

## BREVIAR DE CALCUL DE DIMENSIONARE TRANSFORMATOR DE SUDARE CU ARC ELECTRIC

### 1. Miezul feromagnetic

#### 1.1. Secțiunea geometrică transversală a coloanei / jugului

$$A_c = A_j = c \cdot \sqrt{\frac{S_N}{f}} = m \cdot n \quad (1)$$

$$c = 4 \cdot 10^{-4} [m^2 \cdot J^{-1/2}]$$

Se recomandă:  $m \cong n$ , (Fig. 2)

#### 1.2. Secțiunea transversală a miezului feromagnetic

$$A_{Fe} = k_{Fe} \cdot A_c \quad (2)$$

unde:  $k_{Fe}=0,95$ , este coeficientul de umplere al pachetului feromagnetic.

#### 1.3. Alegerea inducției magnetice în miez

Valoarea amplitudinii inducției magnetice se alege în intervalul:  $B_c=0,7 \dots 1 [T]$ .

## 2. Înfășurări

### 2.1. Numărul de spire

$$N_1 \cong \frac{U_{1N}}{4,44 f \cdot A_{Fe} \cdot B_c}; \quad N_2 = \frac{U_{20}}{4,44 f \cdot A_{Fe} \cdot B_c} \quad (3)$$

Numerele de spire se rotunjesc.

### 2.2. Aproximarea curenților nominali

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}; \quad I_{2N} \approx \frac{S_N}{U_{20}} \quad (4)$$

### 2.3. Secțiunea transversală a conductoarelor înfășurărilor

Se alege valoarea densității de curent în înfășurări:  $j = 3 \dots 4 [A/mm^2]$ .

Înfășurarea primară se realizează cu conductor rotund, cu diametrul  $d_1$ , având valori standardizate în STAS 685-74, respectiv înfășurarea secundară cu

conductor dreptunghiular, cu secțiunea  $a \times b$ , având valorile standardizate în STAS 2873-68. Ariile secțiunilor se calculează cu relațiile:

$$s_1 = \frac{I_{1N}}{j}; \quad s_2 = \frac{I_{2N}}{j} \quad (5)$$

### 2.4. Dimensiunile conductoarelor

Pentru primar, diametrul conductorului izolat rezultă:

$$d_{iz} = d_1 + 2\delta_{izr} \quad (6,a)$$

Pentru secundar, dimensiunile conductorului dreptunghiular, rezultă:

$$a_{iz} = a + 2\delta_{izd}; \quad b_{iz} = b + 2\delta_{izd} \quad (6,b)$$

Grosimea izolației se estimează la:

$$\delta_{izr} \cong 0,05[mm]; \quad \delta_{izd} \cong 0,1[mm] \quad (6,c)$$

### 2.5. Aranjarea bobinajului

Se aranjează bobinajul pe straturi, conform Fig. 1. Se calculează:

- Numărul de spire pe strat, la înfășurarea primară (1), respectiv secundară (2):

$$n_{1v} \cong \sqrt{N_1}; \quad n_{2v} \cong \frac{N_2}{n_{20}} \quad (7)$$

- Numărul de straturi:

$$n_{10} = \frac{N_1}{n_{1v}}; \quad n_{20} = \frac{B_1}{a_{iz} + y} \quad (8)$$

unde:  $y=0,5 [mm]$ , este grosimea izolației dintre straturi (preșpan).

- Înălțimea bobinajului:

$$A_1 = n_{1v} \cdot d_{iz}; \quad A_2 = n_{2v} \cdot b_{iz} \quad (9,a)$$

- Lățimea bobinajului:

$$B_1 = n_{10} \cdot (d_{iz} + y) \quad (9,b)$$

$$B_2 = n_{20} \cdot (a_{iz} + y) \cong B_1$$

Se urmărește respectarea condiției  $A_1 \cong B_1 \cong B_2$ . Ordinea de efectuare a calculelor este:  $n_{1v} \rightarrow n_{10} \rightarrow A_1, B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow n_{20} \rightarrow n_{2v} \rightarrow A_2$ . Ultimul strat al bobinelor primară și secundară poate fi incomplet (mai mic decât  $n_{1v}$ , respectiv  $n_{2v}$ ).

