

CUPTOARE DE INDUCȚIE CU CREUZET

7.1 Probleme generale

Încălzirea prin inducție este o consecință a pătrunderii undelor electromagnetice în corpuri bune conductoare electric, plasate în câmpul magnetic variabil în timp al unei bobine numite *inductor*. Tensiunea indusă în piesa de rezistență ohmică redusă generează curenți intensi care, prin efect Joule-Lenz, vor ridica temperatura materialului, denumit generic *șarjă* sau *încărcătură*.

Această conversie energetică are următoarele avantaje: puterea maximă se degajă la suprafața materialului, în straturi a căror grosime depinde de frecvența de lucru și caracteristicile fizice ale șarjei; energia se transmite direct încălzirii, în absența pieselor de contact; productivitate ridicată; condiții de lucru bune sub aspect igienico-sanitar, etc. Dezavantajele încălzirii prin inducție sunt, în special, de natură tehnico-economică și anume: surse de alimentare de construcție specială; personal de întreținere și deservire calificat; factor de putere scăzut, etc.

Studiul pătrunderii undelor electromagnetice în conductoare masive se face pe baza legilor câmpului electromagnetic scrise sub formă vectorială. În cazul unui corp imobil, omogen și izotrop, bun conductor electric și plasat într-un câmp solenoidal fără surse interne de energie, ecuațiile lui Maxwell vor fi:

$$\begin{cases} \text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} & \text{- legea circuitului magnetic} \\ \text{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t & \text{- legea inducției electromagnetice} \\ \text{div}\mathbf{D} = 0 & \text{- forma locală a legii fluxului electric} \\ \text{div}\mathbf{B} = 0 & \text{- forma locală a legii fluxului magnetic} \end{cases}$$

la care se adaugă relațiile de material:

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad \mathbf{J} = \gamma\mathbf{E} = \mathbf{E}/\rho$$

cu: H - intensitatea câmpului magnetic, [A/m]; J - densitatea curentului de conducție, [A/m²]; E - intensitatea câmpului electric, [V/m]; B - inducția magnetică, [T]; D - inducția electrică, [C/m²]; ε - permitivitatea electrică, [F/m]; μ - permeabilitatea magnetică, [H/m]; γ - conductivitatea electrică, [S/m]; ρ - rezistivitatea electrică, [Ω·m].

Dacă se aplică operatorul rotor expresiei $\text{rot}\mathbf{H} = \gamma\mathbf{E}$, atunci rezultă $\text{rot}(\text{rot}\mathbf{H}) = \gamma \cdot \text{rot}\mathbf{E}$ ceea ce conduce la $\text{grad}(\text{div}\mathbf{H}) - \Delta\mathbf{H} = -\mu \cdot \gamma \cdot \partial\mathbf{H}/\partial t$ și, în final, se obține sistemul:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{H} = \mu\gamma\partial\mathbf{H}/\partial t \\ \text{rot}\mathbf{E} = -\mu\partial\mathbf{H}/\partial t \end{cases} \quad \text{sau} \quad \begin{cases} \Delta\mathbf{H} = \mu\gamma\partial\mathbf{H}/\partial t \\ \mathbf{E} = \rho\mathbf{J} = \rho \cdot \text{rot}\mathbf{H} \end{cases}$$

a cărei soluții precizează variația în timp și spațiu a mărimilor de stare locală ale câmpului electromagnetic.

Deoarece alimentarea instalațiilor de încălzire prin inducție se face de la surse de tensiune alternativă sinusoidală, în relațiile precedente se trece de la vectori la fazori și în complex simplificat vom avea că:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{H} = j\omega\mu\gamma\mathbf{H} \\ \mathbf{E} = \rho\mathbf{J} = \rho \cdot \text{rot}\mathbf{H} \end{cases} \quad \text{cu } \mathbf{H} = H e^{j\omega t} \quad \text{și} \quad H(t) = \sqrt{2} \text{Im}\{\mathbf{H}\} = \sqrt{2}H \sin \omega t$$

în care Δ este operatorul Laplace și $\omega = 2\pi f$ pulsația unghiulară.

Pătrunderea undelor electromagnetice în materiale este însoțită, în general, de scăderea intensității componentelor E și H . Viteza de scădere a intensității câmpului electromagnetic în profunzimea materialului se caracterizează prin *adâncimea de pătrundere* δ ce reprezintă acea distanță măsurată de la suprafața de separație a corpului de-a lungul căreia amplitudinea undei scade de $e=2,718$ ori:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad [\text{m}]$$

În această relație se operează cu valorile rezistivității ρ și permeabilității magnetice relative μ_r corespunzătoare temperaturii finale a șarjei.

Energia absorbită de piesă raportată la unitatea de suprafață și unitatea de timp poartă numele de vector radiant (Umov-Poynting, vector al densității fluxului de energie) $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$, care în complex simplificat este de forma:

$$\underline{S} = \frac{1}{2} [\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}^*] \quad [\text{VA/m}^2]$$

unde \mathbf{H}^* este mărimea complex conjugată a câmpului magnetic \mathbf{H} .

