

ANEXA A6*

TEHNOLOGIA ȘI PROIECTAREA TRANSFORMATORULUI DE REȚEA MONOFAZIC DE MICĂ PUTERE

A6.1 Generalități

Prezentarea de față are ca scop cunoașterea structurii constructive, a tehnologiei de fabricație, precum și a metodologiei de proiectare a transformatorului de rețea de mică putere ($P < 500\text{W}$), utilizat în alimentarea aparaturii electronice.

Transformatorul de rețea monofazic, de mică putere, este o componentă prezentă în multe scheme de alimentare a aparaturii electronice de tip staționar. El este destinat să modifice valoarea tensiunii și curentului, de la nivelul oferit de rețea circuitului primar, la nivelul sau nivelele necesare în circuitul sau circuitele secundare. Transformatorul oferă în plus și izolarea galvanică față de rețeaua de curent alternativ, a șasiului aparatului electronic în care este încorporat, asigurând electrosecuritatea persoanelor care îl manipulează. Din punct de vedere constructiv, un transformator de rețea de mică putere, prezintă următoarele părți componente principale, vezi fig. A6.1:

- carcasă electroizolantă;
- bobinaj
- miez feromagnetic, din tole de tablă silicioasă (format E+I, U+I, I), din benzi (cu coloane, în manta, toroidale)
- sistem de strângere a miezului magnetic și de fixare a transformatorului de șasiul aparatului electronic

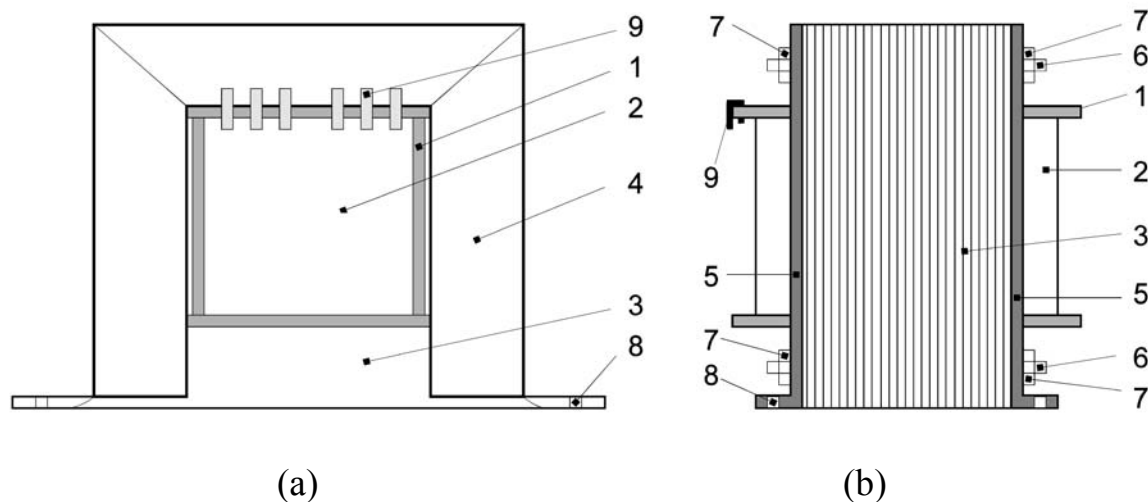


Fig. A6.1 (a) Transformator de rețea asamblat cu manta; (b) Transformator de rețea asamblat cu prezoane; 1- carcasă, 2- bobinaj, 3- miez magnetic, 4- manta de strângere, 5- eclise de prindere, 6- prezoane de strângere, 7- piulițe, 8- orificii de fixare, 9- cose.

*Acest material este conceput pentru a fi utilizat ca suport pentru temele de casă, și se referă numai la o anumită variantă constructivă, realizată în anumite condiții, cu anumite materiale electrotehnice. Unii coeficienți din formulele utilizate trebuie modificați atunci când se aplică relațiile pentru alte materiale și alte condiții de proiectare.

