

T.e.m. saturată, conform relației (13.160, b)

$$\begin{aligned} E_{os(1)} &= \sqrt{U_1^2 + 2U_1 I_1 (x_{d_s} \sin \varphi + r_1 \cos \varphi) + I_1^2 x_{d_s}^2} = \\ &= \sqrt{1^2 + 2 \cdot 1 \cdot 0,5(1,275 \cdot 0,6 + 0,0263 \cdot 0,8) + 0,5^2 \cdot 1,275^2} = 1,48 \text{ u.r.} \end{aligned} \quad (14.270, b)$$

T.e.m. E_0'' și curentul de excitație corespunzător, conform relațiilor (13.161, e) rezultă

$$E_{0(1)}'' = E_{os(1)} \frac{E_0'(1)}{E_{1(1)}} = 1,48 \cdot \frac{1,14}{1,04} = 1,62 \text{ u.r.}$$

și deci

$$I_{e(1)} = I_{e0} \frac{E_0'(1)}{E_0'} = 1 \cdot \frac{1,62}{1,042} = 1,55 \text{ u.r.} \quad (14.271)$$

unde $E_0' = 1,042$ u.r. este t.e.m. de pe caracteristica liniară, corespunzătoare tensiunii nominale $U_{1N} = 1$ u.r. de pe caracteristica reală (pentru $I_{e0} = 1$ u.r.).

● Se procedează similar și pentru alte punete, obținându-se caracteristica de reglaj reprezentată în figura 14.13, corespunzătoare tensiunii nominale și factorului de putere nominal.

Partea a treia

CONSTRUCȚIA ȘI CALCULUL TRANSFORMATOARELOR ELECTRICE

Capitolul 15. ELEMENTELE CONSTRUCTIVE ALE TRANSFORMATOARELOR

Transformatorul electric este un aparat static cu două sau mai multe înfășurări cuplate magnetic, cu ajutorul căruia se schimbă valorile mărimilor electrice ale puterii în curent alternativ (tensiunea și curentul), frecvența rămânând aceeași.

Funcționarea transformatorului are la bază fenomenul de inducție electromagnetică. Pentru realizarea unui cuplaj magnetic cât mai strâns, înfășurările sînt așezate pe un miez feromagnetic. La frecvențe mai mari de 10 kHz transformatorul se realizează fără miez feromagnetic.

● În funcție de destinația lor, în principal, transformatoarele sînt:

- de putere, care alimentează anumiți consumatori sau conectează între ele diferite sisteme energetice (în această categorie se includ și autotransformatoarele);

- de măsură, prin intermediul cărora se pot măsura caracteristicile unui anumit sistem, de înaltă tensiune sau curenți mari, cu aparatele de măsurat obișnuite, transformatoare care pot fi incluse și în categoria aparatelor electrice.

Dintre acestea, probleme deosebite ridică transformatoarele de putere și, în special, cele de puteri și tensiuni mari, chiar dacă tehnologia de fabricație a ambelor categorii este asemănătoare.

Transformatoarele de puteri mici ($S_N < 1$ kVA) au, de regulă, răcire naturală în aer și se numesc transformatoare uscate. Cele de puteri mai mari au răcire în ulei, deși în ultimul timp s-au construit și transformatoare uscate cu puteri de pînă la 1 600 kVA.

● Cele mai importante elemente constructive ale transformatoarelor sînt:

- miezul feromagnetic;
- înfășurările;
- scheletul;
- construcția metalică;
- accesoriile.

15.1. CONSTRUCȚIA MIEZULUI FEROMAGNETIC

Miezul feromagnetic, denumit în unele lucrări prescurtat miezul magnetic, reprezintă calea de închidere a fluxului principal al transformatorului, flux produs de solenația de magnetizare a înfășurării primare care se alimentează de la o tensiune alternativă. Este, așadar, miez pentru flux variabil, fiind magnetizat ciclic, cu frecvența tensiunii de alimentare a înfășurării primare.

La transformatoarele de putere, utilizate la frecvența industrială, miezul feromagnetic este construit din tole de oțel electrotehnic aliat cu siliciu și izolate între ele. Utilizarea tolelor conduce la micșorarea pierderilor prin curenți turbionari, iar alierea oțelului cu siliciu asigură pierderi relativ reduse, datorate atât curenților turbionari, cât și fenomenului de histerezis [4].

În etapa actuală, în construcția miezurilor de transformatoare se utilizează frecvent tolele din oțel electrotehnic laminate la rece, cu cristale orientate numite și *tole texturate*, izolate cu *carlit* (izolație ceramică), care prezintă o creștere a permeabilității magnetice în direcția laminării și o îngustare a suprafeței ciclului histerezis, în acest fel micșorându-se pierderile de magnetizare și puterea specifică de magnetizare (deci și solenația de magnetizare).

Pierderile prin histerezis, în cazul când liniile de câmp au direcția paralelă cu direcția de laminare, reprezintă mai puțin de 50% din cele măsurate în situația când liniile de câmp sînt perpendiculare pe aceasta, astfel că, deseori, pierderile în direcții care nu coincid cu direcția de laminare sînt mai mari decît în cazul tablei laminate la cald [15].

Izolația ceramică (carlitul) este o acoperire anorganică a tablei, produsă printr-un tratament de suprafață atât termic, cât și chimic, care protejează tabla atât împotriva ruginii în timpul stocării, cât și contra oxidării în timpul recoacerii (la cca 800°C).

Tabla laminată la rece cu cristale orientate își schimbă într-o măsură importantă caracteristicile, ca urmare a modificării structurii cristalografice în timpul tăierii, ștanțării, îndoirii sau lovirii tolelor. De aceea, pentru îmbunătățirea calității tolelor, a fost necesară introducerea operației de *recoacere* a lor chiar la fabricile de transformatoare, înaintea împachetării miezului.

Recoacerea se poate face la miezuri împachetate, la pachete de tole sau, cel mai des, tolă cu tolă. Măsurînd cu aparatul Epstein pierderile specifice la frecvența de 50 Hz și la inducția de 1,5 T după debitarea tolelor de tip M4 și M5, de exemplu, se obțin $p_{15} = 1,12$ W/kg și respectiv $p_{15} = 1,17$ W/kg; după recoacerea tolă cu tolă, la 810°C, a acelorași pachete, se obțin valorile $p_{15} = 0,89$ W/kg și, respectiv, $p_{15} = 0,97$ W/kg.

Din punct de vedere constructiv, miezul feromagnetic pentru transformatoare se compune din coloanele 1 (fig. 15.1), al căror număr depinde de tipul și de numărul de faze ale transformatorului și jugurile 2, care servesc la închiderea liniilor de câmp magnetic între coloane.

La transformatoarele de putere, jugul superior este astfel construit încît să se poată demonta sau despacheta, pentru introducerea bobinelor.

Există două metode de a executa miezurile: cu îmbinare prin suprapunere și prin întrefesere.

Potrivit primei metode, coloanele și jugurile se execută separat, iar după aceasta miezul se assemblează cu buloane speciale de strîngere. Este necesar, ca, în întrefierul de îmbinare care rezultă, să se prevadă garnituri izolante, rezistente la temperatură, cu scopul de a înlătura mărirea curenților turbionari prin scurtcircuitarea tolelor coloanelor de către cele două juguri și invers [13].

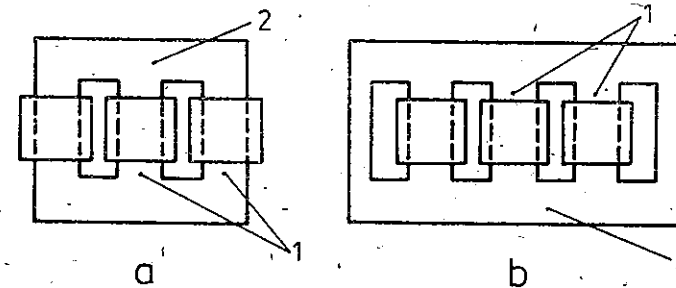


Fig. 15.1. Miezuri de transformatoare trifazate: a — cu trei coloane; b — cu cinci coloane.

Conform metodei a doua (prin întrefesere), o tolă a coloanei alternează cu o tolă a jugului (fig. 15.2), înlăturîndu-se dezavantajul întrefierului net parazit al îmbinării prin suprapunere. Se observă însă că, în zona de îmbinare, liniile de câmp magnetic, pe anumite porțiuni (hașurate fig. 15.3, a), au direcția perpendiculară pe cea a orientării cristalelor, ceea ce duce la creșterea pierderilor în fier și a curentului de magnetizare. De aceea, metoda expusă se practică, în special, în cazul tolelor din tablă netexturată (la miezurile transformatoarelor de mică putere, împachetate din tole profil).

