

## CUPTOARE DE INDUCȚIE CU CANAL

### 8.1. 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.

În lucrarea anterioară „Cuptoare de inducție cu creuzet” s-au prezentat principiile fizice ale pătrunderii undelor electromagnetice în conductoare masive, pe baza legilor câmpului electromagnetic scrise sub formă vectorială. Aceleași principii guvernează și funcționarea cuptoarelor de inducție cu canal, cu toate că între cuptoarele de inducție cu creuzet și cele cu canal sunt diferite constructive.

### 8.2. Principiul de funcționare al cuptoarelor de conducție cu canal

Cuptoarele electrice de inducție cu canal sunt instalații electrotermice destinate topirii metalelor neferoase și aliajelor acestora, precum și la menținerea în stare caldă a fontei și oțelului topit (melanjoare de inducție).

Ne reamintim, de la lucrarea anterioară, cuptorul cu creuzet este similar cu un transformator fără miez feromagnetic, alimentat cu tensiune de frecvență industrială sau de frecvență medie (între 100 și 2000 Hz). Primarul acestui transformator este inductorul excitat din interior, iar secundarul este piesa încălzită, de forma unui cilindru metalic excitat din exterior.

Cuptorul cu canal este similar cu un transformator cu miez feromagnetic, iar alimentarea se face numai cu tensiune de frecvență industrială. Primarul este un inductor, din bară sau țevă din cupru, iar secundarul este sub forma unei spire în scurtcircuit, constituită din metalul dispus într-un canal circular care înconjoară inductorul.

Cuptoarele de inducție cu canal pot fi:

- cu canal orizontal;
- cu canal vertical.

Cuptoarele cu canal orizontal au miezul feromagnetic vertical, iar cuptoarele cu canal vertical au miezul feromagnetic orizontal.

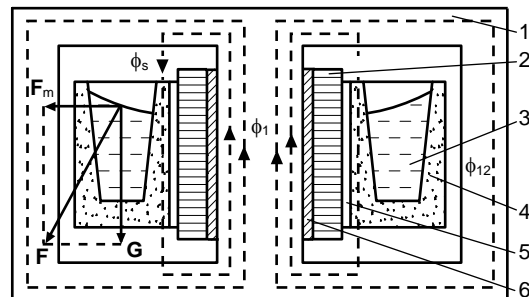


Fig.8.1 Schița cuptorului de inducție cu canal orizontal

Structural, cuptorul cu canal orizontal (fig.8.1) conține un circuit magnetic vertical 1, o înfășurare primară 2, numită *inductor*, și una secundară 3 constituită din metalul topit (*șarja*) ce umple canalul 4 din material refractar. Inductorul se dispune pe un cilindru electroizolant 6, iar răcirea sa se face prin ventilarea forțată a spațiului 5 dintre inductor și carcasa interioară a canalului. Șarja și inductorul se dispun concentric pentru a obține valori

acceptabile ale productivității și factorului de putere prin reducerea fluxului de dispersie  $\Phi_s$ .

Cuptorul de inducție cu canal diferă de un transformator clasic prin:

- ✓ înfășurarea secundară este în același timp și sarcină, fiind constituită dintr-o singură spiră de înălțime relativ redusă comparativ cu cea a inductorului. Dacă sunt mai multe canale în paralel, înălțimea totală a secundarului este dată de suma înălțimilor canalelor.
- ✓ existența efectului pelicular, deoarece adâncimea de pătrundere a curentului în șarjă este comparabilă cu lățimea canalului (dimensiunea radială acestuia). Din punct de vedere al pătrunderii câmpului electromagnetic în conductoare masive inductorul se consideră un conductor cilindric gol cu miez feromagnetic excitat la exterior, iar șarja un conductor cilindric gol excitat din interior.
- ✓ factor de putere scăzut datorat unui flux de scăpări  $\Phi_s$  important, ca și înălțimii reduse a secundarului în raport cu a primarului transformatorului.

Aceste instalații au ca principale avantaje: calitate superioară a șarjei datorită agitației băii de metal, conținut mult redus de gaze în metal, simplitate constructivă, procent mic de ardere a metalului prin oxidare, adaptare bună la cereri diferite de metal și la topirea bucăților metalice mari, factor de putere acceptabil (0,2...0,4 la aluminiu, 0,6...0,8 la alamă), consum redus de energie electrică. Ca dezavantaje se menționează: asigurarea continuității electrice a secundarului (la turnarea șarjei, în canal se păstrează o parte de topitură); dificultăți în utilizarea aceluiași cuptor pentru aliaje cu mărci diferite; necesitatea unor materiale refractare de calitate pentru confecționarea canalului, necesitatea curățirii dese a canalelor (la topirea aluminiului).

Constructiv, deosebit cuptoare cu 1...3 canale pe aceeași coloană feromagnetică sau pe coloane diferite, alimentarea fiind mono sau trifazată. Aceste cuptoare, comparativ cu cele de inducție cu creuzet de frecvență industrială au un randament total și un factor de putere mai bun și permit topirea și turnarea concomitentă a șarjei.

### 8.3. Construcția cuptoarelor de inducție cu canal vertical

Cuptoarele de inducție cu canal vertical (fig.8.2) prezintă două părți principale și anume *cuva cuptorului* (de secțiune transversală circulară sau ovală) și *unitatea de inducție* sau *topire* prin care se înțelege ansamblul *canal-inductor-circuit magnetic*.

La cuptoarele moderne unitatea de inducție este detașabilă, fiind înlocuită cu o alta ținută în rezervă caldă la baza canalului (canalele rezervei se mențin în permanență la 200...300°C cu ajutorul unor rezistoare de cromnichel).

*Carcasa cuptorului* se confecționează din tablă de oțel (6...10 mm grosime) rigidizată cu profile din același material. În carcasă se prevăd decupări necesare încărcării – descărcării cuptorului, evacuării zgurei, măsurării temperaturii, curățirii canalelor și supravegherii procesului tehnologic. Pentru diminuarea pierderilor prin radiație, toate aceste deschideri se prevăd cu capace corespunzătoare.

*Căptușeala cuvei* se zidește din cărămizi refractare sau se stampează dintr-un amestec de cuarț și cromomagnezită, după rețete verificate în practica de exploatare. Între căptușeala refractară și carcasa metalică se dispun unul sau mai multe straturi de materiale termoizolante.