În prezent transformatorul de alimentare clasic este înlocuit în multe aplicații cu sursele de alimentare în comutație (SMPS), care funcționează la frecvențe mari (>20kHz) și care au la rândul lor un transformator cu miez de ferită. Datorită eficienței mai mari, puterii specifice crescute, greutatea redusă, prețului mai mic aceste surse sunt folosite tot mai intens. Unul din avantajele pe care încă îl mai are transformatorul clasic este simplitatea și de aici fiabilitatea ridicată. Un alt avantaj este legat de emisiile electromagnetice reduse, care pot fi supărătoare la unele surse de alimentare în comutație. Dintre echipamentele electronice în care încă se utilizează transformatorul de rețea cu miez feromagnetic amintim: amplificatoare de semnal audio de înaltă performanță, unele echipamente de măsură, cuptoare cu microunde, anumite stații de lipit (Weller), anumite încărcătoare pentru echipamente mobile, și altele. De asemenea, aceste transformatoare sunt folosite în circuite care trebuie să funcționeze la frecvența rețelei de alimentare, de exemplu transformatoare separatoare de rețea sau invertoare pentru surse ne-interruptibile (UPS).

În cele ce urmează toate referirile se vor face la miezul feromagnetic cu tole de tip E+I.

A6.2. Tehnologia de realizare a transformatorului de rețea monofazic, de mică putere

Realizarea unui transformator de rețea monofazic, de mică putere, în producția de serie, implică următoarele etape tehnologice:

a) *obținerea tolelor*, din tablă de ferosiliciu (oțel cu conținut ridicat de siliciu) obținută conform unor standarde, prin ștanțare în matriță;

b) *tratatamentul termic al tolelor ștanțate* (recoacere la temperatura de cca. 850°C, urmată de răcire lentă), pentru detensionare mecanică și refacerea proprietăților magnetice, afectate de procesul de prelucrare mecanică;

c) *realizarea carcasei*, prin injecție de material plastic în matriță sau prin montaj din elemente constitutive specifice, obținute în prealabil prin ștanțare, din preșpan, textolit, pertinax, steclostratitex, etc.;

d) *bobinarea înfășurărilor*, pe carcasa obținută anterior, cu ajutorul unor mașini de bobinat semiautomate sau automate, utilizând conductori din cupru izolați cu email, realizați în conformitate cu anumite standarde. Vom folosi standardul românesc (STAS 685-58);

Observație:

Bobinarea transformatoarelor de rețea se poate realiza, în funcție de cerințele tehnico-economice impuse, în două tehnici:

- "fără izolație între straturi"
- "cu izolație între straturi"

În primul caz se bobinează în următoarea ordine:

- 1) înfășurarea primară;
- 2) se introduc consecutiv două straturi de folie de izolație "trafo" (hârtie specială parafinată sau folie de poliester, cu grosimea de $30\div 50\mu\text{m}$);
- 3) prima înfășurare secundară, urmată de introducerea unui strat de izolație, etc;
- 4) întreaga bobină se mai izolează în final și la exterior.

În al doilea caz, se introduce către un strat de izolație după fiecare strat de spire bobinate.

e) *introducerea tolelor în carcasă* - operație denumită "lamelarea transformatorului".

Observație:

În cazul transformatorului de rețea, neexistând componentă de curent continuu, se realizează o lamelare întreșesută, adică se introduc alternativ, pe o parte și pe cealaltă a carcusei, mai întâi tolele de tip **E**, apoi cele de tip **I**. Ultimele 2-3 tole se introduc forțat, prin batere ușoară cu un ciocan din cupru sau alamă, transformatorul fiind așezat pe o placă din oțel. Lamelarea neîntreșesută se realizează prin introducerea în carcasă, pe aceeași parte, a tuturor tolelor **E**, respectiv **I**. În acest fel se obține un întrefier în circuitul magnetic. Această variantă de lamelare se utilizează la transformatoare (sau bobine) care sunt străbătute și de o componentă de curent continuu, cum ar fi transformatoarele de audiofrecvență.

f) *strângerea miezului magnetic* cu o manta sau cu scoabe, prezoane și piulițe pentru a împiedica vibrația tolelor în timpul funcționării transformatorului.

Observație:

Mantaua se realizează prin ștanțare, din tablă de oțel TDA cu grosimea de $1\div 1,25\text{mm}$, după care se acoperă galvanic prin zincare pasivizată. În anumite aplicații se practică și ecranarea transformatorului, cu ajutorul unor capace laterale, executate prin ambutisare din TDA, sau prin aplicarea unei spire în scurtcircuit, din folie de cupru care înconjoară bobinajul și miezul magnetic pe exterior.

g) *impregnarea transformatorului* prin imersie în parafină topită sau în lac poliuretanic (de ex. 3503 Ez) care polimerizează prin încălzire în cuptor, la o temperatură de $80\div 100^{\circ}\text{C}$, timp de cca. 1 oră.