Cînd se folosește tabla laminată la rece cu cristale orientate, la transformatoarele de mare putere la care diametrul cercului circumscris coloanelor depășește 1 m, una din metodele pentru micșorarea pierderilor în colțuri este folosirea construcției în cadre (fig. 15.3, b), caz în care volumul colțurilor în care direcția liniilor de câmp magnetic nu coincide cu direcția longitudinală de laminare se reduce la jumătate. O atenție deosebită trebuie acordată, însă, dimensionării ramelor deoarece, la aceleași solenații de magnetizare, se poate ajunge la saturarea excesivă a ramei interioare, care are o lungime medie a liniei de câmp mai mică.

Pentru tolele din tablă laminată la rece cu cristale orientate, asamblarea dintre coloane și juguri se face, prin țesirea tolelor cum este indicat în figura 15.4, a...d (pentru colțuri) și în figura 15.5 (pentru un miez trifazat).

Modul de asamblare prin țesere a tolelor texturate sau cu cristale orientate, are o influență însemnată și asupra curentului de magnetizare. Acest

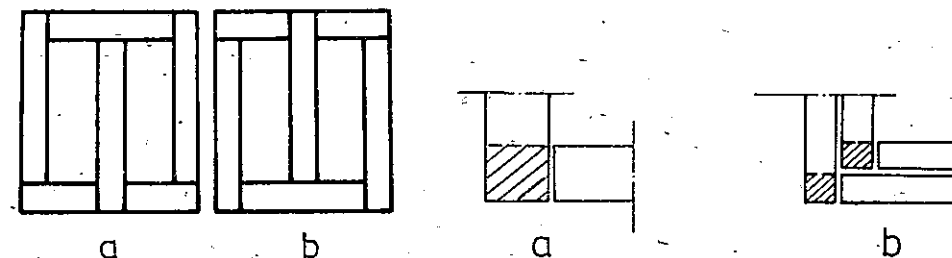


Fig. 15.2. Straturi de tole consecutive (alternind) la un miez feromagnetic pentru un transformator trifazat.

Fig. 15.3. Zonele cu pierderi în fier mărite la tabla silicioasă laminată la rece: a — în execuția normală a miezului; b — în execuția cu cadre.

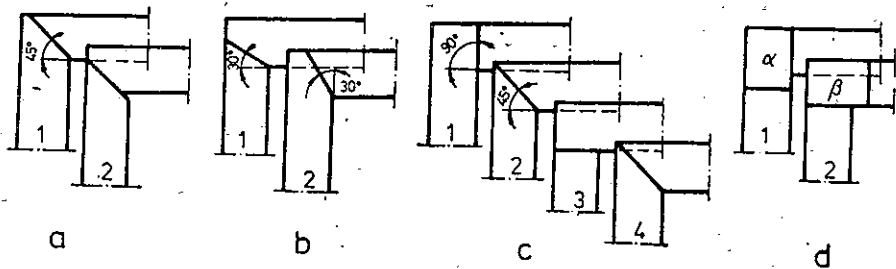


Fig. 15.4. Modul de asamblare prin țesire (la colțuri) a tolelor din tablă laminată la rece cu cristale orientate:

a — țesire la 45° ; b — țesire la 30° ; c — țesire la $45^\circ/90^\circ$; d — țesire combinată (dreptunghiurile α și β din tablă laminată la cald).

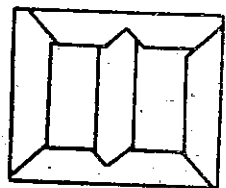
curent este la un miez asamblat prin țesere sub un unghi de 90° , de circa trei ori mai mare decât în cazul asamblării unui miez prin țesere sub un unghi de 45° [15]. Folosirea buloanelor prin tole laminare la rece cu cristale orientate conduce atât la creșterea pierderilor în fier (prin curenți turbionari și prin devierea liniilor de câmp magnetic de la direcția de laminare), cât și la mărirea consumului de putere reactivă pentru magnetizare (prin micșorarea secțiunii efective a fierului).

Rezultă deci că, la miezurile asamblate prin țesere din tablă laminată la rece cu cristale orientate, trebuie să se tindă la construcții fără buioane și la o asamblare prin țesere sub un unghi de 45° .

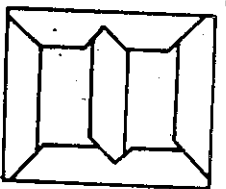
Miezurile feromagnetice ale transformatoarelor se pot clasifica după mai multe criterii.

• După forma constructivă a coloanei, se deosebesc:

— miezuri cu secțiunea dreptunghiulară sau pătrată, folosite în special la transformatoarele mici (până la 5 kVA);



a



b

— miezuri cu secțiunea în trepte (fig. 15.6), urmărindu-se înscrierea secțiunii coloanei într-un cerc, astfel încât coeficientul de umplere cu fier al cercului să fie cât mai mare.

• După modul de răcire a miezului, există:

— miezuri compacte — fără canale (fig. 15.6, a);

— miezuri divizate — cu canale (fig. 15.6, b, c), folosite la transformatoare mari, prin canale circulând uleiul de răcire.

• După forma tolei utilizate, se întâlnesc:

— miezuri împachetate din tole simple (debitate din benzi);

— miezuri împachetate din tole profil (fig. 15.7);

— miezuri feromagnetice spiralizate.

La transformatoarele monofazate și bifazate cu miezuri din tole profil, cu puteri sub 3 kVA, tolele corespunzătoare circuitelor magnetice pot avea o mare diversitate de forme. Întreprinderile constructoare de transformatoare mici au normalizat o parte din aceste forme, în special cele care se decupează fără

Fig. 15.5. Două straturi succesive de tole ale unui miez trifazat asamblat prin țesere la 45° : a — strat par; b — strat impar.

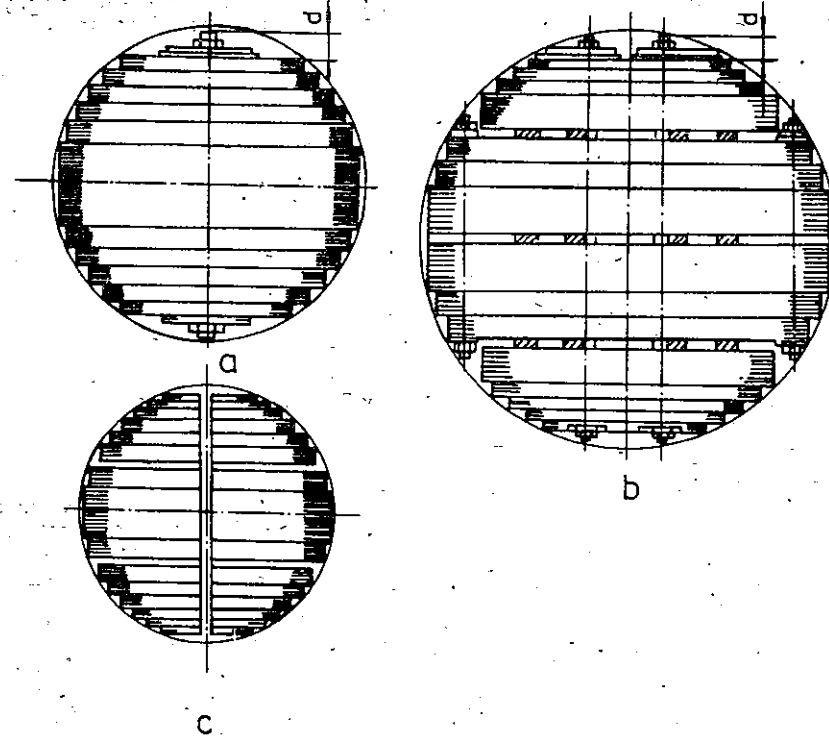
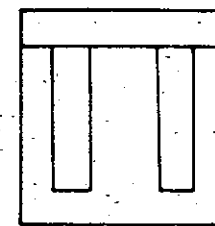
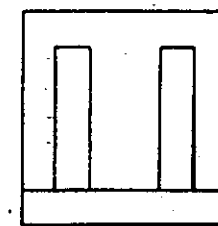


Fig. 15.6. Secțiuni prin coloanele miezurilor de transformator: a — fără canale de răcire; b — cu canale longitudinale; c — cu două canale longitudinale și un canal transversal.