*Căptușeala canalului* este partea cea mai solicitată din punct de vedere termic, chimic și mecanic și se obține prin *stamparea* (baterea) compoziției refractare în jurul unor șabloane de forma golului canalului. Șabloanele se confecționează din tablă de oțel, metalul de topit sau lemn și au o secțiune transversală circulară, ovală sau dreptunghiulară, ultima mai ușor de obținut. *Sinterizarea căptușelii*, prin care se înțelege interacțiunea chimică dintre masa refractară și liant, are loc la temperaturi ridicate obținute prin topirea șabloanelor metalice sau arderea celor de lemn (cu ajutorul unor rezistoare de cromnichel înglobate în materialul șablonului). Grosimea acestei căptușeli este de cel mult 50...70 mm, fapt care asigură un flux de dispersie relativ redus.

Forma și încărcarea specifică a canalului depind de natura metalului ce urmează a fi topit. În cazul cuprului și zincului canalul poate fi circular, dar la aluminiu secțiunea acestuia este obligatoriu dreptunghiulară, având în vedere numărul mare de curățiri ale canalului (o dată la 24 ore). La topirea aluminiului, pe suprafața băii apare o crustă de oxid de aluminiu (compus neconductor electric cu o temperatură de topire de 2000°C) care, prin spargere, poate cădea în canal și întrerupe continuitatea electrică a acestuia.

*Carcasa interioară a canalului* se compune din plăci metalice rigidizate între ele prin garnituri electroizolante pentru a evita închiderea curenților induși.

*Inductorul* se realizează din bară (la răcirea cu aer) sau țevă profilată de cupru (la răcirea cu apă), dimensiunea radială  $a_1$  a conductorului fiind  $a_1 \geq 1,57 \cdot \delta_1$  pentru a avea pierderi minime de putere prin efect Joule-Lentz. Inductorul se fixează pe o carcasă din lemn impregnat, azbociment sau textolit, iar izolarea spirelor se face prin garnituri de mică, azbest, bandă textilă impregnată, țesătură de sticlă etc. Bobina, de formă cilindrică, are în general un singur strat cu barele dispuse pe muchie pentru a micșora lungimea inductorului și este prevăzută cu 1...2 prize de reglaj.

*Circuitul magnetic*, similar cu al transformatoarelor normale, se realizează din tablă silicoasă laminată la cald sau la rece. Se preferă tola laminată la cald

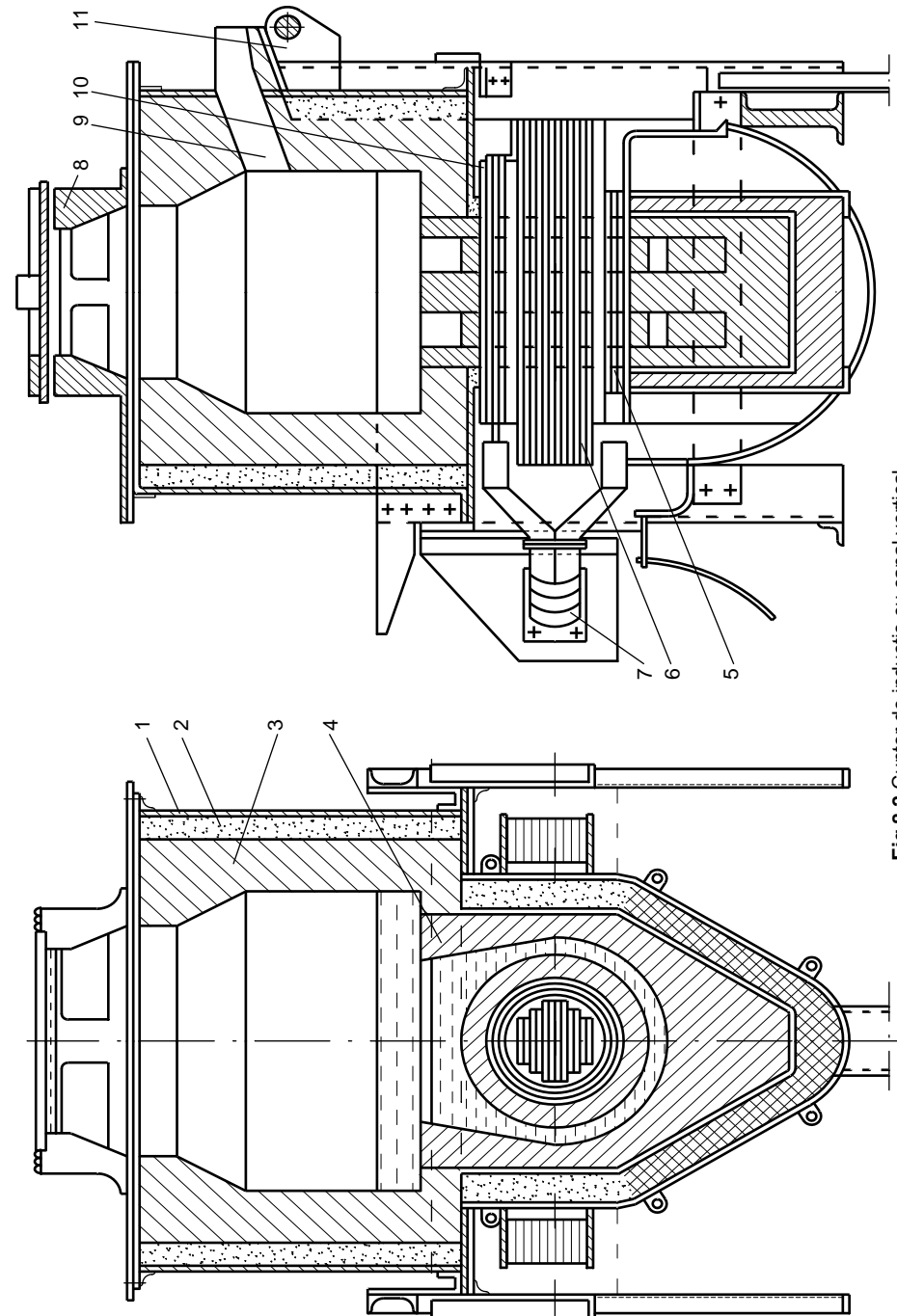


Fig.8.2 Cuptor de inducție cu canal vertical

1 – carcasa cuvei, 2 – căptușeala cuvei, 3 – căptușeala canalului, 4 – căptușeala canalului, 5 – inductor răcit cu aer, 6 – circuit magnetic în manta, 7 – ventilator, 8 – capac, 9 – gură de golire, 10 – carcasă interioară a canalului, 11 – legăr de basculare.

deoarece este mai ieftină și nu implică detensionări, prin recoacere, după ștanțare. Întrucât circuitul magnetic trebuie rețesut după fiecare intervenție la căptușeala canalului, jugul se face demontabil și se prevăd folii electroizolante în zona de îmbinare a acestuia cu coloanele (se evită supraîncălzirile locale generate prin scurtcircuitarea tolelor).

*Rețeaua scurtă a cuptorului* este constituită din totalitatea căilor de curent (cabluri flexibile de cupru răcite natural sau forțat) ce fac legătura între sursa de alimentare (transformator reglabil, autotransformator) și inductorul cuptorului.