În cazul conductoarelor cilindrice pline infinit extinse, din materiale omogene și izotrope, excitate din exterior cu un câmp magnetic uniform cu o variație sinusoidală în timp, laplaceanul în coordonate cilindrice devine:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} = j\omega \mu \gamma \mathbf{H}$$

deoarece toate mărimile de stare locală ale câmpului electromagnetic sunt funcție de coordonata r și timpul t .

Prin rezolvarea acestei ecuații obținem următoarele valori ale mărimilor de stare locală la suprafața cilindrului (afectate de indicii zero):

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{H}_0 = \frac{N \cdot I}{h}; \quad \underline{E}_0 = \frac{\sqrt{2}}{\gamma \delta} \underline{H}_0; \quad \underline{J}_0 = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \underline{H}_0 \\ \underline{S}_0 = S_{a0} + jS_{r0} = \frac{1}{\gamma \delta} (K_R + jK_X) H_0^2 \end{array} \right.$$

cu: N – numărul de spire al bobinei inductoare; h – înălțimea inductorului, [m];
 I – curentul din inductor, [A]; K_R, K_X – funcții de corecție a căror valoare
 depinde de forma materialului și tipul excitației; S_{a0}, S_{r0} – puterea activă,
 respectiv reactivă absorbită de unitatea de suprafață, [W/m²] și [Var/m²].

De notat că peste 86% din puterea activă ce pătrunde în metal prin unitatea
 de suprafață se transformă în căldură de-a lungul adâncimii de pătrundere δ .

7.2 Construcția cuptoarelor de inducție cu creuzet

Principalele elemente constructive ale unui cuptor de inducție cu creuzet
 (sau fără miez de fier) sunt: carcasa, inductorul, creuzetul, conductoarele de
 alimentare (rețeaua scurtă) și mecanismele de lucru.

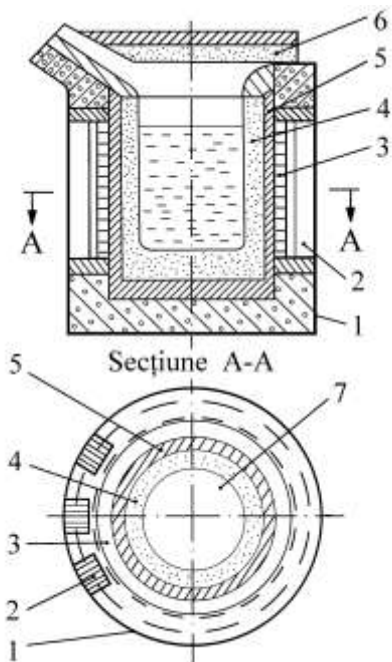


Fig. 7.1 Cuptor de inducție cu creuzet
 1- carcasă; 2- circuit magnetic; 3 – inductor;
 4 – creuzet; 5 –cilindru termoizolant;
 6 – capac; 7 – șarjă;

Carcasa 1 a cuptorului (fig.7.1) are rolul de a asigura rezistența mecanică a construcției și de a fixa rigid creuzetul și inductorul. La variantele constructive neecranate, carcasa se execută din materiale nemetalice (azbociment, lemn, mase plastice speciale) sau nemagnetice (bronz, oțel sau fontă nemagnetică). În ultimul caz, carcasa trebuie secționată în plan vertical pentru a evita închiderea curenților turbionari generați de tensiunile induse.

Pentru a evita încălzirea elementelor metalice situate în câmpul magnetic inductor, inclusiv a carcaselor din tablă de oțel secționată pe verticală, cuptorul se prevede cu ecrane din pachete de tole (la joasă și medie frecvență) sau din foi de cupru (la frecvențe înalte). *Circuitul magnetic exterior 2* se realizează din pachete de tablă silicioasă, fixate rigid și dispuse radial pentru a li se asigura o răcire naturală eficientă. Grosimea tolelor este de 0,5 mm la cuptoarele de frecvență industrială și de 0,35 mm la cele de frecvență medie. Pierderile de putere activă în ecrane nu depășesc 0,4...0,5% din puterea cuptorului, dar masa acestora

poate ajunge la 600...700 kg pentru fiecare tonă din capacitatea cuptorului.

Inductorul 3 este principalul element constructiv al cuptorului și se realizează sub forma unei bobine cilindrice (solenoid) într-un singur strat, din țevă de cupru răcită cu apă.

Temperatura medie a apei nu trebuie să depășească 35-45⁰C, pentru a evita apariția vaporilor în fluidul refrigerent, dar nici să nu scadă sub 15-20⁰C, deoarece umezeala din aer conduce la apariția condensului, fapt ce va periclita izolația electrică a bobinajului. La o temperatură a apei de răcire de 25⁰C, temperatura medie a inductorului este de circa 50⁰C.