Încadrarea bobinajelor în fereastra transformatorului, Fig. 2:

$$L_c = A_1 + A_2 + m + 3\Delta \quad (9,c)$$

$$L_j = \max(B_1, B_2) + m + 2\Delta$$

unde:  $\Delta=4...5$  [mm], este distanţa necesară de aranjare şi izolare a bobinajului.

## 2.6. Rezistenţele înfăşurărilor

Se consideră o lăţime medie a înfăşurărilor,  $B$ , respectiv o lungime medie egală a spirelor,  $D_{m1} \cong D_{m2}$ :

$$B = \frac{1}{2}(B_1 + B_2); \quad D_{m1,2} = B_{1,2} + m + 2\Delta \quad (10)$$

Rezistenţele înfăşurărilor sunt date de relaţiile:

$$R_1 = \rho_{Cu} \cdot N_1 \cdot \frac{\pi \cdot D_{m1}}{s_1}; \quad R_2 = \rho_{Cu} \cdot N_2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{m2}}{s_2} \quad (11)$$

unde:  $\rho_{Cu}=2 \cdot 10^{-8}$  [ $\Omega m$ ].

Rezistenţa înfăşurării secundare, raportată la primar:

$$R'_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2 \quad (12)$$

## 2.7. Parametrii de scurtcircuit ai transformatorului

- Rezistenţa de scurtcircuit (raportată la primar):

$$R_{1sc} = R_1 + R'_2 \quad (13)$$

- Reactanţa de scurtcircuit (raportată la primar):

$$X_{1sc} = 2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot N_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_m}{l_H} \cdot \left( \Delta + \frac{A_1 + A_2}{3} \right) \quad (14)$$

unde:  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m],  $D_m=D_{m1} \cong D_{m2}$ , iar:

$$l_H = \frac{B}{k_R} > B \quad (15)$$

iar  $k_R$ , este factorul Rogowski, dat de relaţia:

$$k_R = 1 - \frac{A_1 + A_2 + 2\Delta}{2\pi \cdot B} \quad (16)$$

- Impedanţa de scurtcircuit:

$$Z_{1sc} = \sqrt{R_{1sc}^2 + X_{1sc}^2} \quad (17)$$

- Tensiunea procentuală de scurtcircuit:

$$u_{sca} = \frac{I_{1N} \cdot R_{1sc}}{U_{1N}} \cdot 100; \quad u_{scr} = \frac{I_{1N} \cdot X_{1sc}}{U_{1N}} \cdot 100$$

$$u_{sc} = \sqrt{u_{sca}^2 + u_{scr}^2} \quad [\%] \quad (18)$$

Se verifică condiţia:  $u_{sc} = 70...90$  [%].

- Curenţii de scurtcircuit:

$$I_{1sc} = \frac{U_{1N}}{Z_{1sc}}; \quad I_{2sc} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \cdot I_{1sc} \quad (19)$$

## 3. Calcule de verificare

### 3.1. Verificarea tensiunii secundare de gol

$$U_{20} = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_{1N} \quad (20)$$

Se verifică dacă valoarea calculată diferă cu mai puţin de  $\pm 2\%$  faţă de valoarea dată în tema de proiectare.

### 3.2. Determinarea caracteristicilor de ieşire (V-A, W-A)

Caracteristicile externe,  $U_2(I_2)$ , respectiv caracteristicile puterii  $P_2(I_2)$  Fig. 3 şi Fig. 4 se determină pentru două cazuri,  $I_2 \in [0, I_{2sc}]$ :

- Variaţie liniară (indice “a”):

$$U_{2a} = -\frac{U_{20}}{I_{2sc}} \cdot I_2 + U_{20}; \quad P_{2a} = U_{2a} \cdot I_2 \quad (21,a)$$

- Variaţie tip elipsă (indice “b”):

$$U_{2b} = U_{20} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{I_2}{I_{2sc}} \right)^2}; \quad P_{2b} = U_{2b} \cdot I_2 \quad (21,b)$$