#### 8.4. Eforturi electrodinamice în canalul cuptorului

Funcționarea cuptoarelor de inducție cu canal se caracterizează prin eforturi electrodinamice care apar în topitură. Ele sunt generate de interacțiunea curentului din canal cu câmpurile magnetice inductor și propriu, și anume:

a) *efortul de contracție* (fig.8.3 –a) se manifestă prin reducerea secțiunii transversale a topiturii din canal și este provocat de:

- *forțele electromagnetice de respingere*  $F_{c1}$  generate de interacțiunea dintre câmpul magnetic inductor  $H_1$  și curentul din canal  $I_2$ . Aceste forțe sunt orientate de la suprafața interioară (dinspre inductor) spre cea exterioară a canalului, unde presiunea electrodinamică  $p_e$  este maximă și egală cu:

$$p_e = \mu_2 I_2^2 / (2b_2^2)$$

în care:  $\mu_2 = \mu_0 \mu_{r2}$  – permeabilitatea magnetică a topiturii, H/m;

$I_2$  – valoarea eficace a curentului din canal, A;

$b_2$  – dimensiunea (înălțimea) canalului paralelă cu axa inductorului, m.

Pe suprafața interioară a canalului această forță  $F_{c1}$  este minimă, de unde rezultă o deplasare a topiturii de-a lungul axei canalului după traseul cu linie întreruptă. Presiunea electrodinamică este echilibrată de presiunea hidrostatică  $p_h$  a topiturii și de presiunea atmosferică  $p_a$ , adică:

$$p_e = p_h + p_a = \gamma t_2 h_c + p_a, \quad [N/m^2]$$

cu:  $\gamma t_2$  – greutatea specifică a topiturii,  $[N/m^3]$ ;

$h_c$  – înălțimea metalului topit din cuva cuptorului, [m];

$p_a = 10^5 N/m^2 = 1 \text{ at.}$  – presiunea atmosferică normală.

Înălțimea băii de metal din cuvă, la care presiunea hidrostatică depășește presiunea electrodinamică, este dată de :

$$h_c \geq \frac{1}{\gamma t_2} \left( \frac{\mu_2 I_2^2}{2b_2^2} - p_a \right)$$

și această valoare asigură continuitatea electrică a topiturii din canal.

În practică, înălțimea  $h_c$  este impusă din considerente constructive și pentru a evita întreruperea secundarului, curentul din canal trebuie să aibă o valoare inferioară celei critice  $I_{cr}$ , dată de :

$$I_2 \leq I_{cr} = b_2 \sqrt{(\gamma t_2 h_c + p_a) \frac{2}{\mu_2}}, \quad [A]$$

- *forța electrodinamică de atracție*  $F_{c2}$  între curenții elementari  $I_2^*$  din care se presupune a fi format curentul din canal  $I_2 = \sum I_2^*$ . Valoarea maximă a acestui efort este în axa canalului și se observă mai ales la cuptoarele de inducție cu canal orizontal.

Din cele de mai sus rezultă pentru efortul de contracție  $F_c$  valoarea:

$$F_c = F_{c1} + F_{c2}, \quad [N]$$

b) *efortul turbionar* (fig.8.3-b) este generat de interacțiunea curentului de densități diferite  $J_2$  din canal cu propriul câmp magnetic  $H_2$ . Forța  $F_t$  ce apare imprimă topiturii o mișcare de-a lungul axei canalului, deplasarea fiind cu atât mai accentuată cu cât secțiunea canalului este mai neuniformă. Fenomenul este

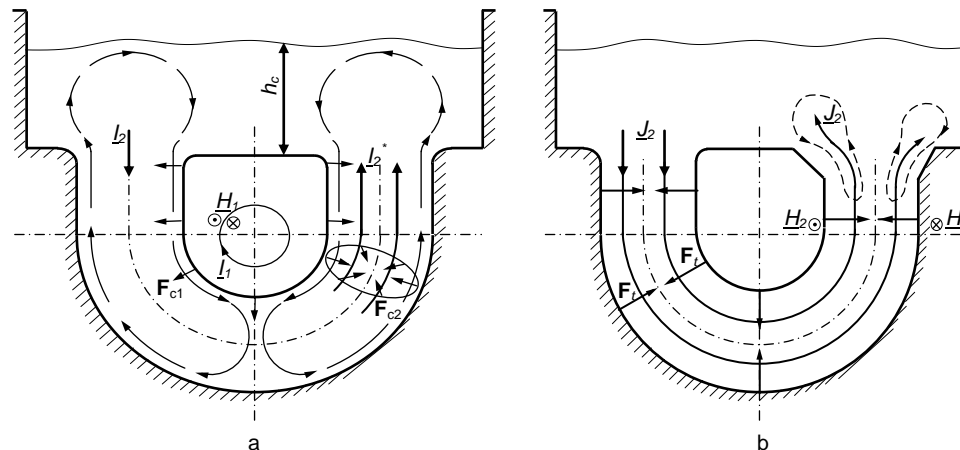


Fig.8.3 Eforturi în canalul cuptorului

caracteristic cuptoarelor cu canal acoperit, de secțiune variabilă, a căror extremități se găsesc într-o cuvă care se lărgeste.

c) *efortul motor sau centrifugal* apare ca urmare a interacțiunii curentului din canal cu fluxul de scăpări  $\Phi_s$  și este specific cuptoarelor cu canal orizontal descoperit (fig.13.1). Sub acțiunea forțelor  $F_m$  ce apar, metalul lichid este respins de la suprafața interioară spre cea exterioară a canalului. Deoarece asupra topiturii acționează și greutatea proprie  $G$ , suprafața liberă a metalului se va orienta pe direcția rezultantei acestei forțe.

d) *efortul termic convectiv* apare ca o consecință a densităților diferite ale topiturii din canal și cuvă. La cuptoarele cu canal vertical metalul din cuvă are o temperatură mai scăzută, deci o densitate mai mare, și trece în zonele inferioare ale canalului, iar metalul de aici se va ridica spre cuvă prin convecție naturală. La

cuptoarele cu canal orizontal acoperit, pentru a accelera omogenizarea topirii prin convecție termică, gurile canalului se dispun la cote diferite, iar axa acestuia se înclină față de orizontală.

### 8.5. Indicatori energetici ai cuptoarelor de inducție cu canal

Performanțele tehnico-economice ale instalațiilor electrotermice sunt puse în evidență de indicatorii energetici prin care se înțeleg mărimile: randament total, factor de putere, consum specific de energie electrică și productivitate.