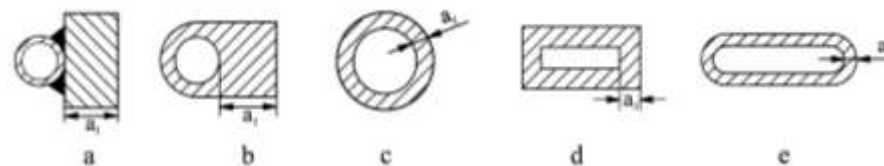


Fig.7.2 Profile de țevi pentru confecționarea inductorului

Pierderile de putere în inductor sunt minime atunci când grosimea a_1 a peretelui țevii orientată spre șarjă satisface la $a_1 \geq 1,57\delta_1$, cu δ_1 adâncimea de pătrundere a curentului în cuprul inductorului, la temperatura de lucru a acestuia. La frecvențe industriale, unde $a_1 \cong 12...20$ mm, inductorul se realizează fie din bară de cupru (de care se atașează, prin alămiră, o țevă de cupru răcită cu apă - fig.7.2-a), fie din țevă profilată, de construcție specială (fig.7.2-b). La frecvențe ridicate grosimea normalizată a peretelui țevii $a_1 = 0,5...5$ mm satisface condiția de pierderi minime, iar secțiunea transversală a conductorului de bobinaj are forme diferite (fig.7.2-c, d, e).

Izolarea spirelor se face fie prin interstiiții de aer de 1...2 cm, fie cu bandă de micanită sau stratitex cu grosimea minimă de 1,5 mm.

Inductoarele cu prize, deși dificil de realizat, permit o utilizare eficientă a surselor de alimentare, deoarece în timpul funcționării impedanța totală a cuptorului se modifică datorită: încălzirii apei, uzurii pereților creuzetului ca urmare a efectelor electromagnetice din topitură, trecerii de la o rețetă tehnologică la alta.

Creuzetul 4 se confecționează din materiale refractare normale sau cu rezistență mecanică mare, după rețete verificate în practica de exploatare. La funcționarea în vid sau atmosfere protectoare creuzetele sunt din grafit.

Căptușeala creuzetului, acidă la topirea oțelului cu conținut mediu de carbon și bazică la elaborarea oțelurilor cu mangan, se obține prin stamparea (baterea) materialului refractar granular în spațiul dintre carcasa interioară a creuzetului (cilindrul 5 din azbest sau micanită) și o formă din tablă de oțel (șablon) ce reprezintă negativul spațiului de lucru, ce se va topi ulterior.

Compoziția materialului de stampare se alege având în vedere:

- căderea mare de temperatură dintre topitură și inductorul răcit cu apă trebuie preluată de o grosime de 10...12 cm a pereților creuzetului, ceea ce conduce la un gradient de temperatură de circa 120...200 grd/cm;
- presiunea hidrostatică a topiturii poate ajunge la 4...8 N/cm², ceea ce solicită

intens căptușeala creuzetului;

- acțiunea chimică a componentelor încărcăturii asupra căptușelii creuzetului (manganul reacționează cu materialele refractare acide și formează silicați ce impurifică șarja, siliciul distruge căptușelile bazice etc.).

Capacul cuptorului 6 are rolul de a reduce pierderile de căldură prin radiație și este obligatoriu la unitățile de mare capacitate sau la cele care lucrează în atmosfere controlate. Cuptoarele de capacitate mică nu au capace deoarece, în perioada topirii, la suprafața șarjei 7 se află bucăți solide de metal, cu temperaturi relativ scăzute. După terminarea topirii, pierderile radiative sunt destul de mici deoarece stratul de zgură de la suprafață are o temperatură redusă.

Rețeaua scurtă este constituită din conductoare rigide (bare) sau flexibile, răcite cu apă. Conectarea barelor la inductor se face prin contacte tip separator ce presupun o întreținere și curățire permanentă, dar pierderile pe circuit sunt minime. Rețelele cu conductoare flexibile nu ridică probleme constructive sau de întreținere, în schimb conduc la pierderi ce pot ajunge la 5 % din puterea cuptorului.

Mecanismele de basculare sunt cu acționare electrică sau hidraulică și permit rotirea cuptorului în jurul unei axe ce trece fie prin centrul de greutate al cuptorului, fie printr-un punct situat sub jgheabul de golire. Ultima variantă are o largă utilizare, întrucât oala de turnare rămâne fixă și pierderile de metal prin picături sau oxidare sunt reduse. Acționarea hidraulică are ca principal dezavantaj existența unui spațiu mare sub cuptor pentru montarea cilindrilor hidraulici și a instalației de ulei sub presiune.