Strat par



Strat impar

Fig. 15.7. Modul de împachetare prin țesere a miezurilor din tole de profil E și I.

deșeu, de tip U, I și E, ca de exemplu în figura 15.8. Decuparea acestor tole fără deșeu nu se face din tablă texturată, deoarece nu se poate respecta principiul ca direcțiile de magnetizare și cele de laminare să coincidă atât la coloane cât și la juguri, ci din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate, folosită de obicei la mașinile electrice rotative.

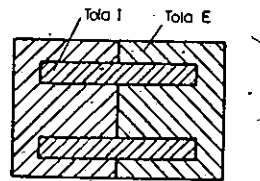
• După numărul de coloane, se deosebesc:

— miezuri cu două coloane;

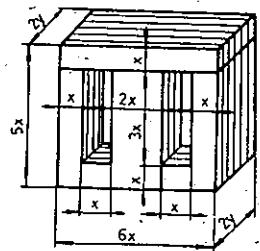
— miezuri cu trei coloane;

— miezuri cu cinci coloane, întâlnite, de regulă, la transformatorul trifazat în manta;

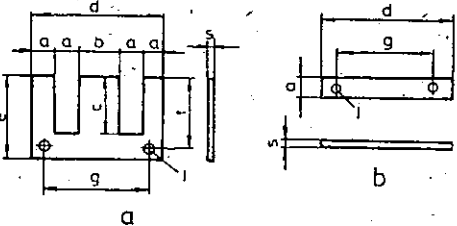
— miezuri în manta (fig. 15.9).



Plan de tăiere fără pierderi la tola tip EI



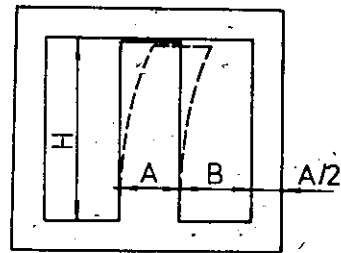
Configurația geometrică a tolei economice de tip EI



Tipul de tola economică EI

Fig. 15.8. Tole decupate fără deșeuri pentru transformatoare mici.

Fig. 15.9. Tola a miezului de transformator monofazat în manta.



La transformatoarele trifazate, miezurile cu cinci coloane sînt folosite în cazurile cînd utilizarea unui miez cu trei coloane ar duce la o înălțime mai mare a transformatorului. În cazul transformatoarelor de mare putere, transformatoarele cu cinci coloane sînt utilizate pentru a nu se depăși gabaritul de cale ferată. Trecerea de la o construcție cu trei coloane la una cu cinci coloane și aceeași înălțime a miezului, conduce la creșterea puterii cu 25—35%.

La transformatorul cu coloane, fiecare coloană poartă una sau mai multe înfășurări. La acest tip de transformator fluxul magnetic prin jug este egal cu fluxul prin coloane. În scopul micșorării nesimetriei magnetice, la transformatoarele cu trei coloane în plan (cu flux forțat), aria secțiunii jugului este de 1,05...1,15 ori mai mare decît aria secțiunii coloanei.

La transformatorul cu miezul în manta, coloanele laterale sînt libere și îndeplinesc rolul unor juguri; ariile secțiunilor jugului și coloanelor laterale sînt ceva mai mari decît jumătate din aria secțiunii coloanei care poartă înfășurările.

• După felul strîngerii miezului, se întîlnesc:

- miezuri cu strîngere mecanică (cu buloane, cu tije sudate etc.);
- miezuri lipite (cu lac de încheiere).

15.2. CONSTRUCȚIA INFĂȘURĂRILOR

Înfășurările (a se vedea și paragraful 16.3.3) constituie una din părțile cele mai importante ale unui transformator. Transformatorul trebuie calculat și executat astfel încît mărimile sale de bază (pierderile în înfășurări, tensiunea de scurtcircuit și încălzirile) să fie în concordanță cu valorile prescrise de norme. În același timp, înfășurările trebuie să asigure transformatorului o rigiditate dielectrică suficientă, precum și stabilitate dinamică și termică, astfel încît să garanteze buna funcționare a acestuia și la supratensiunile care apar în exploatare.

În funcție de tensiunea și puterea transformatorului se determină felul izolației, numărul de spire, curentul și deci secțiunea spirelor.

Experiența arată că secțiunea unui conductor de cupru nu trebuie să depășească 60—80 mm², astfel încît, la o densitate de 3—4 A/mm², curentul pentru un conductor să fie de 200—300 A.

În funcție de sensul de depănare, bobinele pot fi pe dreapta (fig. 15.10, a) sau pe stînga (fig. 15.10, b). Sensul bobinării este esențial la realizarea grupei de conexiuni cerute de beneficiar. Depănarea unei bobine pe dreapta sau pe stînga se face atunci cînd începe din stînga, respectiv din dreapta șablonului privit din partea tamburului de pe care se desfășoară sîrma.

Se disting două tipuri principale de înfășurări: înfășurări *concentrice* și înfășurări *alternate*.

Înfășurările de tip concentric se caracterizează prin faptul că bobinele de înaltă tensiune sau scris prescurtat I.T. și de joasă tensiune sau scris prescurtat J.T., au înălțimi aproximativ egale, înfășurarea de înaltă tensiune avînd, în mod obișnuit, diametrul mai mare deoarece este așezată peste cea de joasă tensiune, iar înfășurarea de joasă tensiune diametrul mai mic și așezată în imediata apropiere a coloanei miezului feromagnetic, ca în figura 15.11, a și figura 16.17.

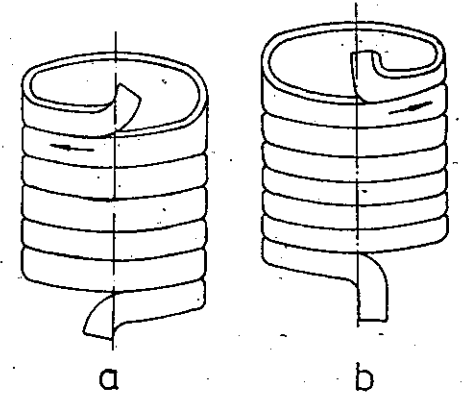


Fig. 15.10. Sensul de depănare la bobinele pentru transformator: a — dreapta; b — stînga.

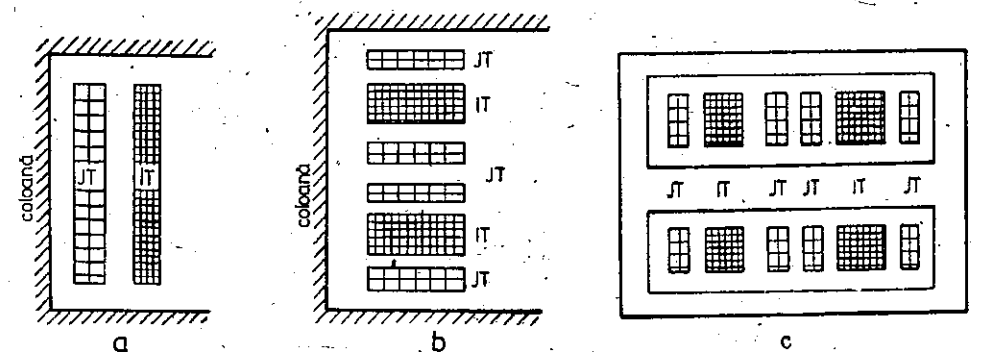


Fig. 15.11. Tipurile principale de înfășurări: a — tip concentric; b — tip alternat; c — tip blindat cu miez în manta și înfășurări alternate (la un transformator monofazat).

În cazul înfășurărilor de tip alternat, diametrele bobinelor de I.T. și de J.T. sînt egale; în schimb, pe înălțimea coloanei transformatorului, bobinele de I.T. alternează cu cele de J.T. ca în figura 15.11, b.

Aproape în exclusivitate se folosesc înfășurările de tip concentric, cele alternate utilizîndu-se la unele transformatoare speciale.

Combinăția dintre înfășurarea de tip alternat și miezul în manta, care formează transformatoare de tip blindat, se vede în figura 15.11, c.

• După forma constructivă, înfășurările pot fi: cilindrice, stratificate, în găleți, continue și spirale.

15.2.1. ÎNFĂȘURĂRILE CILINDRICE

Înfășurarea cilindrică (v. fig. 16.10) reprezintă o spirală cilindrică, ale cărei conductoare au secțiunea dreptunghiulară și sînt în contact strîns. Aceste bobine sînt utilizate, de obicei, la transformatoarele de puteri și tensiuni mici (pînă la 1 600 kVA și 700 V). La capetele bobinei se utilizează egalizatori de capăt din pertinax sau transformerboard (trafoboard). Grosimea egalizatorului de capăt este aproximativ egală cu grosimea fiecărui strat.