Dacă avem în vedere schemele bloc a unui cuptor de inducție cu canal (fig.8.4), atunci indicatorii energetici se pot defini după cum urmează:

- *randamentul total* este dat de raportul dintre puterea utilă  $P_u$  și puterea  $P_c$  absorbită de instalație din rețeaua consumatorului:

$$\eta_t = P_u / P_c = \eta_g \eta_{rs} \eta_e \eta_\theta = \eta_g \eta_{rs} \eta_1$$

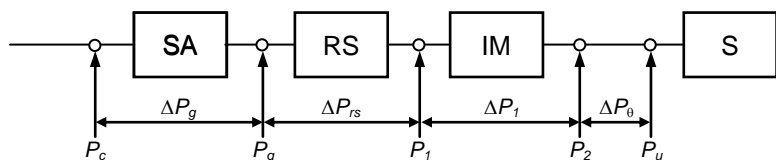


Fig.8.4 Schema bloc a cuptorului de inducție cu canal

SA – sursă alimentare; RS – rețea scurtă; IM – ansamblu inductor-circuit magnetic; S – șarjă.

unde:

$\eta_g = P_g / P_c = P_g / (P_g + \Delta P_g)$  – randamentul sursei de alimentare (transformator, generator, etc);

$P_g$  – puterea utilă generată la bornele de ieșire ale sursei de alimentare, [W];

$\Delta P_g$  – pierderi de putere în sursa de alimentare, [W];

$\eta_{rs} = P_1 / P_g = P_1 / (P_1 + \Delta P_{rs})$  – randamentul rețelei scurte;

$P_1$  – puterea la bornele inductorului, [W];

$\Delta P_{rs}$  – pierderi de putere pe conductoarele rețelei scurte, [W];

$\eta_e = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P_1)$  – randamentul electric al cuptorului;

$P_2$  – puterea transferată șarjei (încărcăturii), [W];

$\Delta P_1 = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}$  – pierderi în cuprul inductorului și în fier, [W];

$\eta_\theta = P_u / P_2 = P_u / (P_u + \Delta P_\theta)$  – randamentul termic al cuptorului;

$P_u$  – puterea utilă necesară încălzirii și topirii șarjei, [W];

$\Delta P_\theta$  – pierderi termice (flux termic de pierderi) în regim termic staționar, [W];

$\eta_1 = \eta_e \cdot \eta_\theta$  – randamentul cuptorului.

- *factorul de putere*  $\cos \varphi_t$  al instalației electrotermice și  $\cos \varphi_1$  al cuptorului rezultă din:

$$\cos \varphi_t = P_c / S_c \text{ și } \cos \varphi_1 = P_1 / S_1$$

$S_c$  – puterea aparentă solicitată din rețeaua de alimentare, [VA];

$S_1$  – puterea aparentă la bornele inductorului, [VA].

- *consumul de energie electrică* la nivelul instalației  $e_t$  și al cuptorului  $e_1$  se determină cu:

$$e_t = P_c \cdot t / m \text{ și } e_1 = P_1 \cdot t / m$$

$m$  – masa materialului de încălzit și topit, [kg];

$t$  – durata procesului tehnologic, [ore];

- *productivitatea instalației*  $g_t$  este numeric egală cu cea a cuptorului  $g_1$  și reprezintă cantitatea de produse, evaluate în unități de măsură corespunzătoare, ce se poate executa în unitatea de timp:

$$g_t = g_1 = m / t, \text{ [kg/oră].}$$

### 8.6. Desfășurarea aplicației

1. Se vor examina părțile constructive și desenele de execuție (planșele 3, 4 și 5) ale cuptorului de inducție cu canal orizontal, acoperit, destinat topirii plumbului și caracterizat prin aceea că are canalul realizat din tablă de oțel.

2. Se va explica funcționarea schemei electrice de forță și comandă (planșele 1 și 2), identificându-se elementele componente din dulapul cu echipamentul electric.

Inductorul cuptorului de inducție cu canal este alimentat din circuitul secundar al unui transformator prevăzut cu 5 prize de reglare în circuitul primar.

Măsurarea mărimilor electrice se realizează astfel:

- tensiunile de linie și de fază în primarul transformatorului sunt măsurate cu ajutorul voltmetrului V1 prin comutarea unei chei voltmetrice S1;
- curentul în primarul transformatorului, cu ajutorul ampermetrului A1, conectat în secundarul transformatorului de curent TC1, cu raport 10/5;
- factorul de putere în primarul transformatorului, cu ajutorul unui cosfimetru de tablou, conectat la adaptorul E1;
- tensiunea, curentul și puterea activă în circuitul inductorului, folosind aparatele V2, A2 (în secundarul transformatorului de curent TC2, cu raport 150/5) și W2.
- temperaturile în 5 puncte ale canalului folosind 5 termocupluri și un termometru electronic cu comutator.

Schema de comandă prezintă comutatorul S3, de selectare a regimului de încălzire, având o poziție de zero și șase poziții de lucru, notate 1, 2, ...6, corespunzătoare la 6 trepte de putere. Pentru început maneta comutatorului S3 se așează pe poziția de zero.

Punerea sub tensiune a instalației se realizează prin închiderea întrerupătorului manual Q de pe tabloul electric care deservește dulapul cu echipamentul electric. Astfel este alimentată atât schema electrică de forță cât și schema de comandă. Prezența tensiunii trifazate determină anclanșarea celor trei rele de control a prezenței tensiunii,  $d_1$ ,  $d_2$  și  $d_3$ , a căror bobine sunt conectate în stea în schema de forță. Contactele lor normal deschise,  $d_1$ ,  $d_2$  și  $d_3$ , se vor închide în circuitul 2 al schemei de comandă.

Se deschide robinetul circuitului apei de răcire a inductorului, iar contactul B2 al releului manometric (de control al presiunii apei în circuitul de răcire) își va închide contactul în circuitul 23 și releul  $d_4$  va anclanșa. În circuitul 2 se închide contactul  $d_4$ , iar prin contactul de poziție de zero a comutatorului S3 din circuitul 11 este alimentat circuitul 2 de la faza R și releul  $d_5$  va anclanșa. Prin închiderea contactului  $d_5$  din circuitul 12 se pregătește alimentarea circuitelor 12, ..., 17, iar prin închiderea contactului  $d_5$  din circuitul 2 este automenținută alimentarea acestui circuit.