Cuptoarele de inducție cu creuzet, comparativ cu alte instalații destinate

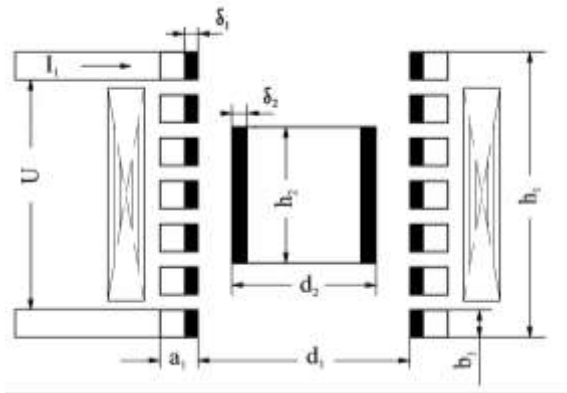


Fig.7.3 Sistemul inductor-piesă ($h_1 \gg h_2$)

aceluiasi scop, au următoarele avantaje:

- energia electrică se transmite direct materialului, ce se va încălzi cu viteză ridicată și controlabilă;
- amestec intens al băii de metal sub acțiunea eforturilor electrodinamice, ceea ce evită supraîncălzirile locale, reduce pierderile de metal prin oxidare (ardere) și omogenizează chimic topitura;

- construcție simplă ce poate lucra și în vid sau atmosfere protectoare, nepoluante și care ocupă spații productive relativ reduse.

7.3 Transmiterea energiei electromagnetice în sistemul inductor-șarjă

Constantele de material, formele și pozițiile reciproc diferite ale inductorului și piesei influențează în mare măsură transmiterea energiei electromagnetice. Din punct de vedere fenomenologic, inductorul se consideră un cilindru gol excitat din interior, iar șarja un cilindru plin sau gol excitat din exterior.

Dacă inductorul, cu N spire alimentate la tensiunea U a sursei, se consideră mult mai lung (fig.7.3) decât piesa ($h_1 \gg h_2$) și se neglijează efectele de capăt, atunci puterile aparente ce pătrund în inductor și piesă (indici 1 și 2) au expresiile:

$$\underline{S}_1 = A_1 \cdot \underline{S}_{01} = A_1 (K_{r1} + jK_{x1}) \frac{H_0^2}{\gamma_1 \delta_1} = \rho_1 \frac{\pi d_1 N^2}{\delta_1 h_1 g} (K_{r1} + jK_{x1}) \cdot I_1^2 = (R_1 + jX_1) \cdot I_1^2$$

$$\underline{S}_2 = A_2 \cdot \underline{S}_{02} = A_2 (K_{r2} + jK_{x2}) \frac{H_0^2}{\gamma_2 \delta_2} = \rho_2 \frac{\pi d_2}{\delta_2 h_2} (K_{r2} + jK_{x2}) \cdot I_2^2 = (R_2 + jX_2) \cdot I_2^2$$

cu: $A_1 = \pi d_1 h_1 g$ - suprafața interioară efectivă a inductorului, [m²];

$A_2 = \pi d_2 h_2$ - suprafața exterioară a piesei, [m²];

g - factorul de umplere al bobinei inductoare;

$H_0 = NI_1 / (gh_1) = I_2 / h_2$ - câmpul de excitație, [A/m];

I_1, I_2 - curentul prin inductor, respectiv șarjă, [A];

ρ_1, ρ_2 - rezistivitatea materialului inductorului, respectiv piesei corespunzătoare temperaturilor finale de lucru, [Ωm];

h_1, h_2 - înălțimea inductorului, respectiv piesei, [m];

d_1, d_2 - diametrul interior al inductorului, respectiv exterior al piesei, [m];

δ_1, δ_2 - adâncimea de pătrundere a undelor electromagnetice în materialul inductorului, respectiv piesei, [m];

R_1, X_1 - rezistența și reactanța internă a inductorului, [Ω];

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi \cdot d_1 N^2}{\delta_1 h_1 g} K_{r1} \quad X_1 = \rho_1 \frac{\pi \cdot d_1 N^2}{\delta_1 h_1 g} K_{x1}$$

R_2, X_2 - rezistența și reactanța internă a șarjei, [Ω];

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi \cdot d_2}{\delta_2 h_2} K_{r2} \quad X_2 = \rho_2 \frac{\pi \cdot d_2}{\delta_2 h_2} K_{x2}$$

K_r, K_x - funcții de corecție.

Dacă sistemul inductor-șarjă se asimilează cu un transformator monofazat fără miez de fier, atunci tensiunea aplicată inductorului va fi:

$$\underline{U} = (R_1 + jX_1) I_1 + N d\Phi / dt = (R_1 + jX_1) I_1 + j\omega N \Phi$$

cu: $\Phi = \Phi_a + \Phi_p$ - fluxul magnetic din interiorul solenoidului, [Wb];

Φ_a, Φ_p - fluxul magnetic prin aer, respectiv piesă, [Wb];