Depănarea conductorului se poate face pe lat (în majoritatea cazurilor) sau pe cant, atunci cînd latura mică a conductorului este paralelă cu axa longitudinală a bobinei. În acest din urmă caz apar pierderi suplimentare, datorită refulării curentului, mai mari.

În cazul înfășurării cu mai multe conductoare (fire) în paralel, suprapuse radial, pentru uniformizarea repartiției curentului din conductoarele în paralel, acestea trebuie să fie transpuse (fig. 15.12).

Numărul total de transpuneri în cazul a „m” conductoare (fire) în paralel suprapuse radial, înfășurate pe lat, este de „m - 1”. Realizarea transpoziției are următoarele efecte:

— fiecare dintre conductoarele în paralel ocupă în cîmpul de scăpări aceeași poziție rezultantă;

— fiecare conductor are o aceeași lungime;

— egalitatea reactanțelor și a rezistențelor firelor în paralel (consecința primelor două), ceea ce împiedică apariția curentului de circulație dintre fire.

Un caz particular al înfășurării cilindrice îl constituie înfășurarea în folie, care este utilizată la transformatoare cu puteri pînă la 2 500 kVA și tensiuni pînă la 10-15 kV. Se utilizează, în special, folia de aluminiu cu, grosimi de la 0,025 mm la 2 mm (STAS 5681-74). Înfășurările din folie se pot realiza monobloc, lățimea foliei fiind egală cu înălțimea totală a înfășurării, sau din găleți cu înălțime egală cu lățimea foliei.

Un mare avantaj al foliei de aluminiu este faptul că forțele axiale la scurtcircuit față de o bobină, de aceeași înălțime, din conductor profilat, scad de aproximativ 10 ori [29].

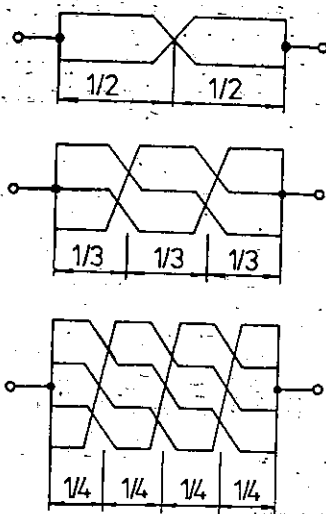


Fig. 15.12: Schemele de transpunere a conductoarelor în paralel.

Folosirea foliei de Al în locul conductorului-profilat clasic presupune și alte avantaje constructive:

— poate fi laminată, în table cu grosime constantă garantată, cu suprafață netedă și lucioasă;

— factorul de umplere al benzii de Al la înfășurarea de joasă tensiune — tipul cilindric — este mai bun;

— bobinele din folie de Al conduc la o bună răcire, transmiterea căldurii făcîndu-se simetric față de axa secțiunii longitudinale;

— solicitările izolației dintre spire sînt mici în comparație cu bobina clasică, deoarece între două straturi apare numai tensiunea pe spiră și, în același timp, cuplajul puternic capacitiv dintre spire servește unei distribuții aproximativ liniare a unei de impuls pe lungimea înfășurării.

15.2.2. ÎNFĂȘURĂRILE STRATIFICATE

Înfășurările stratificate sînt utilizate, de obicei, la transformatoarele de putere cu tensiuni peste 1 kV (unele fabrici constructoare le execută și la tensiuni de 110 kV sau mai mari) și se realizează din conductoare rotunde, cu diametrul pînă la 3-3,5 mm, sau din conductoare profilate cu secțiuni pînă la 30 mm². Acestea sînt înfășurate pe un cilindru izolanț în straturi, în mod continuu (direct sau pe pene).

Avantajele înfășurărilor stratificate constau în execuție ușoară, cu mare productivitate, posibilități de răcire mai bune, bună rezistență la impuls de tensiune (înfășurările stratificate se apropie, din punct de vedere al comportării la impuls, de cele antirezonante). Ecranările interioară și exterioară ale acestor înfășurări, le fac complet antirezonante.

Un dezavantaj al acestor tipuri de înfășurări îl constituie tensiunea mare între straturi, care impune folosirea, între straturi, a unor izolații de hîrtie mai groase, în funcție de tensiunea la care sînt folosite (fig. 15.13).

15.2.3. ÎNFĂȘURĂRILE ÎN GALEȚI

Înfășurările de I.T. (pînă la 60 kV), realizate cu spire multe și conductoare de secțiune mică, se divizează pe înălțime într-o serie de bobine mai mici, numite găleți, separate prin canale cu distanțori sau inele izolanțe. Numărul de găleți în care se divizează înfășurarea se determină din considerente de tensiune (din acest punct de vedere prezentînd avantaj față de înfășurările stratificate), de răcire și, uneori, de rezistență mecanică.

Înfășurările în găleți se realizează din conductori rotunzi, cu diametre cuprinse între 0,5 și 3 mm și/sau din conductori profilați de secțiune mică (de la 8 la 16 mm²). Modul de legare a găleților și tensiunea dintre ei U_{ig} , sînt indicate în figura 15.14, a, cînd găleții se așază normal, sau în figura 15.14, b, cînd fiecare al doilea galet trebuie întors.

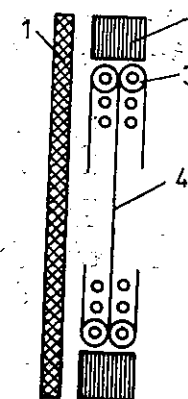


Fig. 15.13. Înfășurare de tip stratificat:

1 — cilindru izolanț; 2 — inele izolanțe de sprijin; 3 — izolații ale spirelor de capăt; 4 — izolații între straturi.

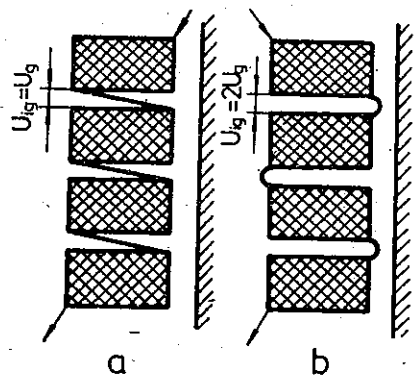
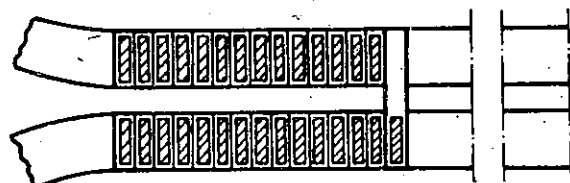


Fig. 15.14. Metode de legare a galeților;
a — galeți neîntorși; b — fiecare al doilea
galeț întors.

Fig. 15.15. Galetul plan dublu
(jumelat).



Folosind un conductor profilat de secțiune nu prea mare, se pot realiza, de asemenea, galeți din mai multe straturi, în mod similar cu cei din conductor rotund. Un galet tipic pentru sîrma profilată este galetul plan dublu (jumelat) reprezentat în figura 15.15.

Într-un galet dublu, ca și la înfășurările spiralate, fiecare conductor este în contact cu uleiul cel puțin pe două laturi (laturile mici). Galeții dubli pot fi depănați cu un singur conductor sau cu cîteva conductoare în paralel. În acest din urmă caz, la trecerea de la un galet la altul, trebuie executată transpoziția. Galeții dubli pot fi folosiți atât pentru înfășurările de înaltă tensiune (transformatoare de putere mai mare), cît și pentru cele de joasă tensiune, galeții fiind legați în paralel sau în serie. În figura 15.16 sînt reprezentate legările galeților dubli în paralel și în serie.

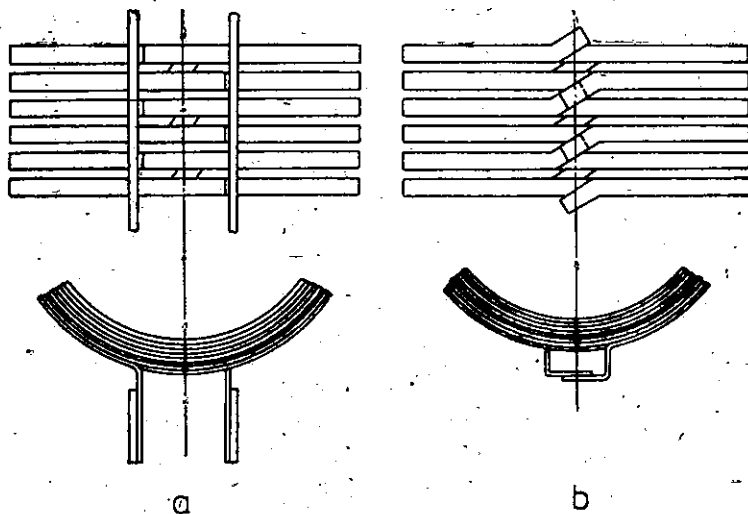


Fig. 15.16. Legarea galeților dubli (jumelați):
a — în paralel; b — în serie;

15.2.4. ÎNFĂȘURĂRILE CONTINUE

Înfășurările continue se fabrică sub formă de galet inseriați fără lipituri, motiv pentru care poartă această denumire. Se execută din conductori de formă dreptunghiulară și sînt specifice tensiunilor ridicate, peste 3 kV. O secțiune prin înfășurarea continuă cu n_g galeți, a câte w_g spire fiecare, este reprezentată în figura 15.17 (vezi și fig. 16.20).