- Caracteristici mediate, Fig. 3:

$$I_2 = \frac{I_{2a} + I_{2b}}{2} \Big|_{U_2=ct}; \quad P_2 = U_2 \cdot I_2 \quad (21,c)$$

Domeniul de variaţie al tensiunii este:

$$U_2 \in [0 \dots U_{20}].$$

### 3.3. Verificarea curenţilor nominali

Curenţii nominali (primar/secundar) se calculează din caracteristicile mediate, corespunzător unei tensiuni secundare nominale,  $U_{2N} \cong 20$  [V], Fig. 3:

$$I_{2N}^* = \frac{I_{2a20} + I_{2b20}}{2}; \quad I_{1N}^* = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_{2N}^* \quad (22)$$

Valorile recalculat pentru curenţii nominali folosind caracteristicile externe nu trebuie să difere cu mai mult de  $\pm 10\%$  faţă cele calculate la punctul 2.2.

Se verifică raportul dintre curentul secundar nominal şi curentul secundar de scurtcircuit:

$$I_{2sc} \cong (1,1 \dots 1,3) \cdot I_{2N}^* \quad (23)$$

#### 4. Determinarea pierderilor de putere şi a randamentului

##### 4.1. Pierderile în miez

$$\Delta P_{Fe} = M_{Fe} \cdot p_{Fe} \quad (24)$$

unde masa miezului feromagnetic este:

$$M_{Fe} = \gamma_{Fe} \cdot V_{Fe} = \gamma_{Fe} \cdot [2m \cdot n \cdot (L_j + L_c)] \quad (25)$$

Densitatea miezului se consideră  $\gamma_{Fe} = 7600 [kg/m^3]$ . Pierderile specifice în miez,  $p_{Fe} [W/kg]$  se determină din catalogul de miezuri din tole de oţel electrotehnic (orientativ,  $p_{Fe} = 0,5 W/kg$ , la 1 [T] şi 50 [Hz], pentru tole din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate, cu grosimea de 0,35mm).

##### 4.2. Pierderile în înfăşurări

Pierderile se determină pentru curenţii nominali recalculaţi la punctul 3.3:

$$\Delta P_{Cu1N} = R_1 \cdot I_{1N}^{*2}; \quad \Delta P_{Cu2N} = R_2 \cdot I_{2N}^{*2} \quad (26)$$

##### 4.3. Randamentul transformatorului

Puterile nominale se determină cu relaţiile:

$$P_{2N} = U_{2N} \cdot I_{2N}^* \\ P_{1N} = P_{2N} + (\Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu1N} + \Delta P_{Cu2N}) \quad (27)$$

corespunzător unei tensiuni secundare nominale  $U_{2N} = 20 [V]$ , conform pct. 3.3.

Randamentul nominal al transformatorului este:

$$\eta_N = \frac{P_{2N}}{P_{1N}} > 0,8 \quad (28)$$

#### 5. Factorul de putere şi condensatorul de compensare

##### 5.1. Factorul de putere

Factorul de putere se calculează în două situaţii:

- La funcţionarea în regim de sarcină nominală:

$$\cos \varphi_{1N} = \frac{P_{1N}}{U_{1N} \cdot I_{1N}^*} \quad (29,a)$$

- La funcţionarea în gol:

$$\cos \varphi_{10} = \frac{\Delta P_{Fe} + R_1 \cdot I_{10}^2}{U_{1N} \cdot I_{10}} \quad (29,b)$$

unde curentul primar de gol,  $I_{10}$ , şi componentele sale activă,  $I_{10a}$ , respectiv reactivă,  $I_{10r}$ , sunt date de relaţiile, Fig. 2:

$$I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10r}^2} \\ I_{10a} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_{1N}} \\ I_{10r} = \frac{2 \cdot (H_c \cdot L_c + H_j \cdot L_j) + 2\delta \cdot H_\delta}{\sqrt{2} \cdot N_1} \quad (30)$$

Valorile intensităţii câmpului magnetic în coloană, respectiv în jug,  $H_c \cong H_j$ , se determină din curba de magnetizare a miezului considerat, iar intensitatea  $H_\delta$  corespunzătoare întrefierului  $\delta = 0,1 \dots 0,3 [mm]$ , se calculează cu relaţia:

$$H_\delta = \frac{B_c}{\mu_0} \quad (31)$$

##### 5.2. Calculul bateriei de condensatoare

Calculul se face pentru regimul nominal, în condiţiile compensării la factorul de putere neutral,  $\cos \varphi_n = 0,92$ .