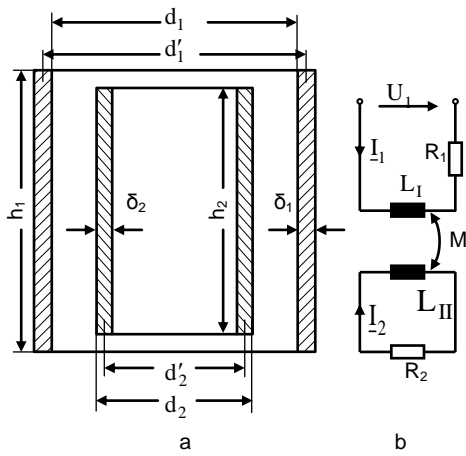


Fig.7.4 Sistemul inductor piesă ($h_1 \cong h_2$)

$$\Phi_a = \mu_0 \pi \frac{d_1^2 - d_2^2}{4h_2} N I_1$$

$$\Phi_p = \frac{1}{j \omega \rho_2} \frac{\pi d_2}{\delta_2 h_2} (K_{r2} + jK_{x2}) N I_1$$

ceea ce conduce la o impedanță a sistemului de:

$$\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}_1 = R_1 + R_2' + j(X_1 + X_2' + X_a)$$

cu: $R_2' = N^2 R_2$, $X_2' = N^2 X_2$ - rezistența și reactanța internă a piesei raportate la bornele inductorului, [Ω];

X_a' - reactanța aerului inductor - piesă raportată la bornele inductorului, [Ω];

$$X_a' = N^2 X_a = \frac{\pi \omega \mu_0}{4h_2} (d_1^2 - d_2^2) N^2$$

În practică inductorul și șarja au înălțimi aproximativ egale ($h_1 \cong h_2$) și la determinarea impedanței, sistemul se înlocuiește cu un transformator pe aer compus din două țevi coaxiale cu pereți subțiri ce au grosimile δ_1 , δ_2 (fig.7.4-a).

Având în vedere schema echivalentă din fig.7.4-b, ecuațiile de funcționare ale sistemului sunt descrise de:

$$\begin{cases} \underline{U} = (R_1 + j\omega L_I) \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 \\ 0 = (R_2 + j\omega L_{II}) \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 \end{cases}$$

cu: L_I , L_{II} - inductivitatea externă (de scăpări) a inductorului și șarjei, [H];

$$L_I = \mu_0 \alpha_1 \frac{\pi (d_1')^2}{4h_1} N^2; \quad L_{II} = \mu_0 \alpha_2 \frac{\pi (d_2')^2}{4h_2};$$

$$M = \mu_0 \alpha_M \frac{\pi (d_2')^2}{4h_2} N - \text{inductivitatea mutuală, [H];}$$

$$d_1' = d_1 + \delta_1; \quad d_2' = d_2 - \delta_2 - \text{diametre de calcul, [m];}$$

$$\alpha_1 = f(d_1'/h_1); \alpha_2 = f(d_2'/h_2); \alpha_M = f(d_1'/h_1; h_1/h_2) - \text{funcții de corecție;}$$

Impedanța sistemului în cazul examinat va fi :

$$\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}_1 = R_1 + p^2 R_2 + j\omega(L_I - p^2 L_{II}) = R_1 + p^2 R_2 + jX_a' \quad [\Omega]$$

$$\text{cu: } p^2 = \frac{(\alpha_M / \alpha_2)^2}{1 + (R_2 / \omega L_{II})^2} N^2 = \chi N^2 - \text{pătratul raportului de transformare.}$$

Dacă în relația precedentă se introduc și reactanțele interne, rezultă impedanța totală a sistemului inductor șarjă în condiții reale de funcționare.

$$\underline{Z}_t = R_1 + p^2 R_2 + j(X_1 + p^2 X_2 + \omega L_I - p^2 \omega L_{II}) = R_t + jX_t \quad [\Omega]$$

cu: R_t , X_t - rezistența și reactanța totală a sistemului, [Ω].

Randamentul electric al sistemului este dat de raportul dintre puterea P_2 transferată șarjei și puterea P_1 solicitată de inductor de la sursa de alimentare:

$$\eta_e = \frac{P_2}{P_1} = \frac{p^2 R_2}{R_1 + p^2 R_2} = \frac{1}{1 + A} \quad \text{cu } A = \frac{R_1}{p^2 R_2} = \frac{d_1 h_2 K_{r1}}{d_2 h_1 K_{r2}} \frac{1}{g \chi} \sqrt{\frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2}}$$

Se observă că randamentul electric este influențat de: geometria sistemului, temperatura șarjei prin ρ_2 , frecvența tensiunii de alimentare prin K_{r2} , factorul de umplere g al bobinei inductoare, mărimea $\chi = (\alpha_M / \alpha_2)^2 / [1 + (R_2 / \omega L_{II})^2]$, etc.

Factorul de putere al instalației $\cos \varphi$ rezultă din:

$$\cos \varphi = \frac{R_t}{Z_t} = \frac{R_t}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}}$$

și depinde de rapoartele d_1/d_2 , d_2/ρ_2 , având în general valori scăzute, ceea ce impune utilizarea bateriilor de condensatoare.

Randamentul termic al sistemului este dat de raportul dintre cantitatea de căldură utilă Q_u necesară încălzirii și topirii șarjei și cantitatea de căldură Q transferată încălzirii:

$$\eta_\theta = Q_u / Q = Q_u / (Q_u + Q_p)$$

cu: Q_p - cantitatea de căldură pierdută prin pereții cuptorului.