Prin trecerea manetei comutatorului S3 pe poziția 1, este alimentat circuitul 12 de la faza R. Prin contactele normal închise  $d_8 \dots d_{12}$  este alimentată bobina releului  $d_7$ , care anclanșează, și în circuitul 6 se va închide contactul  $d_7$ . Contactorul  $K_2$  va anclanșa și se va închide atât contactul  $K_2$  din primarul transformatorului, cât și contactul  $K_2$  din circuitul 3 se alimentează bobina releului de timp  $d_6$  din circuitul 4. După temporizarea de câteva secunde asigurată de acest releu, se închide contactul normal deschis cu temporizare la acționare  $d_6$  din circuitul 5 și este alimentată bobina contactorului  $K_1$ . În felul acesta este alimentată înfășurarea primară la tensiunea de linie. Alimentarea înfășurării primare se face prin contactul  $K_2$  închis în acest moment. Numărul spire alimentate în primar este maxim, deci tensiunea îndusă în secundar este mică.

Dacă se dorește creșterea puterii dezvoltate în șarjă, se trece maneta comutatorului S3 pe treapta 2. Este pus sub tensiune circuitul 12, anclanșează releul  $d_8$ , iar prin închiderea contactului  $d_8$  din circuitul 7 este alimentată bobina contactorului  $K_3$ . Se va închide atât contactul  $K_3$  din primarul transformatorului, cât și contactul  $K_3$  din circuitul 3. Se demarează temporizarea prin releul de timp, iar după timpul reglat primarul transformatorului este pus la tensiunea de linie, prin contactele  $K_1$  și contactul  $K_3$  închise. Numărul spire în primar este diminuat față de cazul anterior, deci tensiunea îndusă în secundar este crescută.

Pentru a se realiza puteri dezvoltate și mai mari se trece maneta comutatorului S3 pe una din pozițiile 3.... 6, la care numărul de spire din primar, alimentate la tensiunea de linie, este mai mic, raportul de transformare scade, deci tensiunea secundară crește.

Factorul de putere al instalației poate fi crescut prin conectarea bateriei de condensatoare BC în primarul transformatorului de alimentare. Prin acționarea butonului rotativ  $S_4$  din circuitul 18 este alimentat contactorul  $K_6$ , care prin închiderea contactului său  $K_6$  și prin oricare dintre contactele  $K_2 \dots K_7$  permite conectarea bateriei de condensatoare.

Oprirea de urgență este activată prin apăsarea butonului S2.

**3.** Se realizează comanda de începere a operației de încălzire/topire a șarjei prin trecerea comutatorului S3 pe treapta 1. Se vor nota, la intervale de 3 minute:

- tensiunea  $U_c$ , curentul  $I_c$  și factorul de putere  $\cos\varphi_c$  sub care este absorbită puterea  $P_c$  din rețeaua de alimentare;
- tensiunea  $U_g$ , curentul  $I_g \approx I_1$  și puterea  $P_g$  la bornele de ieșire ale sursei de alimentare SA care, în cazul de față, este un transformator monofazat conectat la tensiunea de linie a rețelei;

➤ temperaturile  $\theta_1 \dots \theta_5$  în cinci puncte diferite  $T_1 \dots T_5$  ale canalului.

**4.** Se determină indicatorii energetici

$$\eta, \cos\varphi, e, g, \theta_{ms} = f(t)$$

cu  $\theta_{ms}$  temperatura medie a șarjei;

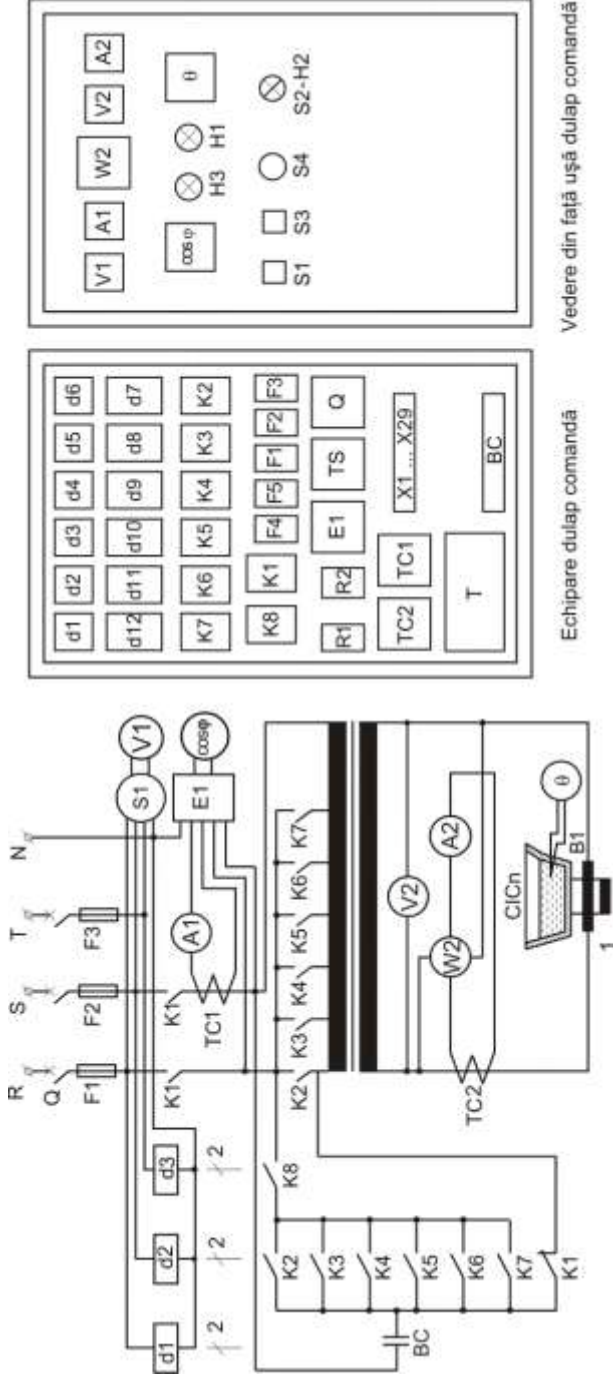
Pentru acestea, folosind datele măsurate anterior, se vor determina:

- $\eta_g = P_g / P_c$ , unde  $P_c = U_c I_c \cos\varphi_c$  – puterea cerută din rețea, [W];
- $\eta_{rs} = P_1 / P_g = (P_g - \Delta P_{rs}) / (P_g)$ , unde  $\Delta P_{rs} = 2R_{rs} I_1^2 = 2R_0 L_{rs} I_1^2$  – pierderi de putere pe conductoarele rețelei scurte, [W];  
 $L_{rs}$  – lungimea pe fază a rețelei scurte, [m];  
 $R_0$  – rezistența specifică a conductorului rețelei scurte, [ $\Omega$ /km];
- $\eta_e = P_2 / P_1 = (P_1 - \Delta P_1) / P_1$ , unde:  
 $\Delta P_1 = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = R_1 I_1^2 + \rho_{0Fe} m_{Fe} = \rho_1 L_{m1} N I_1^2 / s_1 + \rho_{0Fe} m_{Fe}$   
 $L_{m1}$  – lungimea medie a spirei inductorului, [m];  
 $N$  – numărul de spire al inductorului;  
 $s_1$  – secțiunea transversală efectivă a conductorului de bobinaj, [m<sup>2</sup>];  
 $\rho_1$  – rezistivitatea materialului inductorului la temperatura de lucru, [ $\Omega$ ·m];  
 $\rho_{0Fe}$  – pierderi specifice în circuitul magnetic, [W/kg];  
 $m_{Fe}$  – masa circuitului magnetic, [kg].
- $\eta_\theta = \frac{P_u}{P_2} = \frac{Q_u}{\sum P_{2j} \cdot \Delta t_j} = \frac{m_c c_c (\theta_{mc} - \theta_0) + m_s c_s (\theta_{ms} - \theta_0) + m_s c_{ts}}{\sum P_2 \cdot \Delta t_j}$   
 $Q_u$  – căldura utilă necesară încălzirii și topirii șarjei (indice s), precum și cea necesară încălzirii canalului (indice c), [J];  
 $c$  – căldura specifică, [J/kg·grd];  
 $c_t$  – căldura latentă de topire, [J/kg];  
 $m_c$  – masa canalului;  $m_s$  – masa șarjei;  
 $\theta_{mc} = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) / 3$  – temperatura medie a canalului, [grd];  
 $\theta_{ms} = (\theta_4 + \theta_5) / 2$  – temperatura medie a șarjei, [grd];  
 $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  – temperatura inițială, [grd];  
 $\Delta t_j$  – durata intervalului dintre două citiri consecutive, [s];  
 $P_{2j}$  – puterea transferată încărcăturii la sfârșitul intervalului  $\Delta t_j$ , [W];

Datele inițiale necesare efectuării calculelor se referă la:

- ❖ *rețea scurtă*: conductă flexibilă M<sub>sud</sub>C35;  $L_{rs}=4\text{m}$ ;  $s=35\text{ mm}^2$ ;  $R_0=0,511\ \Omega/\text{km}$ ;
- ❖ *inductor*: țevă de cupru răcită cu apă, temperatura de lucru  $+20^\circ\text{C}$ ;  $\rho_{1,20^\circ}=1,75 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ ;  $\alpha_{1p}=4,33 \cdot 10^{-3}\ 1/\text{grd}$ ;  $N=24$  spire;
- ❖ *canal*: tablă neagră #2,5 mm,  $\gamma_c = 7800\ \text{kg/m}^3$ ,  $c_c = 460\ \text{J/kg}\cdot\text{grd}$ ;
- ❖ *șarjă*: plumb,  $\gamma_s=11340\ \text{kg/m}^3$ ;  $c_s=130\ \text{J/kg}\cdot\text{grd}$ ;  $c_{ts} = 23800\ \text{J/kg}$ ;  $\theta_i=327^\circ\text{C}$  - temperatura de topire,  $\theta_g = 400^\circ\text{C}$  – temperatura de golire;
- ❖ *circuit magnetic*: tablă siliciosă  $\neq 0,5\text{mm}$ ,  $k_{Fe}=0,92$ ,  $\gamma_{Fe}=7800\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_{0Fe}=1,1\text{W/kg}$ .

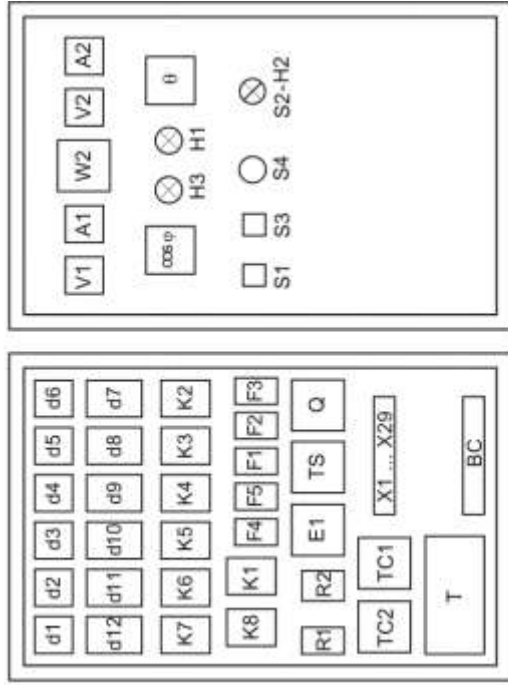
- Se trasează caracteristicile  $\eta, \cos\varphi, e, g, \theta_{ms} = f(t)$ .



Planșa 1 Schema electrică de forță a instalației electrice

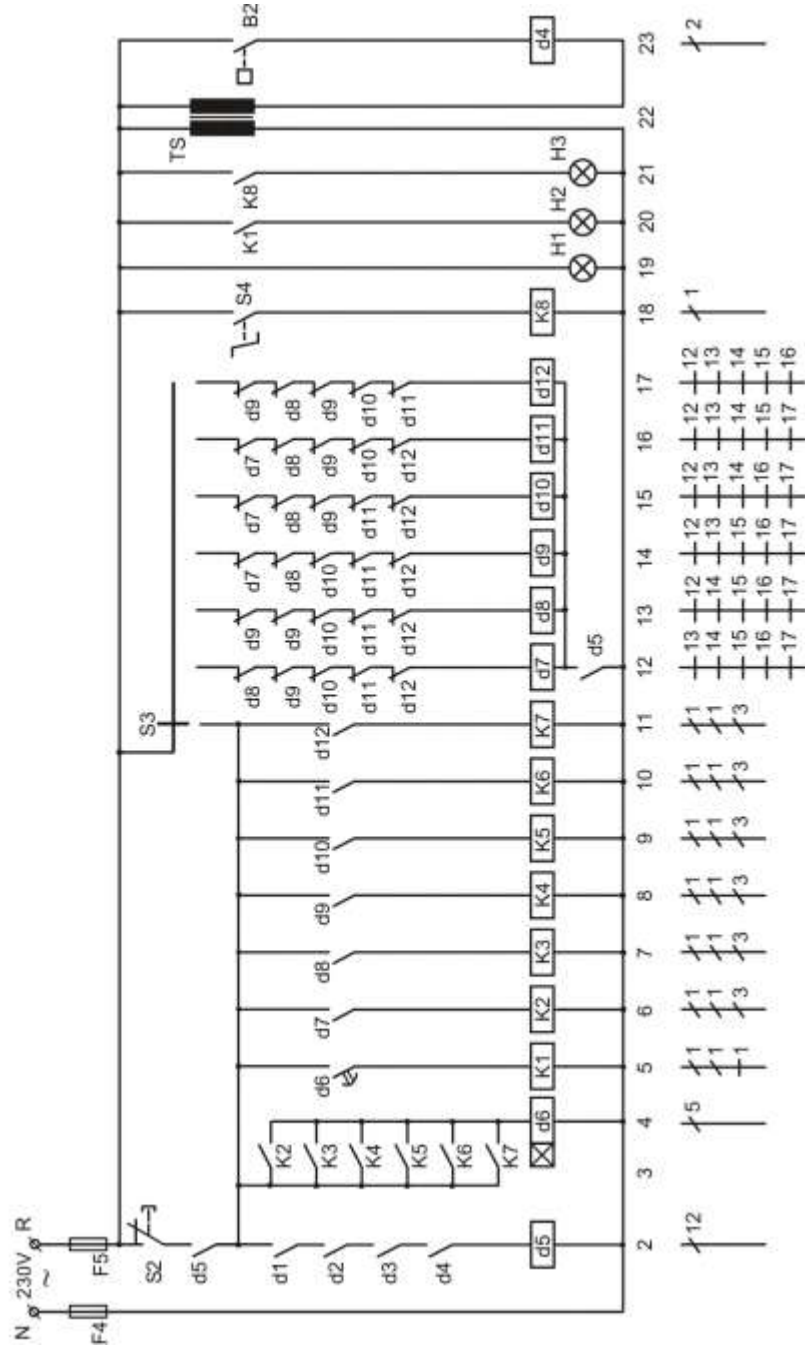
**Legendă:** Q – intreruptor automat AMIRO40  
 S1 – comutator voltmetru  
 S2 – selector treaptă tensiune  
 S3 – buton comandă cu cheie  
 S4 – buton comandă cu cheie  
 V1, A1, cosφ – aparate măsură rețea  
 V2, A2, W2 – aparate măsură cuptor  
 θ – termometru electronic  
 B1 – termocuplu Fe-Cr  
 B2 – contact manometru apă  
 E1 – adaptor TPM790