Modul de realizare a unei înfășurări continue, în galeți, este prezentat în paragraful 16.3.3 B, pct. c și figura 16.19.

Galeții sînt separați între ei fie prin rondele de preșpan, fie, cel mai frecvent, prin canale în care circulă uleiul, realizate cu distanțoare așezate uniform pe periferia galetului (vezi fig. 16.20).

Un caz particular îl constituie înfășurările continue de tip întrețesut, adică avînd spirele intercalate, ceea ce conduce la o creștere a capacității longitudinale, fără a recurge la ecrane capacitive speciale. La înfășurările de înaltă tensiune și anume peste 110 kV tensiune nominală, pentru reducerea solicitărilor la impuls de tensiune, în bobinele continue se utilizează tipuri speciale de întrețesere, care au ca efect creșterea capacității serie a bobinei comparație cu capacitatea spre masă, ceea ce conduce la uniformitatea distribuției inițiale a tensiunii de impuls, deci la micșorarea solicitărilor datorate acestei distribuții din zona de intrare a înfășurării.

În figura 15.18 sînt arătate două tipuri de întrețesere mai utilizate, în comparație cu bobina continuă normală. În figura 15.18, a, este arătată o grupă de doi galeți de bobină continuă normală, iar în figura 15.18, b, o aceeași grupă de doi galeți, însă cu spirele întrețesute. În cazul bobinelor continue cu două conductoare în paralel, întrețeserea se realizează după metoda Savoisiene, indicată în figura 15.18, c.

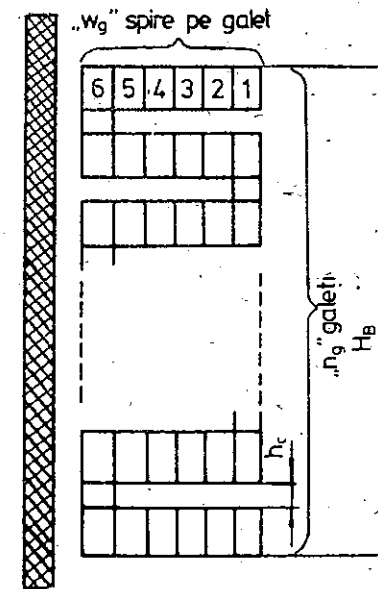


Fig. 15.17. Înfășurare de tip continuu.

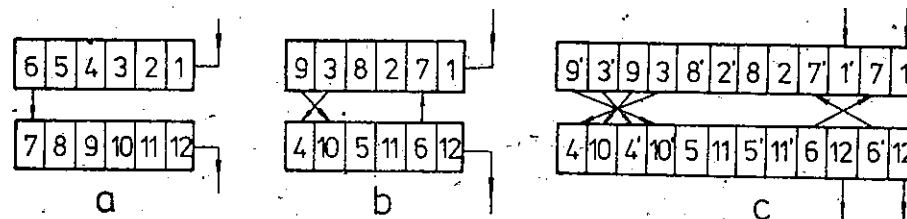


Fig. 15.18. Tipuri de bobine întrețesute:

a — grupă de doi galeți normali; b — grupă de doi galeți întrețesuși după tipul English electric; c — grupă de doi galeți cu două fire în paralel și întrețesuși, după tipul Savoisiene.

15.2.5. ÎNFAȘURĂRILE SPIRALATE

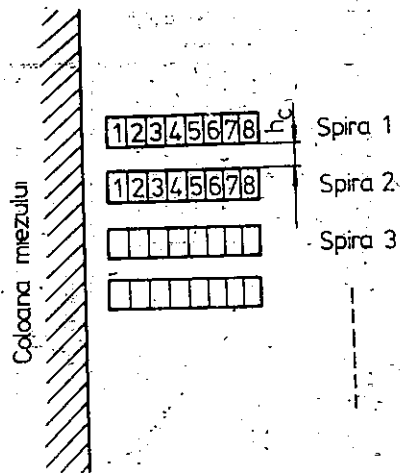


Fig. 15.19. Schema înfășurării spiralate cu 8 conductoare în paralel.

Înfășurările de joasă tensiune ale transformatoarelor de putere medie și mare au nevoie de spire puține și de secțiune mare a conductoarelor, necesitând un număr de conductoare (fire) în paralel mai mare decât șase. În aceste condiții, bobina spiralată este o bobină cilindrică la care spirele nu sînt în contact strîns, ci distanțate, iar conductoarele în paralel sînt suprapuse radial. O secțiune printr-o astfel de bobină va arăta identic cu bobina continuă (fig. 15.17) cu deosebirea că, în loc de w_p spire pe galet, se înțeleg $m = w_p$ conductoare (fire) în paralel pe spirală, un galet fiind deci constituit dintr-o singură spirală.

Înfășurarea spiralată este tipică pentru transformatoare care au curenți de fază mai mari de 1 000 A, fiind folosită atât la tensiuni joase (sub 1 kV), cît și la tensiuni medii (pînă la 35 kV). În cazul în care numărul de conductoare în paralel devine foarte mare, acestea se împart în două, plasîndu-se pe doi galetii paraleli și hobiîndu-se deodată. O astfel de înfășurare se numește *înfășurare dublu spiralată*.

Conductoarele în paralel din care se compune spira sînt izolate, îndoite pe lat și suprapuse radial, unul peste celălalt, cum se arată schematic în figura 15.19, în care s-au considerat 8 conductoare (fire) în paralel. În acest caz, însă, după cum se observă, între cele 8 conductoare se creează diferențe de tensiune și deci curenți de circulație, care provoacă neajunsuri în funcționarea transformatorului prin mărirea pierderilor suplimentare, deși sînt ai aceluiași conductor real. Se impune, deci, pentru egalizarea parametrilor firelor în paralel, *transpoziția* acestora, adică schimbarea poziției pe care o ocupă firele în paralel în timpul depănării bobinei.

Pentru exemplificare, se consideră că o înfășurare cu 8 conductoare elementare în paralel, suprapuse radial, are un total de 16 spire. Rezultă că fiecare conductor trebuie să ocupe aceeași poziție în spirală pe o înălțime din coloană corespunzătoare unui număr de $16/8 = 2$ spire. Acest lucru se realizează efectuîndu-se, la fiecare două spire, o transpunere a conductoarelor, așa cum se arată în figura 15.20, din care reies și pozițiile ocupate de fiecare conductor elementar. Modul de realizare a transpoziției pentru șase conductoare în paralel, suprapuse radial, este indicat în figura 16.16.

15.3. CONSTRUCȚIA SCHELEI

Prin schelă se înțelege ansamblul construcției care îndeplinește următoarele roluri:

- stringerea jugurilor miezului magnetic;
- consolidarea axială a înfășurărilor;

