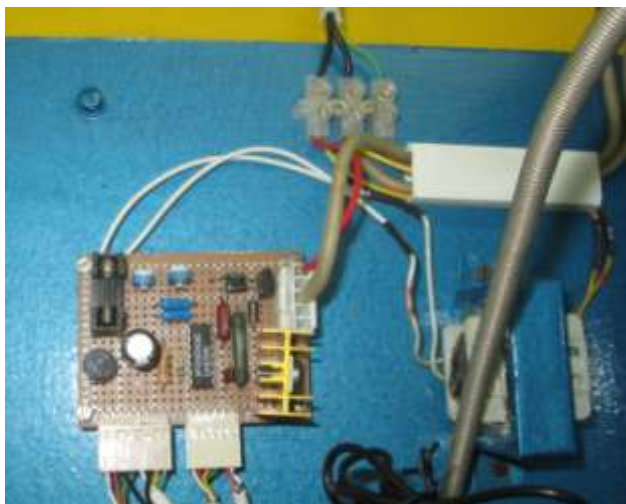


Fig. 6.10 Circuitul electronic al elementului bipozițional al instalației din laborator

Instalația fiind destinată unor viitoare lucrări practice cu studenții, a fost completată cu un panou care prezintă schema electrică. Realizarea acestui panou, din material plastic, s-a realizat prin tehnologia de tăiere și gravare cu fascicul laser. Pe acest panou au fost montate LED-urile pentru semnalizarea optică, potențiometrul de reglare P , afisajul numeric al temperaturii în incinta cuptorului, dar și un număr de 6 borne cu lăgături electrice în diferite puncte ale schemei, pentru măsurări sau oscilografieri de semnale.

6.10 Desfășurarea lucrării de laborator

În cadrul orelor de laborator, se vor rezolva următoarele probleme:

- Se vor identifica elementele constructive a trei variante de cuptoare electrice cu rezistoare din laborator. Se vor preciza: tipul elementelor încălzitoare, materialele de izolație termică, modul de transmitere a căldurii de la elementele încălzitoare la materialul de încălzit.

- Se dimensionează un rezistor la care se cunosc P_f , U_f , θ_p , natura materialului de încălzit, tipul constructiv de rezistor și forma secțiunii sale transversale. Caracteristicile de material necesare dimensionării sunt date în anexele 6.3 și 6.4.

- Pentru instalația experimentală din laborator se va determina lungimea firului rezistiv al fiecărui element încălzitor, știind că la alimentare cu tensiunea $U_f = 230V$, în regim staționar la temperatura $\theta_r = 900^\circ C$, dezvoltă o putere de 300W.

- Se evidențiază funcționarea instalației experimentale și se oscilografiază semnalele din punctele importante ale schemei electronice, atât la regimul de încălzire, cât și la cel de răcire.

- Se va analiza indicația temperaturii din incinta cuptorului, dată de fiecare dintre cele trei sisteme de măsură;

- Se trasează curba de evoluție a temperaturii și se determină constantele de timp T_i și T_r , cunoscând $\theta_{max} = 400^\circ C$;

- Se estimează pierderile de căldură prin conducție și convecție termică Φ_p , în regim staționar, cunoscând temperaturile pe suprafețele izoterme, și anume: θ_1 – temperatura peretelui cuvei cuptorului, realizat din tablă de oțel; θ_2 – temperatura dintre cele straturi termoizolante (a ecranului termic, din aluminiu); θ_3 – temperatura carcasei exterioare, realizată din tablă de oțel vopsită, θ_a – temperatura mediului ambiant. Izolația termică este de tip multistrat, cu primul strat realizat din vată de zgură (grosime 5 mm) și al doilea strat din vată de sticlă. Determinarea valorilor suprafețelor de calcul și a grosimilor stratului de vată de sticlă în diferitele zone ale cuptorului se va face după măsurarea cotelor cuptorului.

Se verifică atingerea regimului staționar prin egalitatea $\Phi_p \cong P_c$, în care P_c este puterea consumată de cuptor.

În anexele 6.1 și 6.2 se prezintă caracteristicile principalelor materiale refractare și termoizolante, iar în anexa 6.5 coeficientul de transmitere complexă a căldurii pentru perete metalic, în aer, la temperatura ambiantă de $20^\circ C$.

- Se consemnează concluziile ce se desprind din studiul efectuat.