Observație:

Impregnarea transformatoarelor de rețea se realizează într-o incintă cu capac etanș, care mai întâi se videază la $10^{-1}\div 10^{-2}$ torr (pentru eliminarea urmelor de apă, de pe bobinaj și din hârtia de izolație trafo), după care se introduce impregnantul respectiv.

h) *Controlul tehnic de calitate* în cadrul căruia se verifică parametrii electrici (tensiunea sau tensiunile din secundar, rezistența înfășurărilor, raportul de transformare, rezistența de izolație între înfășurări, respectiv între primar și miezul magnetic) și mecanici ai produsului.

A6.3. Proiectarea transformatorului de rețea monofazic, de mică putere

A6.3.1. Noțiuni introductive

Pentru a înțelege mai ușor metoda proiectării unui transformator de rețea se cer precizate mai întâi unele noțiuni care vor interveni în calcule.

Tipul de toală - De obicei se utilizează tole cu dimensiuni standardizate de tip E+I "economice", fig. A6.2.a denumite astfel, întrucât dintr-o bandă de tablă silicioasă de lățime adecvată se obțin prin ștanțare, concomitent, două tole E și două tole I, fără a se pierde din suprafața utilă a materialului, fig. A6.2.b. Dimensiunile tolei economice se precizează prin litera E, urmată de a[mm], care reprezintă dimensiunea de bază (parametrul) tolei. Astfel, există următoarele tipuri de tole standardizate de tip economic: E5; E6,4; E8; E10; E12,5; E14; E16; E18; E20; E25; E32. Principalii parametri geometrici ai unei tole standardizate de tip E+I economică sunt prezentați în figura A6.2.a.

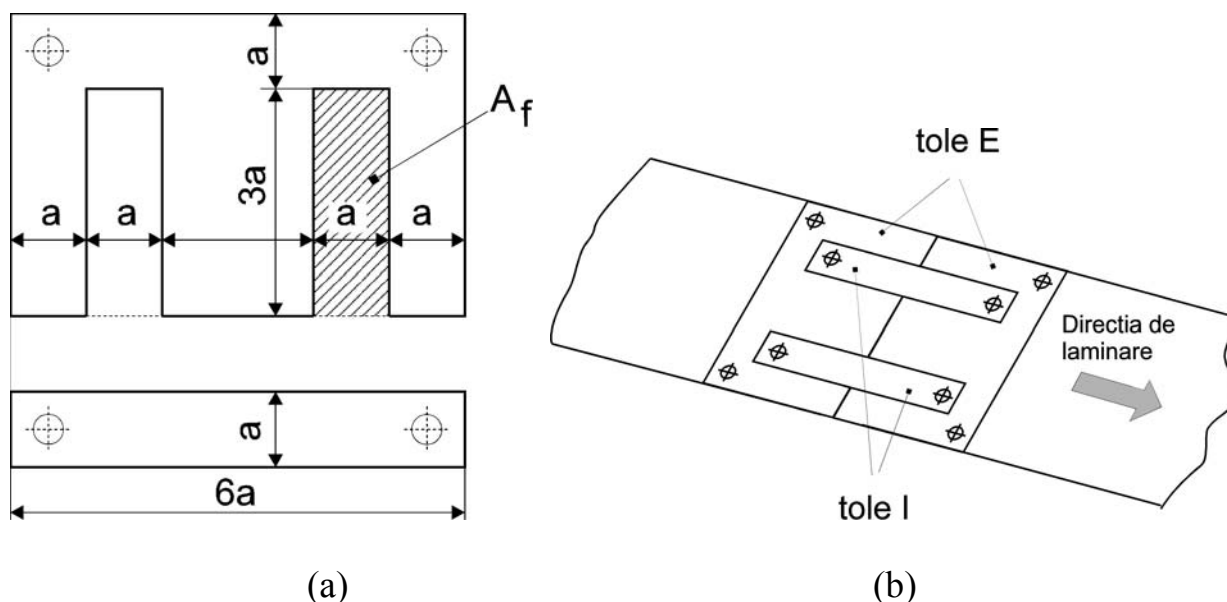


Fig. A6.2 (a) Dimensiunile caracteristice tolei standardizate de tip economic; A_f - aria ferestrei tolei; (b) Obținerea tolelor economice.

Grosimea tolelor este și ea standardizată la valorile $g_1=0,35\text{mm}$ și respectiv, $g_2=0,5\text{mm}$.