Randamentul cuptorului η_c se determină cu:

$$\eta_c = \eta_e \cdot \eta_\theta$$

7.4 Descrierea instalației din laborator

În laborator există un cuptor de inducție cu creuzet destinat topirii plumbului și caracterizat prin aceea că are creuzetul confecționat din oțel, deci din material feromagnetic și bun conducător electric. Această particularitate face ca liniile câmpului magnetic variabil creat de inductor să se închidă preponderent prin creuzet - în al cărui perete se închid curenți turbionari. Energia câmpului magnetic se transformă în energie termică în perete creuzetului, iar de aici, prin conducție termică, este încălzită și topită șarja din plumb. Așadar, în acest caz, piesa încălzită prin inducție se consideră creuzetul, nu șarja.

În figura 7.5 este prezentată schema electrică a instalației. De la rețeaua electrică de distribuție este alimentat transformatorul electric TR care are rol de alimentare a sursei de medie frecvență, care furnizează o tensiune alternativă de frecvență $f = 600\text{Hz}$.

Transformatorul TR , realizat cu secundar cu priză mediană, alimentează puntea redresoare PR , care furnizează tensiunea de încărcare a condensatoarelor $C_1 \dots C_4$, de valori egale. Cele două grupuri de condensatoare formează un divizor capacitiv, determinând două tensiuni continue egale: $U_o \approx 100\text{V}$. Existența

tensiunilor continue este semnalizată de cele două LED-uri, D_a și D_b .

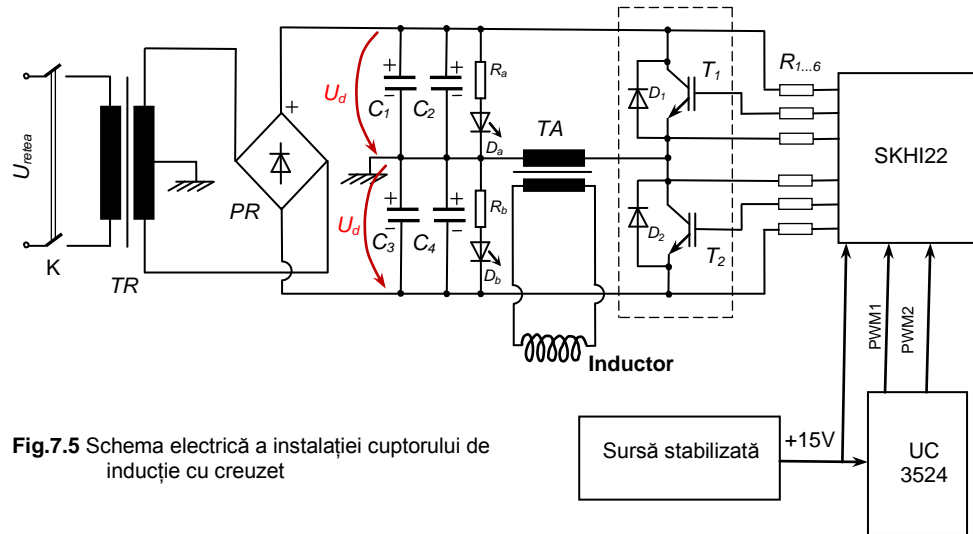


Fig.7.5 Schema electrică a instalației cuptorului de inducție cu creuzet

Conversia tensiunii continue în tensiune alternativă este realizată de un invertor cu undă plină, având tranzistoarele finale T_1 și T_2 de tip IGBT (tranzistoare bipolare cu grilă izolată). Cele două tranzistoare, cu diodele de descărcare aferente D_1 și D_2 , formează un braț de punte (contur punctat).

Invertorul generează pulsuri alternative dreptunghiulare de tensiune, de durate egale, la bornele înfășurării primare a transformatorului TA . Amplitudinea pulsului pozitiv este $+U_d$, iar a pulsului negativ $-U_d$. Lățimea pulsurilor este impusă de frecvența dorită la ieșirea convertorului, fiind jumătate din perioada tensiunii alternative ($t_1 = t_2 = T/2$, unde $T = 1/f$).

Pulsurile pozitive sunt generate prin conectarea condensatoarelor C_1+C_2 la primarul TA prin conducția tranzistorului T_1 , iar pulsurile negative apar prin conectarea condensatoarelor C_3+C_4 la primarul TA prin conducția tranzistorului T_2 . Întotdeauna cele două tranzistoare vor lucra în contratimp pe durata perioadei T .

Comanda tranzistoarelor este realizată de modulul integrat SKHI22, care realizează: transmisia cu separare galvanică în sens direct a semnalelor de comandă PWM, transmisia în sens invers a semnalelor de defect, comanda de blocare a tranzistoarelor cu tensiune negativă, funcții de protecție la suprasarcină, la scurtcircuit, la scăderea tensiunii de alimentare, etc.