F1...F5 – siguranțe fuzibile  
 TC1 – transformator de curent 150 / 5  
 TC2 – transformator de curent 230 / 24 V  
 T – transformator forță cuptor  
 CiCn – cuptor de inducție cu canal  
 R1, R2 – rezistențe adiționale voltmetru V1, V2  
 H1...H3 – lămpi semnalizatoare  
 X1...X29 – conectori cu cleme  
 K1...K7 – contactor TCA25  
 d1...d12 – releu intermediar  
 BC – baterii condensatoare

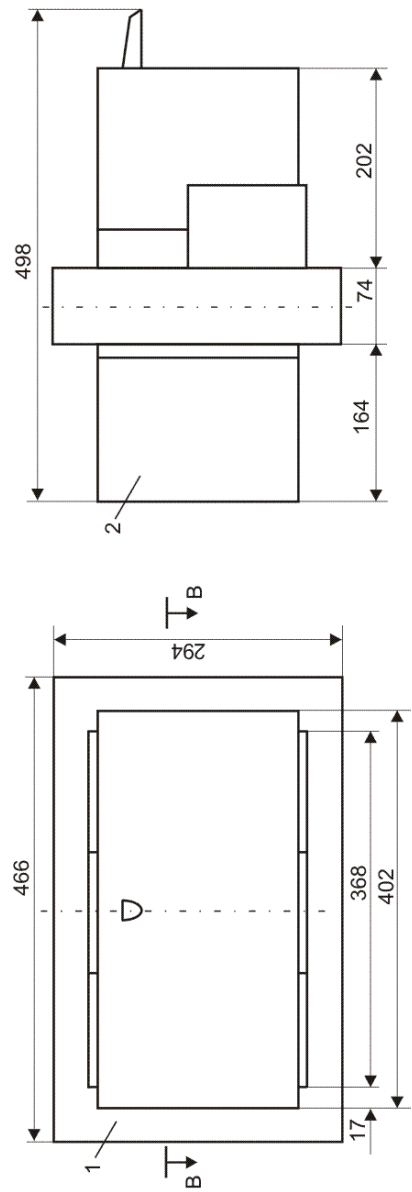


Echipare dulap comandă

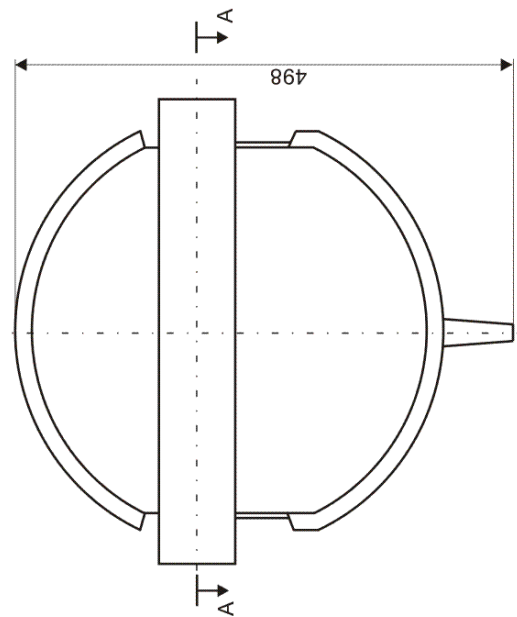
Vedere din față ușă dulap comandă



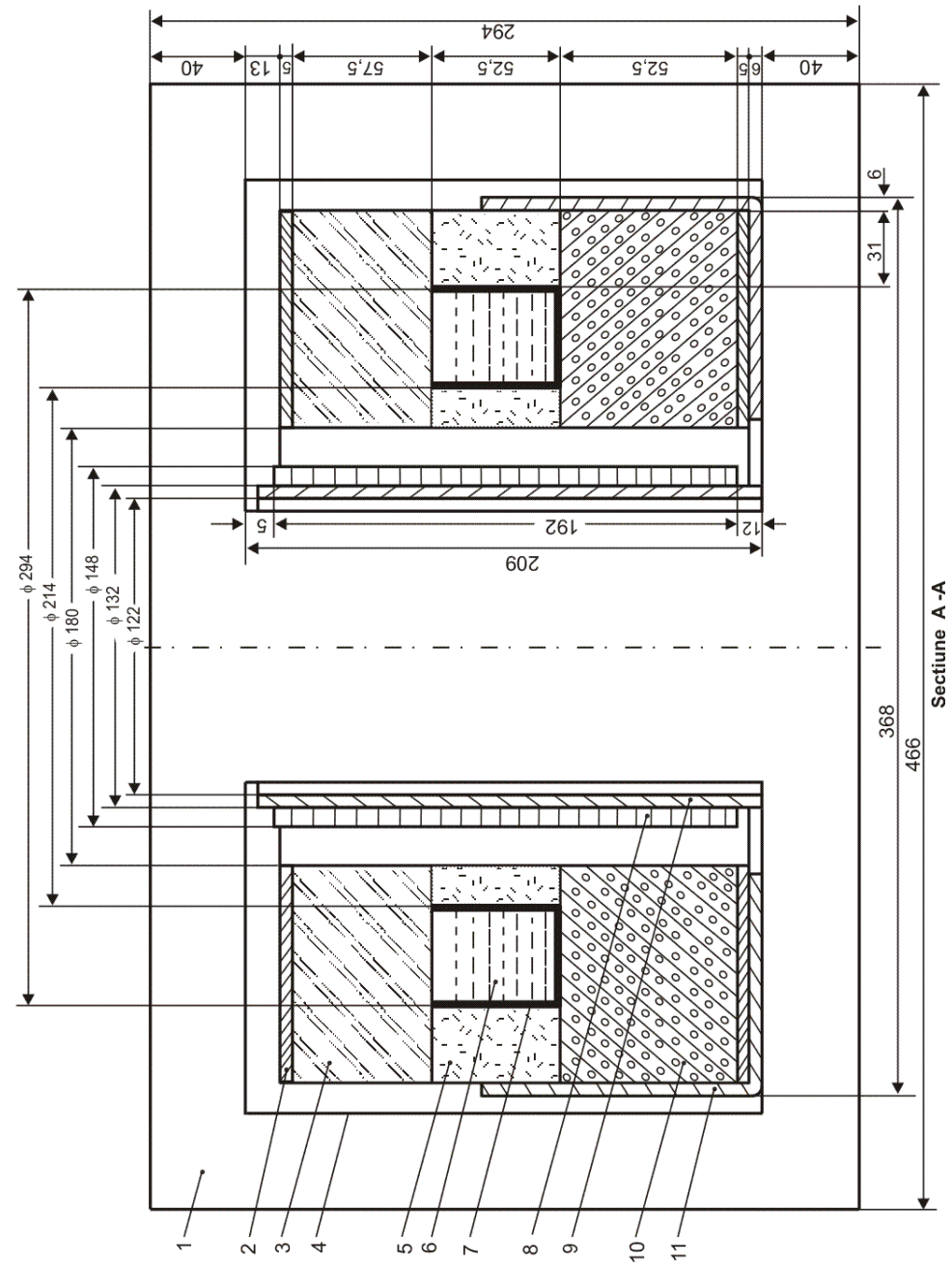
Planșa 2 Schema electrică de comandă a instalației electrice



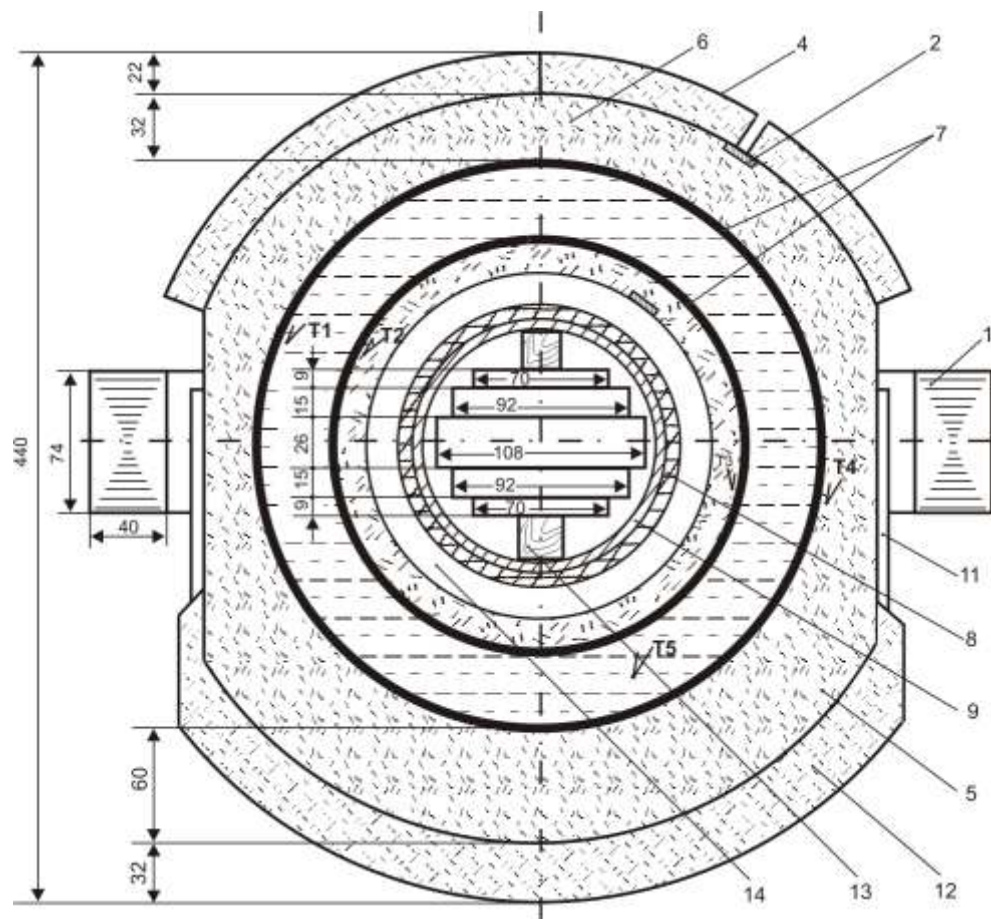
Planșa 3 Elemente dimensionale ale cuptorului cu canal