Aria ferestrei tolei $A_F[\text{cm}^2]$ - reprezintă suprafața destinată introducerii înfășurărilor și este prezentată hașurat în figura A6.2.a. Valoarea acesteia este:

$$A_F[\text{cm}^2]=0,03 \cdot a^2[\text{mm}]$$

Secțiunea în fier $S_{Fe}[\text{cm}^2]$ - reprezintă aria secțiunii miezului magnetic situat în interiorul carcasi bobinate, figura A6.3.a. Mărimea sa este:

$$S_{Fe}[\text{cm}^2]=0,02 \cdot a[\text{mm}] \cdot b[\text{mm}],$$

unde $b[\text{mm}]$ - reprezintă grosimea pachetului de tole

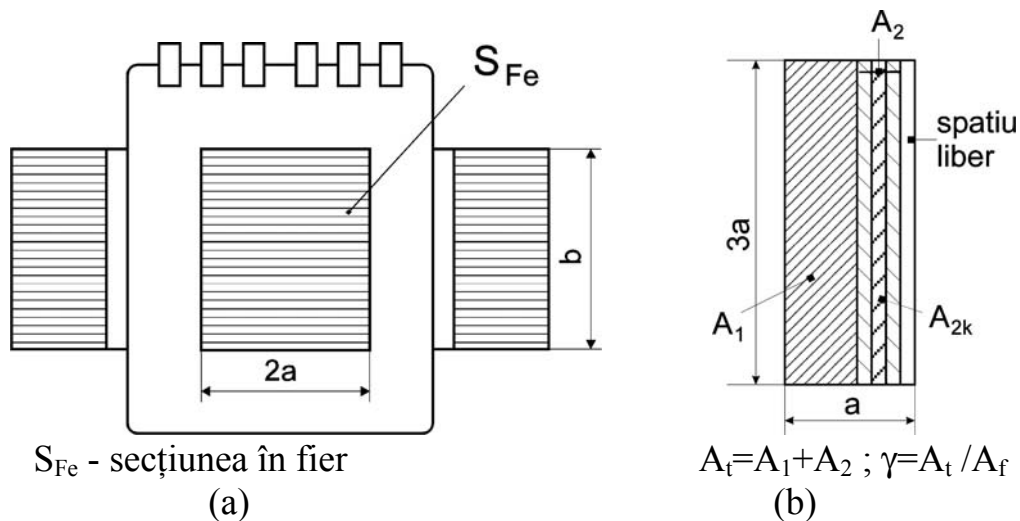


Fig. A6.3 (a) Secțiune transversală printr-un transformator de rețea;
(b) Repartizarea spațiului în fereastra tolei.

Factorul de umplere a ferestrei tolei γ - definit ca raportul dintre aria totală, ocupată de înfășurări în fereastra tolei, $A_t[\text{cm}^2]$ și aria ferestrei, $A_f[\text{cm}^2]$, conform relației:

$$\gamma = \frac{A_t[\text{cm}^2]}{A_f[\text{cm}^2]} = \frac{A_1[\text{cm}^2] + A_2[\text{cm}^2]}{0,03 \cdot a^2[\text{mm}]},$$

unde $A_1[\text{cm}^2]$ - reprezintă aria ocupată de înfășurarea primară;

$A_2[\text{cm}^2]$ - reprezintă aria ocupată de înfășurarea sau înfășurările secundare;

(A_{2k} - aria ocupată de înfășurarea secundară k);

$$A_t[\text{cm}^2] = A_1[\text{cm}^2] + A_2[\text{cm}^2] - \text{aria totală ocupată de înfășurări.}$$

Observație:

Pentru ca un transformator de rețea să se poată realiza ușor în producția de serie, valoarea optimă pentru factorul de umplere este $\gamma_0=0,7$ dar, în general se poate accepta o valoare $\gamma \in [0,64 \div 0,76]$. Un factor de umplere prea mare duce la dificultăți în faza de lamelare, la introducerea tolelor iar un factor de umplere mic este neeconomic, transformatorul fiind supradimensionat.

A6.3.2. Date inițiale de proiectare

Proiectarea unui transformator de rețea, de mică putere, se face pornindu-se de la următoarele mărimi cunoscute (date inițiale de proiectare):

- $U_1[\text{V}]$ - valoarea eficace a tensiunii din primar, reprezentând de regulă, tensiunea rețelei monofazice, de curent alternativ (110V, 220V);
- $f[\text{Hz}]$ - frecvența rețelei monofazice, de curent alternativ;
- k - numărul de înfășurări secundare;
- $U_{2k}[\text{V}]$ - tensiunea eficace în sarcină, în înfășurarea secundară k ;
- $I_{2k}[\text{A}]$ - curentul eficace în sarcină, în înfășurarea secundară k ;

- $B_M[T]$ - inducția maximă admisă în miezul magnetic;
 - Procedeeul de bobinare implementat ("cu sau fără izolație între straturi"), impus de condițiile electrice și climatice, în care se va utiliza transformatorul de rețea respectiv. În figura A6.4 este reprezentată schema electrică a unui transformator de rețea, cu mărimile specificate mai sus.