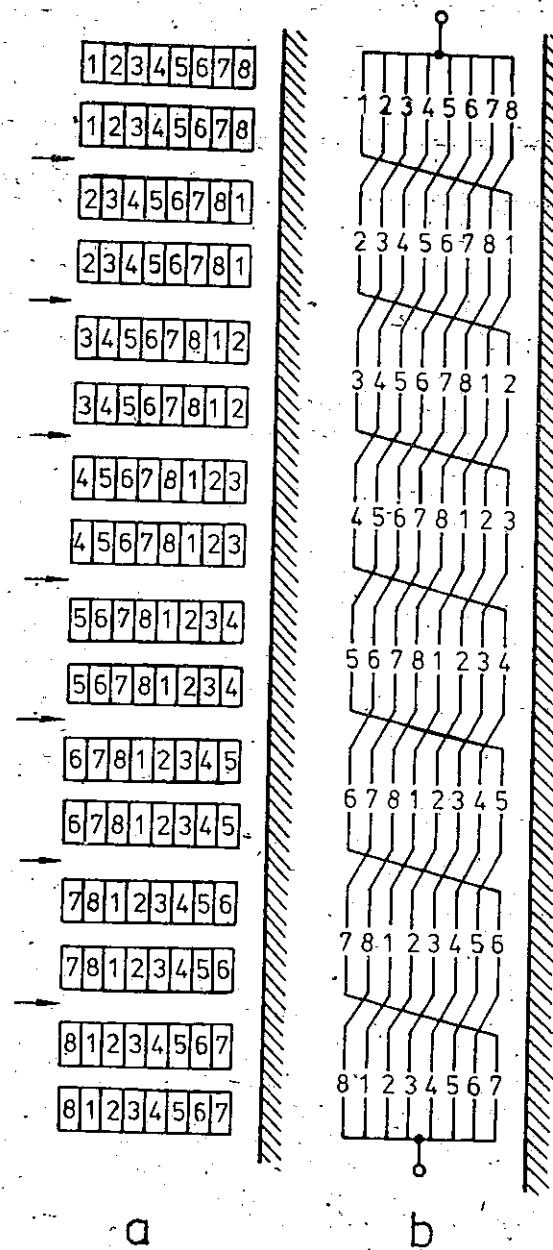


Fig. 15.20. Înfășurare spiralată compusă din 16 spire cu 8 conductoare în paralel suprapuse radial: a — secțiune prin înfășurare (săgețile indică locul de transpunere) b — schema transpunerilor.

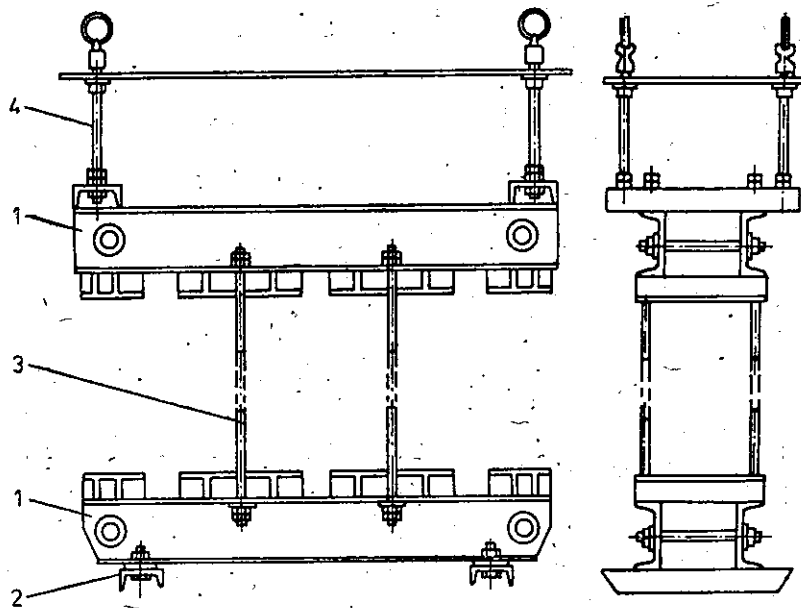


Fig. 15.21. Schelă unui transformator :

1 — console ; 2 — elemente de sprijin pe fundul cuvei ;
3 — tiranți ; 4 — tiranți de suspensie.

— consolidarea conexiunilor dintre înfășurări, a celor de la comutatorul de reglaj și de la izolatoarele de trecere ;

— ridicarea întregii părți decuvabile a transformatorului (ansamblul care se introduce în cuvă) în cazurile în care, datorită masei mari, aceasta nu poate fi ridicată de pe capac.

În figura 15.21 este reprezentată schela unui transformator, care cuprinde următoarele elemente : 1) profiluri de oțel (denumite și console) pentru strângerea jugurilor ; 2) profiluri de oțel cu secțiune mai mică, care servesc la sprijinirea părții decuvabile de fundul cuvei (în partea inferioară) și la adaptarea tiranților de suspensie (în partea superioară) ; 3) tiranți, fixați între console, care servesc la strângerea axială a înfășurărilor ; 4) tiranți de suspensie, care servesc la fixarea schelei de capac și la ridicarea părții decuvabile.

Această construcție a schelei este adoptată, în general, la transformatoarele cu puteri de până la 5 000 kVA. La puteri mai mari se folosește un alt sistem constructiv, în care transformatorul se reazimă pe fundul cuvei.

Pentru a permite strângerea înfășurărilor după uscarea, consola superioară are orificii ovale, prin care trec buloanele de strângere a jugului. Aceste orificii permit, după uscarea transformatorului, coborîrea nivelului la care sînt fixate consolele superioare și presarea înfășurărilor cu tiranții.

Strîngerea jugului se mai poate realiza și cu ajutorul unor benzi de frezare din sticlă (bandă poliglas), terminate la capete cu elemente metalice, care strîng jugurile peste console, în spațiul dintre coloane.

Elementele de presare ale bobinelor sînt piese metalice sudate de console și filetate, prin care trec șuruburi speciale care presează inelele metalice, avînd legătură de împămîntare și întrerupte, pentru a nu constitui spire în scurtcircuit, fie confecționate din material electroizolant gros, inelele prevăzute la capătul superior al bobinei, Presarea adecvată a bobinelor transformatorului

constituie una din problemele constructive principale. O bună presare a bobinelor trebuie să garanteze imobilizarea acestora în cazul unor scurtcircuite în rețea, în timpul cărora, datorită intensității mari de curent care străbate spirele bobinelor, apar forțe electrodinamice mari.

Presarea bobinelor se poate realiza prin inele de presare comune pentru toate bobinele unei faze sau prin intermediul unor inele de presare separate.

Prima variantă garantează așezarea corespunzătoare a buloanelor pe inelul de presare, care este destul de lat, practica arătînd că în cazul cînd se aplică o presiune mare în timpul strîngerii înfășurărilor în faza finală a montajului, precum și după egalizarea lor la strîngerea preliminară (fiecare înfășurare separat), metoda de mai sus asigură simplitate și siguranță. Dezavantajul este că, în cazul tasărilor inegale ale izolațiilor longitudinale ale bobinelor, unele dintre acestea pot să rămîină nepresate, deci să oscileze cu frecvența care apare în cazul scurtcircuitului.

Presarea prin inele separate asigură o rezistență mare a înfășurărilor la forțele electrodinamice, astfel că această metodă poate fi aplicată la transformatoarele cele mai expuse la supracurenți (transformatoare pentru redresoare, de încercare la scurtcircuit etc.).

15.4. CONSTRUCȚIA METALICĂ

Construcția metalică se execută numai pentru transformatoarele cu răcire în ulei și se referă la cuvă, capac și conservator.

15.4.1. CONSTRUCȚIA CUVEI

• În funcție de mărimea transformatorului, cuvele din tablă de oțel pot fi : cu pereți netezi, cu pereți ondulați, cu țevi sudate, cu lire din țevi, cu radiatoare cu țevi eliptice sau cu panouri și cu baterii de răcire suflăte cu aer sau răcite cu apă.

Pentru transformatoarele foarte mici (cu puteri pînă la 20 kVA), la care nu este necesară suprafață de răcire suplimentară, cuvele sînt de tip neted.

Cuvele cu pereți din tablă ondulată sînt utilizate la transformatoarele în ulei cu puteri de la 20 kVA la 1 600 kVA, în limitele posibilităților de cedare către mediul ambiant a căldurii corespunzătoare pierderilor din transformator (fig. 15.22), avînd o rezistență relativ mică la creșterea presiunii interioare. Din acest motiv, uscarea sub vid a transformatorului în cuvă din tablă cu ondule nu este posibilă.

Cuvele cu țevi rotunde sau ovale sînt utilizate la transformatoarele cu

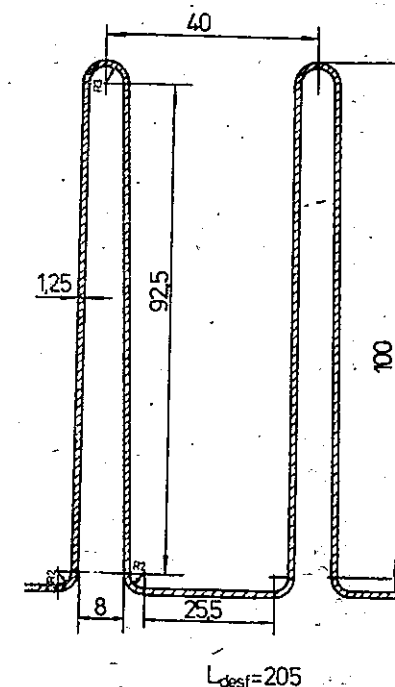


Fig. 15.22. Formă de ondulă utilizată la cuvele transformatoarelor (dimensiunile sînt în mm).

puteri de la 25 kVA la 10 MVA. Acestea au o rezistență mecanică mai mare decât cele realizate din tablă ondulată și, la aceeași cantitate de ulei, au aria suprafețelor de răcire mai mare.