- Capacitatea condensatorului este:

$$C = \frac{P_{1N} \cdot (tg \varphi_{1N} - tg \varphi_n)}{2\pi \cdot f \cdot U_{1N}^2} \quad (32)$$

Din catalog, se alege un condensator, sau o grupare, având capacitatea de valoare apropiată celei calculate, Fig. 5.

- Rezistorul de descărcare al bateriei se calculează cu relația:

$$R_d = \frac{t_d}{C \cdot [\ln(\sqrt{2}U_{1N}) - \ln(U_{cadm})]} \quad (33)$$

unde se consideră, [6]:

$$t_d \leq 60[s] \quad U_{cadm} \leq 42[V] \quad (34)$$

- Puterea disipată în rezistorul de descărcare:

$$P_d = \frac{U_{1N}^2}{R_d} \quad (35)$$

Schema generală de alimentare a transformatorului de sudare, cu condensatorul de compensare și rezistorul de descărcare, este prezentată în Fig.5.

### Bibliografie

- [1] I. Şora, N. Golovanov (coordonatori), *Electrotermie și Electrotehologii. Vol. 2, Electrotehologii.* Editura Tehnică, București, 1999.
- [2] I. Novac, I. Şora, *Mașini electrice. Îndrumător de proiectare.* Lito I.P. Timișoara, 1964.
- [3] \*\*\* STAS 685-74 – Sârmă rotundă de cupru pentru conductoare de bobinaj.
- [4] \*\*\* STAS 2873-68 – Sârme și bare dreptunghiulare din cupru și benzi din cupru pentru scopuri electrotehnice.
- [5] \*\*\* Normativ pentru proiectarea și executarea instalațiilor electrice cu tensiuni până la 1000 Vca și 1500 Vcc, indicativ NP-I7-02, ICECON SA.