Prin proiectarea transformatorului de rețea se urmărește determinarea prin calcul a datelor necesare realizării sale în practică și anume:

n_1 - numărul de spire din înfășurarea primară;

n_{2k} - numărul de spire din înfășurarea secundară k ;

$d_1[mm]$ - diametrul conductorului de bobinaj, din înfășurarea primară;

$d_{2k}[mm]$ - diametrul conductorului de bobinaj, din secundarul k ;

$a[mm]$ - tipul de tolă standardizată ce se utilizează astfel încât, $\gamma_{Standard} \in [0,64 \div 0,76]$;

$b[cm]$ - grosimea pachetului de tole;

N - numărul de tole necesar

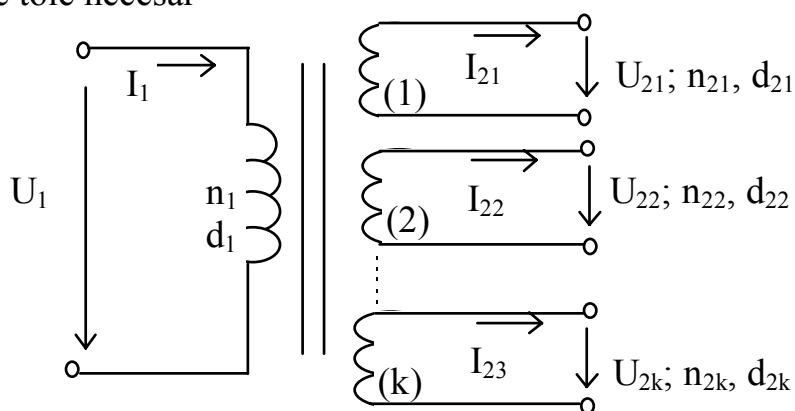


Fig. A6.4 Schema electrică a transformatorului de rețea.

A6.3.3. Metodologia de proiectare a transformatorului de rețea monofazic, de mică putere

Proiectarea unui transformator de rețea cuprinde următoarele etape de calcul:

a) se evaluează puterea totală absorbită din secundar, $P_2[W]$, astfel:

$$P_2[W] = \sum_k P_{2k} = \sum_k U_{2k} I_{2k}$$

b) se calculează puterea absorbită în primar, $P_1[W]$, pentru un randament estimat al transformatorului, $\eta=0,85$;

$$P_1[W] = \frac{P_2[W]}{\eta} = \frac{P_2[W]}{0,85} = 1,176 \cdot P_2[W]$$

Observație:

Într-un transformator de rețea real există pierderi prin magnetizare (histerezis) și prin curenți turbionari (Foucault) în miezul magnetic, precum și pierderi prin efect Joule în conductorii de cupru ai înfășurărilor. Aceste pierderi conduc la încălzirea miezului și a conductorului înfășurărilor, în timpul funcționării transformatorului. Pentru un transformator de rețea cu puterea $P_1 \approx 100W$, realizat cu tole E+I românești, pierderile prin magnetizare se pot aprecia la cca. 8%,

pierderile prin curenți turbionari la cca. 2% și pierderile prin efect Joule la cca. 5%, deci un total pierderi estimate la cca. 15%, ceea ce justifică randamentul de mai sus.

c) se dimensionează secțiunea în fier, $S_{Fe}[cm^2]$ a miezului magnetic, cu relația:

$$S_{Fe}[cm^2] = 1,2 \cdot \sqrt{P_1[W]}$$

Observație:

Legătura dintre secțiune și putere se explică prin aceea că, datorită formei circuitului magnetic, spațiul disponibil pentru înfășurări este limitat. Când puterea crește, aria ocupată de înfășurări crește, iar aria ferestrei tolei este proporțională cu S_{Fe} . De asemenea, la putere mare crește și puterea pierdută, ceea ce impune creșterea S_{Fe} , pentru a se mări suprafața de răcire (suprafața de contact a miezului cu aerul, reprezentată de suprafața laterală a pachetului de tole). Experimental, s-a ajuns la valoarea optimă a coeficientului de proportionalitate dintre secțiune și putere și anume 1,2.

d) se calculează numărul de spire pe volt n_0 , cu relația:

$$n_0 = \frac{45 \div 48}{S_{Fe}}$$

dedusă din legea inducției electromagnetice, pentru $f=50\text{Hz}$ și $B_M=1,2\text{T}$.