Date orientative privind grosimile tablelor din care se realizează pereții, fundul și capacul cuvei, se dau în tabelul 15.1.

Tabelul 15.1

Date cu privire la cuvele cu țevi

S_v [kVA]	Număr rînduri țevi	Grosimea [mm]		
		perete	fund	capac
20 - 50	1	1,5-2,0	3	4-5
75 - 200	1-2	2,0-2,5	3-4	5-6
250 - 500	3-4	2,5-3,5	4-5	6-8
630 - 1 000	4-5	3,0-4,0	5-6	10
> 1 000	5-6	4,0-5,0	8-10	12

Țevile utilizate au diametrele exterioare între 30 mm și 50 mm, cu grosimile pereților cuprinse între 1 mm și 1,5 mm. Țevile rotunde sînt, adesea, ovalizate, pentru reducerea cantității de ulei la aceeași suprafață de răcire. Astfel, țevile cu diametrul de 51 mm, după ovalizare, au dimensiunile de 72×20 mm.

Cuvele cu țevile prinse direct pe pereți se pot realiza pînă la maximum șase rînduri, modul de așezare a lor fiind reprezentat în figura 15.23, iar principalele date privind poziționarea lor pentru o răcire eficientă sînt date în tabelul 15.2 [7]. Realizarea cuvelor cu țevile prinse direct pe pereți necesită o manoperă destul de mare, fiecare țevă fiind, separat, îndoită, montată și sudată pe perețele cuvei.

Tabelul 15.2

Date privind realizarea cuvelor cu țevi prinse direct pe pereți. Notațiile sînt cele din figura 15.23. Dimensiunile sînt în mm.

Dimensiuni țevă ($\varnothing d$)	$\varnothing 51$	$\varnothing 30$	ovală 72×20
R	150	150	188
l	70	50	50
t_p	75	55	100
a_1	50-80		60-100
c_{min}	60-120		70-130
e_{min}	70-130		80-140

Notă :

$$a_2 = a_1 + t_p; a_3 = a_1 + 2 t_p;$$

$$a_n = a_1 + (n - 1)t_p;$$

$$b_n = H_{cv} - c - e; b_{n-1} = b_n - 2 t_p;$$

$$b_{n-2} = b_{n-1} - 2 t_p.$$

De aceea, s-a trecut la *cuvele cu lire din țevi* (fig. 15.24), care necesită un număr redus de orificii în pereții cuvei, iar lirele pot fi realizate separat, ca subansambluri normalizate. Lirele pot avea două pînă la opt rînduri de țevi drepte, distanțele de montare pe cuvă fiind aceleași ca la țevi (tabelul 15.2).

Fig. 15.23. Poziționarea țevilor pe cuvă.

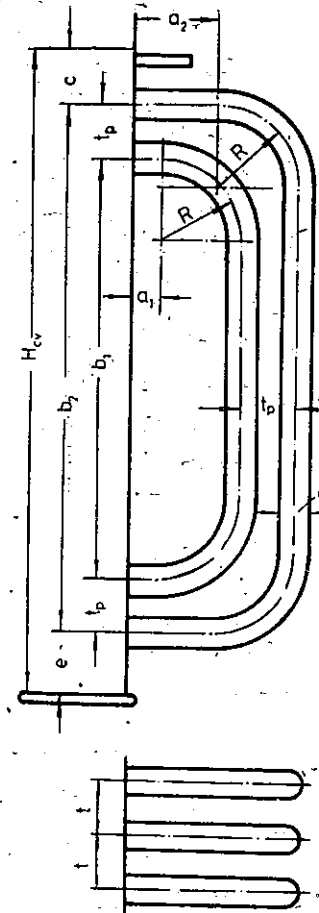
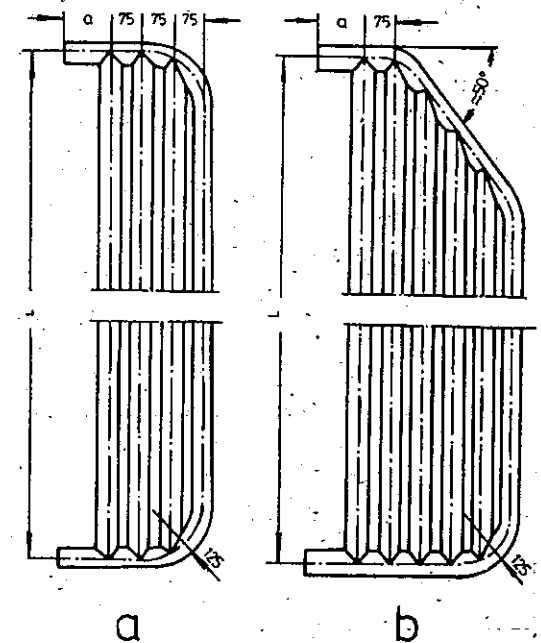


Fig. 15.24. Lire din țevi:

a — execuție normală; b — execuție adaptată la gabaritul de cale ferată.



Cuvele cu radiatoare din țevi rotunde sau ovale, sub formă de baterii, au luat o mare răspîndire datorită avantajelor tehnologice de fabricație.

În figurile 15.25 și 15.26 sînt date două modele de radiatoare, iar în tabelele 15.3 și 15.4 sînt prezentate datele de bază ale acestor radiatoare. Radiatoarele cu țevi drepte (fig. 15.25) sînt formate din două rînduri de cîte 10 țevi (72×20 mm) și se folosesc la transformatoare cu puteri de la 100 la 6 300 kVA. Radiatoarele cu țevi îndoită pot fi simple (fig. 15.26, a) și sînt formate din $2 \times 16 = 32$ de țevi (două rînduri a 16 țevi) sau duble (fig. 15.26, b), cînd au $2 \times 2 \times 16 = 64$ țevi (patru rînduri a 16 țevi).

Radiatoarele cu țevi îndoită sînt utilizate la transformatoare mai mari, de la 2 500 kVA la 63 MVA.

Radiatoarele cu panouri se folosesc la transformatoarele cu puteri mici, de la 63 kVA la 1 600 kVA, putînd avea unul pînă

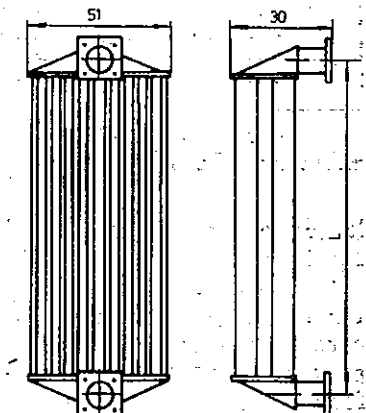


Fig. 15.25. Radiatoare cu țevi drepte. Dimensiunile sînt în cm.

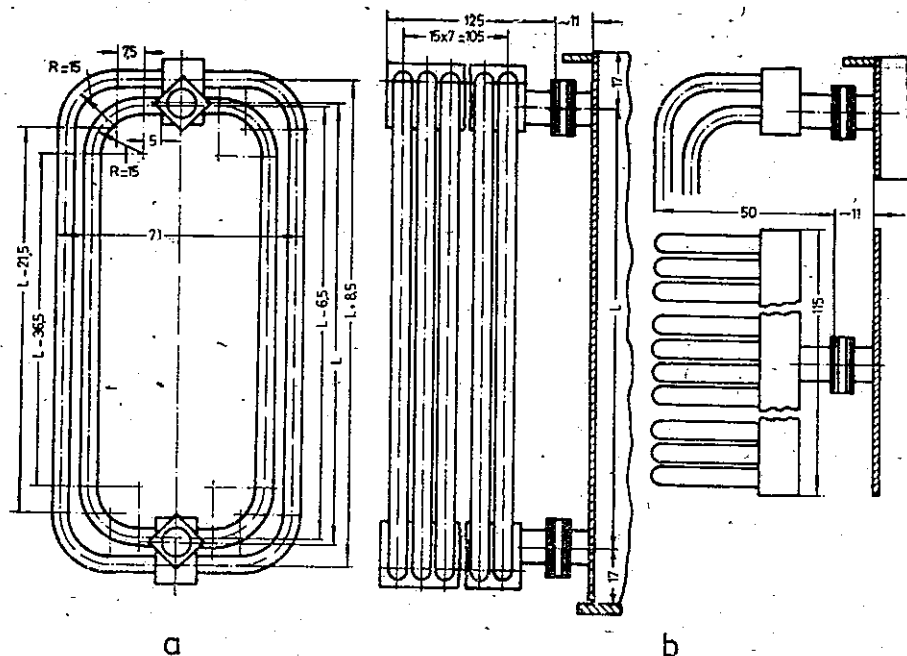


Fig. 15.26. Radiatoare cu țevi indoite. Dimensionile sunt în cm.