Circuitul integrat UC3524 este un circuit specializat pentru comanda circuitelor în comutație care necesită impulsuri modulate în durată (PWM) pentru o frecvență de comutație constantă. Frecvența este stabilită de valoarea rezistenței R_T conectată la pinul 6 al acestui circuit: $f = 1,18/R_T C_T$ (unde $C_T = 0,1 \mu F$).

Transformatorul TA adaptează parametrii electrici tensiune-curent la parametrii ceruți de alimentarea inductorului cuptorului cu creuzet, $k_T = 57/5$.

În fig. 7.6 sunt prezentate, succesiv, imaginile transformatorului TA , ale sursei de alimentare, ale transformatorului de adaptare și ale cuptorului cu creuzet. Schița constructivă a cuptorului este prezentată în figura 7.7.



Fig. 7.6 Imaginile instalației din laborator : transformatorul de alimentare, sursa de medie frecvență, transformatorul de adaptare și cuptorul cu creuzet

7.5 Defășurarea lucrării de laborator

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

1. Se explică principiul de funcționare al cuptorului de inducție cu creuzet și al plitelor electrice de inducție.
2. Se identifică elementele constructive ale cuptorului din laborator;
3. Se identifică elementele constructive ale plitei de inducție Electrolux și se fac probe ale funcționării pentru diferite regimuri de lucru.
4. Se explică funcționarea instalației electrice a cuptorului cu creuzet.
5. Se determină masa creuzetului m_c și a șarjei m_s .
6. Se topește șarja, urmărindu-se dependențele în timp ale: puterii active și curentului absorbit din rețea: $P_r(t)$, $I_r(t)$, puterii active, tensiunii și curentului electric în primarul și în secundarul transformatorului de adaptare: $P_p(t)$, $U_p(t)$ și $I_p(t)$, respectiv : $P_1(t)$, $U_1(t)$ și $I_1(t)$. Se estimează durata de topire t_t .
7. Se determină mărimile H_o , E_o , J_o , S_o pentru inductor, în prezența și absența creuzetului.
8. Se calculează parametrii sistemului inductor-piesă δ_1 , δ_2 , R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , α_1 , α_2 , α_M , L_I , L_{II} , M , p . Se are în vedere că, în cazul de față, creuzetul din oțel se

încălzește prin inducție, iar plumbul se încălzește și se topește prin transmiterea conductivă a energiei termice degajată în oțel. Din punct de vedere al pătrunderii câmpului electromagnetic, inductorul se consideră conductor cilindric gol excitat din interior, iar creuzetul conductor cilindric gol excitat din exterior. Funcțiile de corecție K_r , K_x se determină cu relațiile de la placa plană excitată pe una din fețe:

$$K_r = \frac{sh2\varepsilon + \sin 2\varepsilon}{ch2\varepsilon - \cos 2\varepsilon}; \quad K_x = \frac{sh2\varepsilon - \sin 2\varepsilon}{ch2\varepsilon - \cos 2\varepsilon}; \quad \varepsilon = \frac{a}{\delta}$$

unde a – grosimea țevii inductorului, respectiv grosimea peretelui creuzetului.

9. Se determină căldura utilă și căldura pierdută prin pereții cuptorului.

10. Se determină analitic indicatorii η_e , η_θ , η_c , $\cos\varphi$.

11. Se compară randamentul teoretic al cuptorului η_c cu valoarea

randamentului global:
$$\eta_g = \frac{Q_u}{P_r \cdot t_t}$$

cu: $Q_u = m_s c_s (\theta_f - \theta_i) + m_s c_{lt} + m_c c_c (\theta_f - \theta_i)$, unde c_c , c_s – căldura specifică a creuzetului, respectiv a șarjei, [J/kg·grd], c_{lt} – căldura latentă de topire a șarjei, [J/kg], θ_i , θ_f – temperatura inițială, respectiv finală a creuzetului, [grd].

12. Se consemnează concluziile aferente studiului efectuat.

Datele inițiale necesare efectuării calculelor :

inductor: $N = 10$ sp; țevă de cupru cu diametru exterior $D = 8$ mm și diametru interior $d = 5$ mm; $h_1 = 100$ mm; $\rho_{Cu20^\circ} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$; răcire cu apă; temperatura medie a inductorului $+20^\circ C$; $\mu_{r1} = 1$; $g = \pi DN / (4h_1)$.

creuzet: cilindru gol din oțel; $c_c = 460$ J/kg·grd; $\gamma_c = 7800$ kg/m³; $\alpha_p = 0,0045$ grd⁻¹; $\rho_{c20^\circ} = (9..15) \cdot 10^{-8} \Omega m$; $\mu_c = 0,97 \cdot 10^{-4}$ H/m.