Observație:

Relația de mai sus a fost dedusă astfel:

Tensiunea U , indusă într-o înfășurare cu n spire, conform legii inducției electromagnetice, are expresia:

$$U_{\max} = -n \frac{d\Phi_{\max}}{dt}, \text{ dar } \Phi_{\max} = B_{\max} \cdot S_{Fe}, \text{ iar } U_{\max} = \sqrt{2}U_{ef}$$

În regim permanent armonic (sinusoidal), derivarea unei mărimi este echivalentă cu înmulțirea acesteia cu $\omega=2\pi f$, astfel că se obține:

$$\sqrt{2} \cdot U_{ef} = 2\pi \cdot f \cdot n \cdot B_{\max} \cdot S_{Fe}, \text{ de unde } n_0 = \frac{n}{U_{ef}} \text{ are expresia:}$$

$$n_0 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S_{Fe}} = \frac{1}{4,44 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S_{Fe}}$$

Pentru $f=50\text{Hz}$, $B_{\max}=B_M=1,2\text{T}$ și S_{Fe} exprimat în cm^2 , relația de mai sus devine:

$$n_0[sp/V] = \frac{10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot S_{Fe}[cm^2]} = \frac{38}{S_{Fe}[cm^2]}$$

Cifra teoretică de mai sus, 38, se majorează la valoarea $45 \div 48$, întrucât miezul magnetic nu trebuie să ajungă la saturație nici la tensiunea de 242V (220V+10%) în primar și nici în cazul conectării unora dintre înfășurările secundare în scheme de redresare, caz în care aceste înfășurări vor fi parcurse și de o componentă de

curent continuu, care va produce o magnetizare suplimentară a miezului. Se recomandă utilizarea valorii 48, deoarece ea corespunde unui regim termic optim (cca. 60°C) al transformatorului, verificat experimental, conducând la o bună concordanță a valorilor măsurate cu cele calculate, evitându-se intrarea în saturație a miezului, chiar în condițiile cele mai nefavorabile. Dacă frecvența rețelei este diferită de 50Hz sau B_M este diferit de 1,2T, coeficientul de la numărător se va majora cu aceeași valoare procentuală ca și creșterea de la 38 la 48 (procentul de majorare a fost verificat pentru cazurile în care $B_M=0,8\div 1,2T$).

e) se calculează numărul de spire din înfășurarea primară n_1 , cu relația:

$$n_1 = n_0 \cdot U_1$$

Observație:

Valoarea rezultată n_1 se rotunjește, prin adaos, la următoarea valoare întreagă

f) se determină numărul de spire din secundarul k, n_{2k} , cu relația:

$$n_{2k} = 1,1 \cdot n_0 \cdot U_{2k}$$

Observație:

În relația de mai sus, n_0 s-a majorat cu 10% pentru a se compensa căderea de tensiune în sarcină, pe secundarul k. Valoarea rezultată pentru n_{2k} , se rotunjește prin adaos, la următoarea valoare întreagă.

g) se determină mărimea curentului din primar, I_1 , cu relația:

$$I_1 [A] = \frac{P_1 [W]}{U_1 [V]}$$

h) se dimensionează diametrele conductoarelor de bobinaj d_1 [mm], pentru primar, respectiv d_{2k} [mm], pentru secundarul k, cu relația:

$$d_{1;2k} [mm] = 0,65 \sqrt{I_{1;2k} [A]}$$

Observație:

Relația de mai sus s-a dedus pentru o densitate de curent maxim admisibilă

$J_M = \frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}} = 3 \left[A / mm^2 \right]$. Valoarea rezultată prin calcul pentru diametrul

conductorului, $d_{1;2k}$, se rotunjește prin adaos la valoarea standardizată imediat superioară, din Tabelul A6.1, după cum urmează:

- pentru $d_{1;2k} \leq 0,7$ mm; numai dacă depășirea de către valoarea calculată a valorii standardizate imediat inferioară, este $>2,5\%$;
- pentru $0,7 < d_{1;2k} \leq 1$ mm; numai dacă depășirea de către valoarea calculată a valorii standardizate imediat inferioară, este $>5\%$;
- pentru $d_{1;2k} > 1$ mm; numai dacă depășirea de către valoarea calculată a valorii standardizate imediat inferioară, este $>10\%$.