### ANEXĂ FIGURI

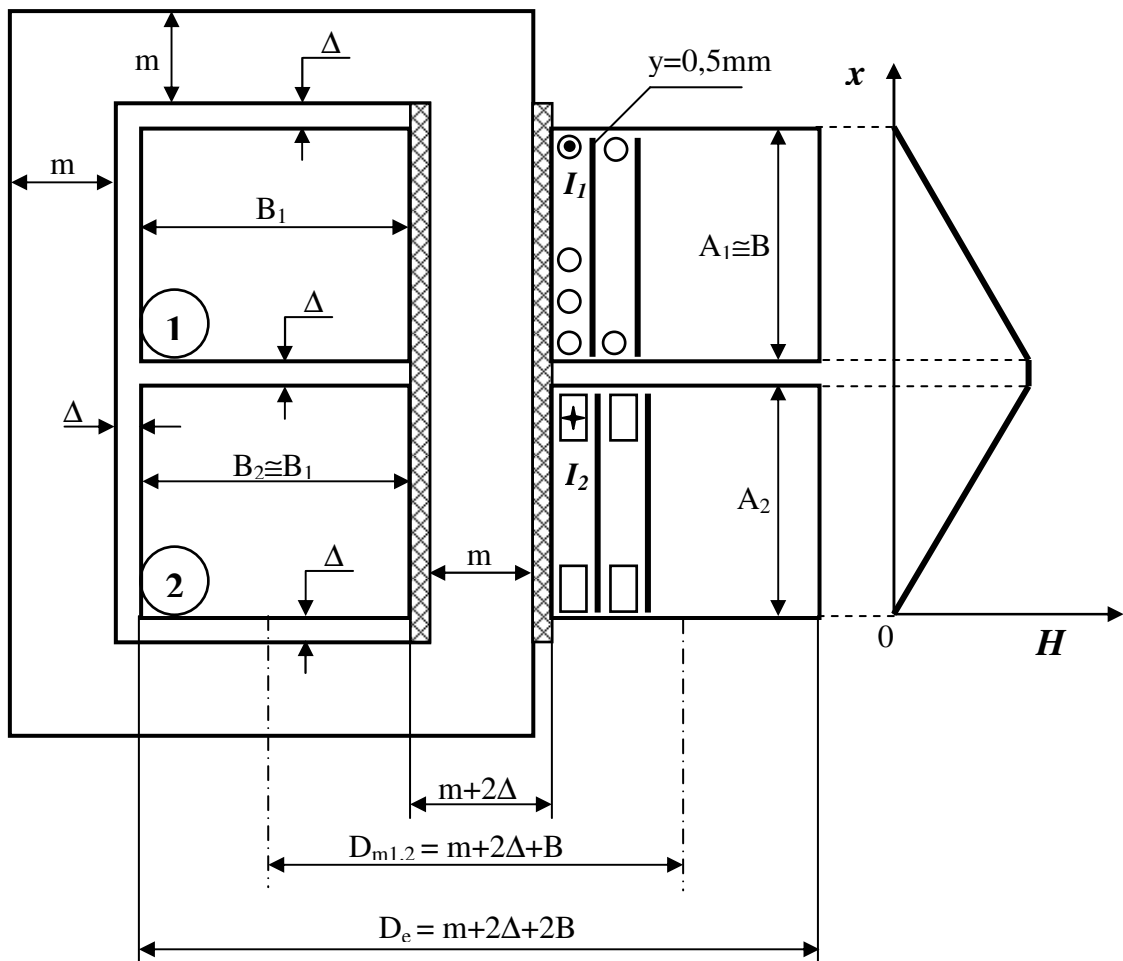


Fig. 1. Dimensiunile bobinajului transformatorului și variația intensității câmpului magnetic.