Anexa 6.1

MATERIALE REFRACTARE (Prezentare selectivă)

Denumire material refractar	γ [Kg/m ³]	c [J/kg·grd]	$\lambda \cdot 10^{-3}$ [W/m·grd]	θ_{max} [°C]
Șamotă, cărămidă	1850	880+0.23· θ_m	700+0.640· θ_m	1350
Șamotă ușoară	1300	880+0.23· θ_m	500+0.165· θ_m	1250
Șamotă spongioasă	800	880+0.23· θ_m	290+0.232· θ_m	1350
Silică	1900	836+0.25· θ_m	930+0.697· θ_m	1650
Magnezită	2700	1046+0.29· θ_m	6160-2.67· θ_m	1700
Cărămidă de sticlă	1950	840+0.25· θ_m	930+7· θ_m	1700
Produse din zirconiu	3300	540+0.13· θ_m	1300+0.64· θ_m	1800
Produse din cărbune	1500	835	23200+34.8· θ_m	2000

Obs: θ_m - temperatura medie aritmetică în regim staționar;
 θ_{max} - temperatura maximă de utilizare a materialului refractar.

Anexa 6.2

MATERIALE TERMOIZOLANTE (Prezentare selectivă)

Denumire material termoizolant	γ [Kg/m ³]	λ 10 ⁻³ ·[W/m·grd]	θ_{max} [°C]
Diatomită arsă, praf	550	99+0.250· θ_m	1000
Cărămidă diatomită	600	145+0.314· θ_m	900
Vermiculită, plăci	250	81+0.232· θ_m	600
Azbovermiculită, plăci	250	76+0.163· θ_m	1100
Azbest, plăci	900	157+0.221· θ_m	500
Carton de azbest	900	160+0.170· θ_m	500
Azbest grafitat	180	70+0.310· θ_m	300
Vată de sticlă	280	37+0.256· θ_m	450
Vată minerală (de zgură)	300	60+0.157· θ_m	750
Fibră ceramică (FC 100)	100	80+0.200· θ_m	1200
Fibră ceramică (FC 400)	400	60+0.080· θ_m	1200
Sticlă termorezistentă	2400	20+0.029· θ_m	700

Obs: θ_m - temperatura medie aritmetică în regim staționar;
 θ_{max} - temperatura maximă de utilizare a materialului termoizolant.

Anexa 6.3

COEFICIENTUL DE EFICIENȚĂ A RADIAȚIEI ÎNCĂLZITORULUI (α_{ef})

Tipul constructiv de rezistor	Materialul pieselor încălzite		
	OL: $\epsilon_r = 0.8$	Cu: $\epsilon_r = 0.7$	Al: $\epsilon_r = 0.3$
Bandă în zigzag, liberă	0.46	0.47	0.54
Bandă în zigzag, în creștătură	0.44	0.45	0.50
Bandă în zigzag, pe suport	0.41	0.42	0.50
Sârmă în zigzag	0.60	0.62	0.68
Spirală de sârmă simplă, pe tuburi	0.46	0.47	0.50
Spirală de sârmă, în creștătură	0.31	0.32	0.35
Spirală de sârmă pe suport	0.39	0.40	0.47

Anexa 6.4

MATERIALE PENTRU ELEMENTE ÎNCĂLZITOARE

Denumire material rezistor	γ [kg/m ³]	$\rho_{20} \cdot 10^{-6}$ [Ω·m]	$\alpha_p \cdot 10^{-3}$ [grd ⁻¹]	θ_{ad} [°C]
Oțel	7860	0.12...0.15	7...10	500
Cromnichel (Cr15, Ni60, Fe25)	8300	1.1	0.1	1000
Cromnichel (Cr20, Ni80)	8400	1.1	0.11	1200
Kantal (Cr20, Al5, Fe75)	7200	1.30...1.45	0.06...0.09	1300
Grafit	1600	8...13	var.	2000

Obs: θ_{ad} - temperatura admisibilă de lucru a rezistorului.

Anexa 6.5

COEFICIENTUL DE TRANSMITERE COMPLEXĂ A CĂLDURII PENTRU PERETE EXTERIOR DIN TABLĂ VOPSITĂ DIN OȚEL, ÎN AER, LA TEMPERATURA 20°C

Temperatura peretelui (°C)	40	50	60	70	80	90	100
α (W/m ² K)	10,5	11,63	12,12	12,78	13,4	13,95	14,5