În celelalte cazuri, rotunjirea se va face la cea mai apropiată valoare standardizată inferioară.

i) se calculează ariile ocupate de înfășurarea primară, $A_1[\text{cm}^2]$, respectiv de înfășurarea secundară, $A_2[\text{cm}^2]$, în fereastra tolei, utilizându-se coeficienții de umplere C_1 sau C_2 indicați în tabelul A6.1, în funcție de procedeul de bobinare adoptat, conform relațiilor:

$$A_1[\text{cm}^2] = \frac{n_1}{C_{1;2}} \quad A_2[\text{cm}^2] = \sum_k A_{2k} = \sum_k \frac{n_{2k}}{C_{1;2}}$$

Observație:

Coeficienții de umplere au fost stabiliți experimental, în condițiile producției de serie, pentru fiecare diametru standardizat.

j) se calculează aria totală ocupată de înfășurări $A_t[\text{cm}^2]$ cu relația:

$$A_t[\text{cm}^2] = A_1[\text{cm}^2] + A_2[\text{cm}^2]$$

k) se dimensionează tola necesară, respectiv se determină mărimea parametrului $a[\text{mm}]$, pentru un factor de umplere optim $\gamma_0=0,7$, cu relația:

$$a[\text{mm}] = \sqrt{\frac{A_t[\text{cm}^2]}{0,03 \cdot 0,7}} = 6,9 \cdot \sqrt{A_t[\text{cm}^2]}$$

Observație: Dacă valoarea determinată prin calcul pentru a nu este standardizată, atunci se poate alege valoarea standardizată cea mai apropiată, atât prin lipsă cât și prin adaos, cu condiția ca valoarea factorului de umplere cu tola standardizată aleasă să îndeplinească condiția:

$$\gamma_{\text{Standard}} \in [0,64 \div 0,76], \quad \text{unde } \gamma_{\text{Standard}} = \frac{A_t[\text{cm}^2]}{0,03 \cdot a_{\text{Standard}}^2[\text{mm}]}$$

l) se calculează grosimea pachetului de tole $b[\text{mm}]$, cu tola standardizată, utilizându-se relația:

$$b[\text{mm}] = \frac{S_{Fe}[\text{cm}^2]}{0,02 \cdot a_{\text{Standard}}[\text{mm}]}$$

m) se evaluează numărul de tole necesar, N funcție de grosimea acestora $g_{1,2}$ ($g_1 = 0,35\text{mm}$; $g_2 = 0,5\text{mm}$)

$$N[\text{tole}] = \frac{b[\text{mm}]}{g_{1;2}[\text{mm}]}$$

Observație:

Numărul de tole obținut N , se rotunjește la valoarea întregă prin adaos.

Tabelul A6.1 Diametre standardizate și coeficienți de umplere pentru conductoare de bobinaj.

Diametrul standardizat al conductorului [mm]	C_1 [sp/cm ²] (cu izolație între straturi)	C_2 [sp/cm ²] (fără izolație între straturi)
0,05	13250	16150
0,07	8330	9700
0,1	4460	6100
0,12	3190	4120
0,15	2260	2880
0,18	1730	2050
0,2	1465	1715
0,22	1210	1460
0,25	978	1140
0,28	813	925
0,3	722	807
0,35	530	594
0,4	350	470
0,45	277	371
0,5	224	300
0,55	190	252
0,6	162	209
0,65	142	180
0,7	125	153
0,8	95,5	127
0,9	78	93
1	65	75
1,2	40,5	52
1,5	26,5	33,5
2	15,5	19

A6.3.4. Exemplu de proiectare a unui transformator rețea monofazic, de mică putere

Se cere să se proiecteze un transformator de rețea, având următoarele date inițiale:
 $U_1=220V$; $f=50Hz$; $U_{21}=6,3V$; $I_{21}=0,3A$; $U_{22}=U_{23}=15V$; $I_{22}=I_{23}=2,54A$; $B=1,2T$;

Se vor considera ambele procedee de bobinare, "cu izolație între straturi" și "fără izolație între straturi".