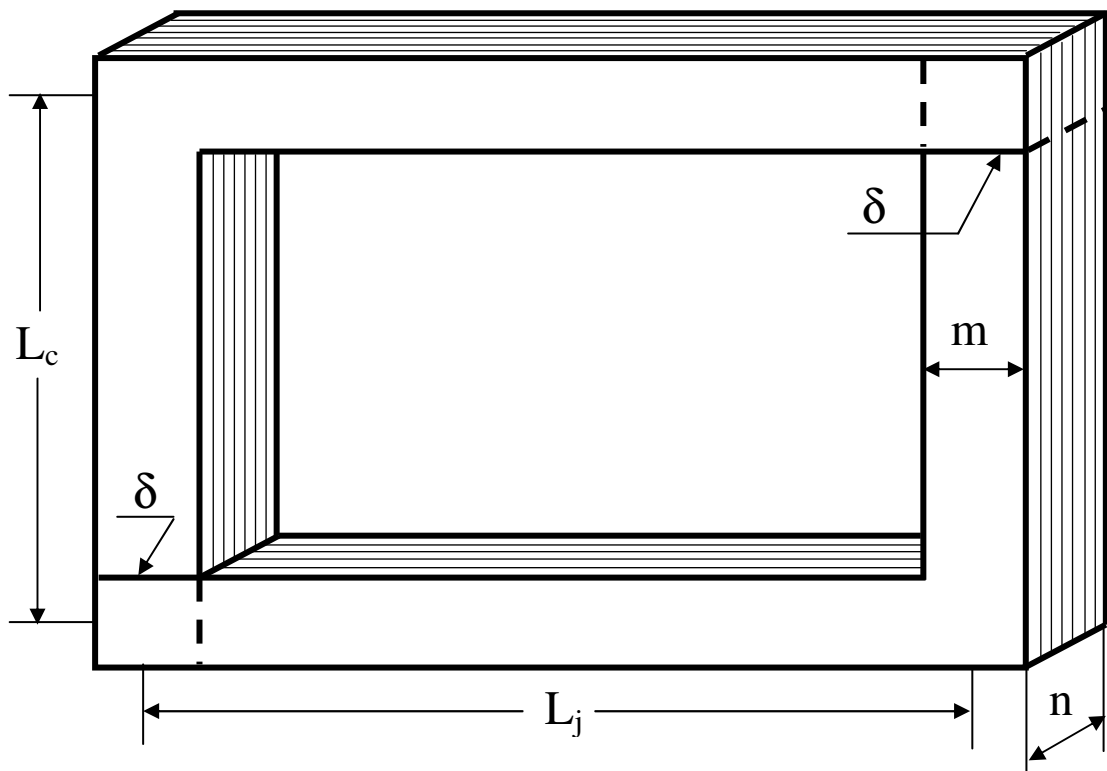


Fig. 2. Dimensiunile miezului feromagnetic.

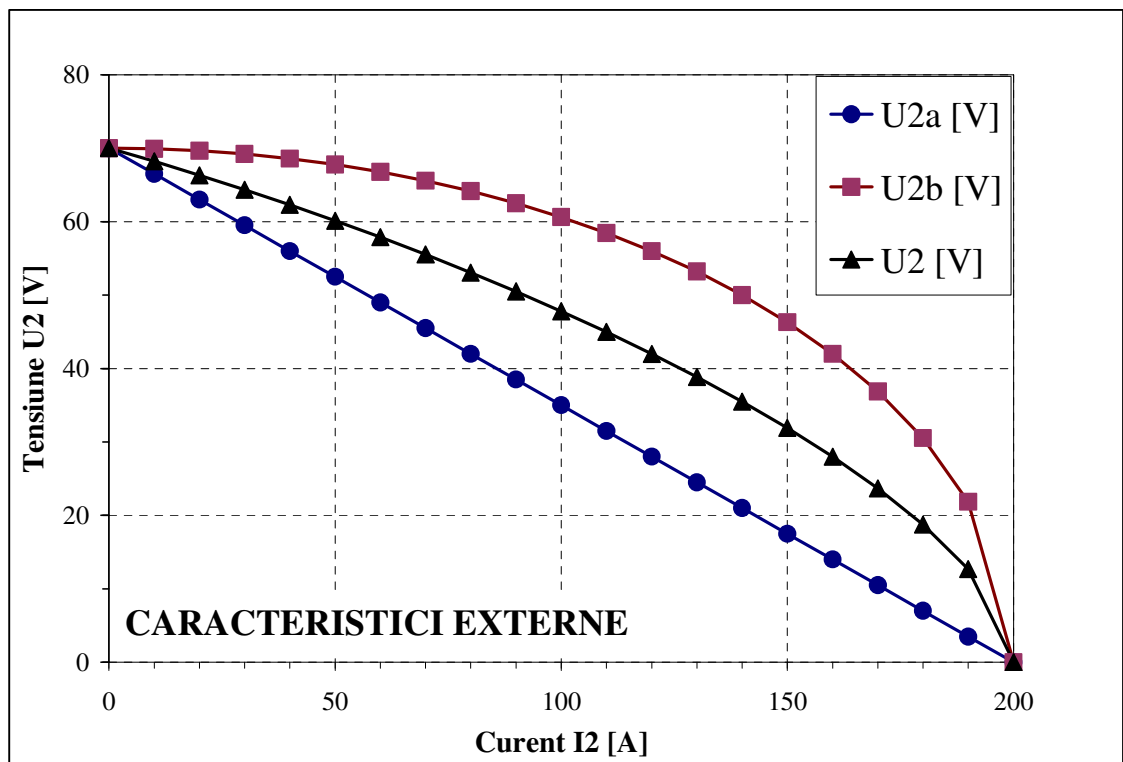


Fig. 3. Caracteristici externe ale transformatorului de sudare.