1 - Circuit magnetic  
2 - Carcasă cuptor

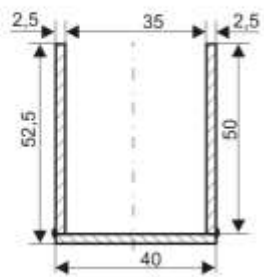


Planșa 4 Elemente dimensionale ale cuptorului cu canal (vedere laterală)

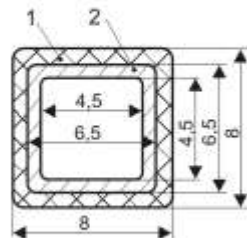


Sectiune B - B

- 1 - circuit magnetic
- 2 - azbest
- 3 - fibră ceramică
- 4 - carcasă tablă fier
- 5 - șamotă spongioasă mărunțită
- 6 - șarjă (plumb)
- 7 - canal din tablă fier
- 8 - inductor
- 9 - cilindru preșpan
- 10 - cărămidă șamotă spongioasă și mărunțită
- 11 - element susținere
- 12 - vată de sticlă
- 13 - pană de lemn
- 14 - canal ventilație
- T1 ... T5 - puncte măsură temperatură



Detaliu canal 1:1



Detaliu țeava inductor 5:1  
1 - izolație  
2 - conductor cupru

Planșa 5 Elemente dimensionale ale cuptorului cu canal (vedere de sus)