Calcululele se desfășoară conform metodologiei de proiectare indicate, după cum urmează:

a) se evaluează puterea totală absorbită din secundar, P_2 :

$$P_2 = 6,3 \cdot 0,3 + 2 \cdot 15 \cdot 2,54 = 78,09 \text{ W}$$

b) se calculează puterea absorbită în primar, P_1 pentru $\eta = 0,85$;

$$P_1 = 78,09 / 0,85 = 91,87 \text{ W}$$

c) se determină secțiunea miezului magnetic, S_{Fe} ;

$$S_{Fe} = 1,2 \cdot \sqrt{91,87} = 11,5 \text{ cm}^2$$

d) se calculează numărul de spire/V, n_0 , necesar:

$$n_0 = 48 / 11,5 = 4,173 \text{ sp/V}$$

e) se determină numărul de spire din înfășurarea primară, n_1 :

$$n_1 = 4,173 \cdot 220 = 918,06 \text{ sp.}$$

Observație:

Valoarea obținută se poate rotunji la $n_1 = 920$ spire, pentru a fi ușor reținută și urmărită de către operatorul mașinii de bobinat, toleranța admisă în acest caz fiind sub 1%, ceea ce este acceptabil;

$$t = \frac{920 - 918,06}{918,06} \cdot 100\% = 0,21\% < 1\%$$

f) se calculează numărul de spire necesar pentru cele trei înfășurări secundare:

$$n_{21} = 1,1 \cdot 4,173 \cdot 6,3 = 28,91 \text{ sp}$$

$$n_{22} = n_{23} = 1,1 \cdot 4,173 \cdot 15 = 68,85 \text{ sp}$$

Observație:

Valorile rezultate prin calcul se rotunjesc la $n_{21} = 29$ sp și respectiv, $n_{22} = n_{23} = 69$ sp

g) se evaluează curentul din înfășurarea primară, I_1 :

$$I_1 = 91,87 / 220 = 0,417 \text{ A}$$

h) se dimensionează diametrele conductoarelor de bobinaj din primar, d_1 și pentru secundare, d_{2k} ;

$$d_1 = 0,65 \cdot \sqrt{0,417} = 0,419 \text{ mm}$$

$$d_{21} = 0,65 \cdot \sqrt{0,3} = 0,365 \text{ mm}$$

$$d_{22} = d_{23} = 0,65 \cdot \sqrt{2,54} = 1,035 \text{ mm}$$

Pe baza indicațiilor date la metodica de proiectare, se aleg diametrele standardizate:

$$d_1 = 0,45 \text{ mm}; d_{21} = 0,35 \text{ mm}; d_{22} = d_{23} = 1 \text{ mm}$$

i) se calculează ariile ocupate de înfășurări în fereastra tolei, în ambele procedee de bobinare:

- cu izolație între straturi - $A_1 = \frac{920}{277} = 3,321 \text{ cm}^2$

$$A_2 = \frac{29}{530} + 2 \cdot \frac{69}{65} = 2,177 \text{ cm}^2$$

- fără izolație între straturi - $A_1' = \frac{920}{371} = 2,479 \text{ cm}^2$

$$A_2' = \frac{29}{594} + 2 \cdot \frac{69}{75} = 1,888 \text{ cm}^2$$

j) se evaluează ariile totale, ocupate de înfășurări, în ambele cazuri:

$$A_t = 3,321 + 2,177 = 5,498 \text{ cm}^2;$$

$$A_t' = 2,479 + 1,888 = 4,367 \text{ cm}^2$$

k) se dimensionează tola necesară în ambele situații:

$$a = 6,9 \cdot \sqrt{5,498} = 16,17 \text{ mm}$$

$$a' = 6,9 \cdot \sqrt{4,367} = 14,41 \text{ mm}$$

Se aleg tolele standardizate E16 și respectiv E14 și se verifică factorul de umplere cu tola standardizată, γ_{Standard} :

$$\gamma_{\text{Standard}} = \frac{5,498}{0,03 \cdot 16^2} = 0,71$$

$$\gamma_{\text{Standard}}' = \frac{4,367}{0,03 \cdot 14^2} = 0,74$$

Tolele se acceptă întrucât γ_{Standard} și $\gamma_{\text{Standard}}' \in [0,64; 0,76]$

l) se calculează grosimea pachetului de tole b, respectiv b', utilizându-se tolele standardizate alese:

$$b = \frac{11,5}{0,02 \cdot 16} = 35,93 \text{ mm}$$

$$b' = \frac{11,5}{0,02 \cdot 14} = 41,07 \text{ mm}$$

m) se determină numărul de tole necesar în ambele cazuri, pentru $g_1 = 0,35 \text{ mm}$;

$$N = \frac{35,93}{0,35} = 102,65 \text{ tole}$$

$$N' = \frac{41,07}{0,35} = 117,34 \text{ tole}$$

Valorile obținute se rotunjesc prin adaos la $N = 103$ tole și respectiv, $N' = 118$ tole.