șarjă: plumb fără impurități; $h_s = 50 + n$ mm – înălțimea șarjei în creuzet; $\gamma_s = 11340$ kg/m³ - densitatea; $\theta_t = 327^\circ C$ - temperatura de topire; $\theta_f = 340 + 5n$ °C – temperatura finală; $c_s = 130$ J/kg·grd; $c_{lt} = 23800$ J/kg.

pierderile termice Q_p se consideră a avea loc numai prin conducție termică și se determină pentru regimul termic staționar. Se folosesc relațiile și tabelele din aplicația “Cuptoare electrice cu rezistoare”.

durata procesului de încălzire și topire: $t_t = 30 + n$ minute.

funcțiile de corecție:

- funcția de corecție a inductivității externe proprii:

$$\alpha = \exp \left[0,054 \left(\frac{d'}{h} \right)^2 - 0,428 \frac{d'}{h} \right]$$

- funcția de corecție a inductivității mutuale:

$$\alpha_M = 1,91^{(1-h_1/h_2)} \exp \left[-0,466 \frac{d'_1}{h_1} - 0,012 \right]$$

Notă: Ultimele relații sunt valabile dacă:

$$d' / h \in [0,2...1,6]; \quad d'_1 / h_1 \in [0,2...1]; \quad h_1 / h_2 \in [1...1,3].$$

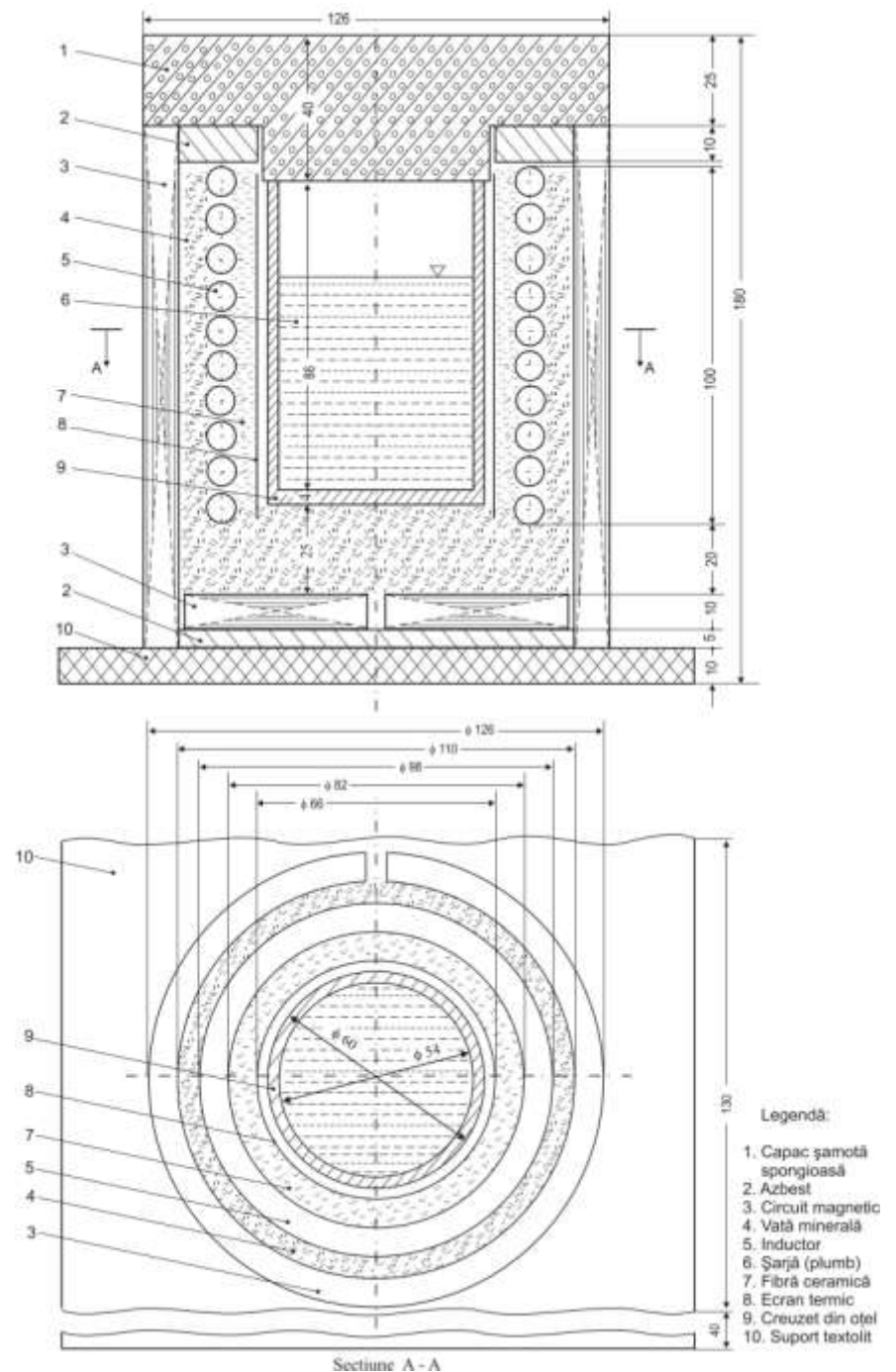


Fig. 7.7 Schița constructivă a cuptorului de inducție cu creuzet