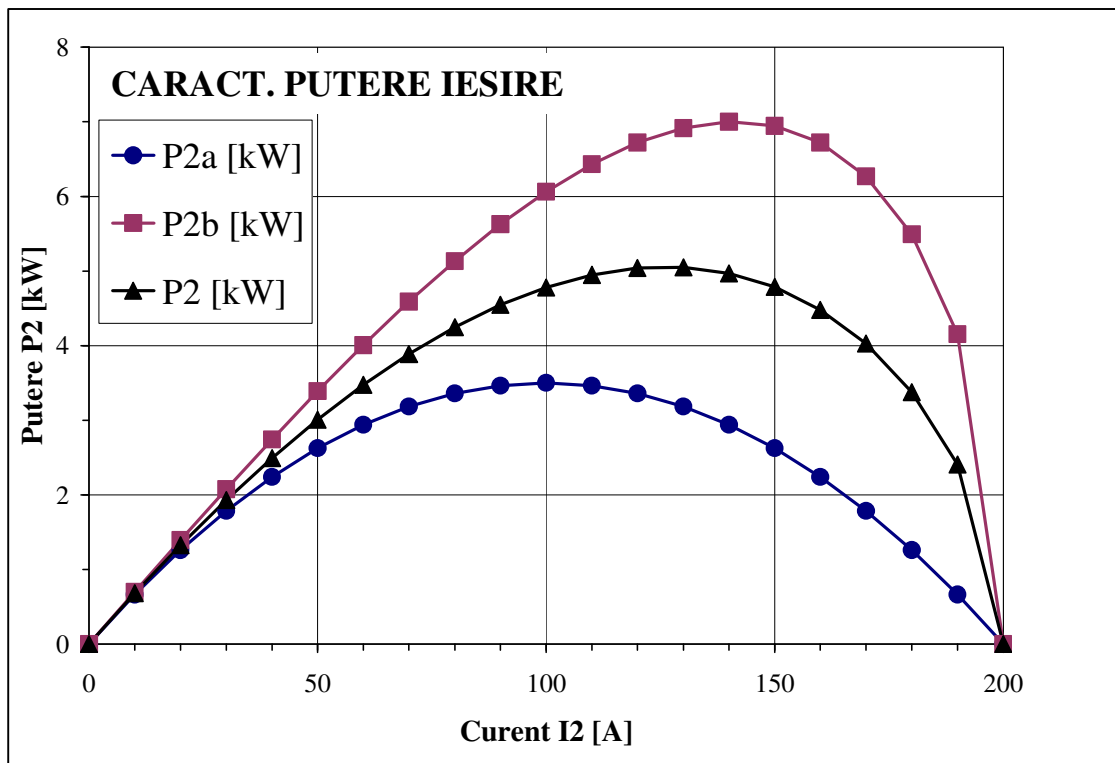


Fig. 5. Caracteristici ale puterii de ieșire la transformatorul de sudare

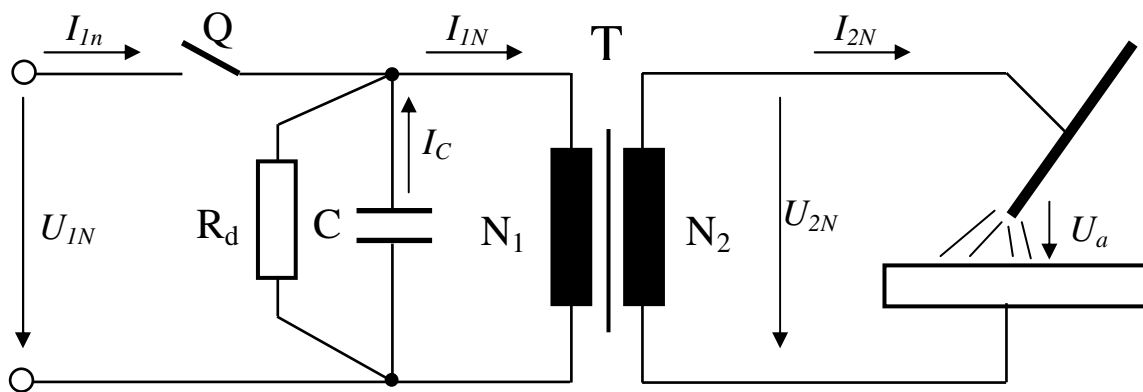


Fig. 5. Schema de conectare a transformatorului pentru sudare cu arc electric.