Tabelul 15.3

Datele de bază ale radiatoarelor cu țevi drepte, reprezentate în figura 15.25

L [cm]	S_{CT} [m ²]	G_{FeR} [kg]	G_u [kg]
71	1,98	52,6	28,6
90	2,60	59,5	31,6
115	3,40	68,6	35,6
140	4,20	77,6	39,5
161,5	4,88	83,5	42,9
180	5,48	92,3	45,8
200	6,10	99,5	49,0
220	6,75	106,8	52,2
240	7,40	114	55,3

Notă: S_{CT} — aria de convecție a țevilor; G_{FeR} — masa fierului radiatorului; G_u — masa uleiului din radiator. Aria de convecție a celor două colectoare de ulei se ia $S_{cc} \approx 0,4$ m².

la șapte elemente în paralel, cu lățimi de 370 mm sau 520 mm (poz. 5, fig. 15.27).

Transformatoarele cu puteri peste 10 MVA au, în general, răcire artificială cu aer, constând în amplasarea, sub radiator, a unor ventilatoare care asigură un debit mărit de aer cu sensul de jos în sus. La puteri mari se prevede execuția transformatorului cu circulație forțată a uleiului și cu răcire forțată cu aer (o baterie separată de radiatoare cu ventilatoare) sau cu apă (răcitor separat cu apă). Sub aspectul eficienței răcirii, bateriile răcite cu apă sînt avantajoase, însă prezintă dificultăți de etanșare.

Datele de bază ale radiatoarelor cu țevi indoite, reprezentate în figura 15.26

L [cm]	Radiator simplu			Radiator dublu		
	S_{CT} [m ²]	G_{FeR} [kg]	G_u [kg]	S_{CT} [m ²]	G_{FeR} [kg]	G_u [kg]
188	11,45	205	161	22,9	380	276
200	12,1	215	169	24,15	401	291
228,5	13,55	236	184	27,05	442	321
248,5	14,55	249	194	29,1	468	341
268,5	15,6	264	201	31,15	499	362
300	17,2	285	219	34,35	540	393
325	18,45	302	232	36,9	575	418
375	21,0	337	258	42	644	469
400	22,3	352	269	44,6	675	492
425	24,6	373	284	47,2	716	521

Notă: S_{CT} — aria de convecție a țevilor; G_{FeR} — masa fierului radiatorului; G_u — masa uleiului din radiator. Aria de convecție a colectoarelor radiatorului simplu este $S_{cc} \approx 0,72$ m², iar a celui dublu $S_{cc} \approx 0,66$ m².

În toate aceste cazuri, cuvele transformatoarelor sînt confecționate din foi de tablă sudate, întărite prin nervuri. Marginea superioară a cuvei se termină, în general, cu o ramă de oțel cornier prevăzută cu găuri pentru șuru-

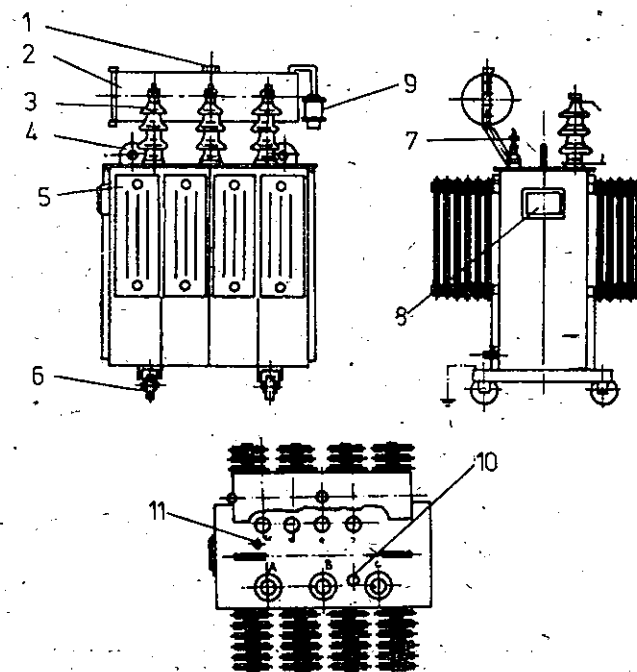


Fig. 15.27. Transformator trifazat în ulei (250 kVA ; 20/0,4 kV): 1 — bușon umplere; 2 — conservator; 3 — izolator I.T.; 4 — ureche de ridicare; 5 — radiator panou; 6 — cărucior; 7 — izolator J.T.; 8 — etichetă și schemă de conexiuni; 9 — filtru de aer; 10 — comutator; 11 — locaș termometru.

huri, prin intermediul cărora se face imbinarea dintre capacul cuvei și cuvă. Pe fundul cuvei (în exteriorul acesteia) se sudează, de obicei, cărucioare cu roți pentru deplasarea transformatorului.

15.4.2. CAPACUL CUVEI

Se execută tot din tablă de oțel și se prinde de rama cuvei cu ajutorul unor șuruburi. La transformatoarele de mică și medie putere legătura dintre capac și partea decuvabilă a transformatorului este de cele mai multe ori rigidă, executată cu ajutorul a patru tiranți de suspensie care leagă capacul de schelele jugului superior (fig. 15.21 și fig. 19.4 — poz. 9).

La transformatoarele de greutate mică, pe capac se află urechile de ridicare a părții decuvabile, iar la cele mai grele se practică guri de vizitare în capac, prin care se introduc cablurile de ridicare a părții decuvabile, ce se prind de urechi special sudate pe schelă.

15.4.3. CONSERVATORUL

Conservatorul (poz. 2, fig. 15.27) are rolul de a asigura o suprafață de contact a uleiului cu aerul mai mică decât în cazul lipsei lui, micșorând astfel posibilitatea de oxidare a uleiului. De asemenea, conservatorul asigură spațiul necesar dilatărilor și contractărilor uleiului în timpul încălzirii și al răcirii transformatorului; în plus, uleiul în conservator nu este supus unor variații de temperatură așa de mari ca în cuvă. Absorbția de umiditate și îmbătrânirea uleiului sînt, în acest caz, mult mai reduse. Conservatorul se utilizează la toate tipurile de transformatoare cu puteri mai mari de 75 kVA, avînd o singură cameră la transformatoarele cu reglaj în absența tensiunii și două camere (cealaltă servind drept conservator al comutatorului de reglaj), la transformatoarele cu reglajul tensiunii sub sarcină.

Unii constructori de transformatoare îl consideră inutil, în locul conservatorului aplicîndu-se obișnuit etanșarea cuvei, variațiile de volum ale uleiului egalizîndu-se printr-un spațiu umplut cu azot sau aer.

La transformatoarele de putere mică și medie conservatorul se așază pe latura mai mică a capacului, în partea dreaptă cînd se privește din partea izolatoarelor de înaltă tensiune. Cînd se așază în lungul transformatorului, atunci se așază pe partea de joasă tensiune (fig. 15.27).

La puteri mari ale transformatoarelor, conservatorul este demontabil și se poate așeza separat de transformator. Capacitatea aproximativă a conservatorului este de 10% din volumul uleiului din transformator.

15.5. ACCESORIILE TRANSFORMATOARELOR

Cele mai importante accesorii ale transformatoarelor sînt (v. fig. 15.27): izolatoarele de trecere, releul de gaze, supapa de siguranță, indicatoarele de temperatură, comutatorul de reglarea tensiunii și filtrul de aer.

15.5.1. IZOLATOARELE DE TRECERE

Izolatoarele transformatoarelor servesc la trecerea conductoarelor electrice prin capacul cuvei, permițînd legarea intrărilor sau ieșirilor înfășurărilor cu rețeaua electrică. Se compun dintr-o parte izolantă, de obicei din porțelan și dintr-o parte conductoare de curent (fig. 15.28). Izolatoarele de trecere constituie ultimul element de protecție al rețelei și, în consecință, trebuie să limiteze, în anumite cazuri (de exemplu la căderea trăsnetului în imediata apropiere a transformatorului), amplitudinea undei se supratensiune.

Rolul limitator este asigurat de eclatoarele dispuse direct pe izolatoari cu tensiuni peste 6 kV (fig. 15.28, b),

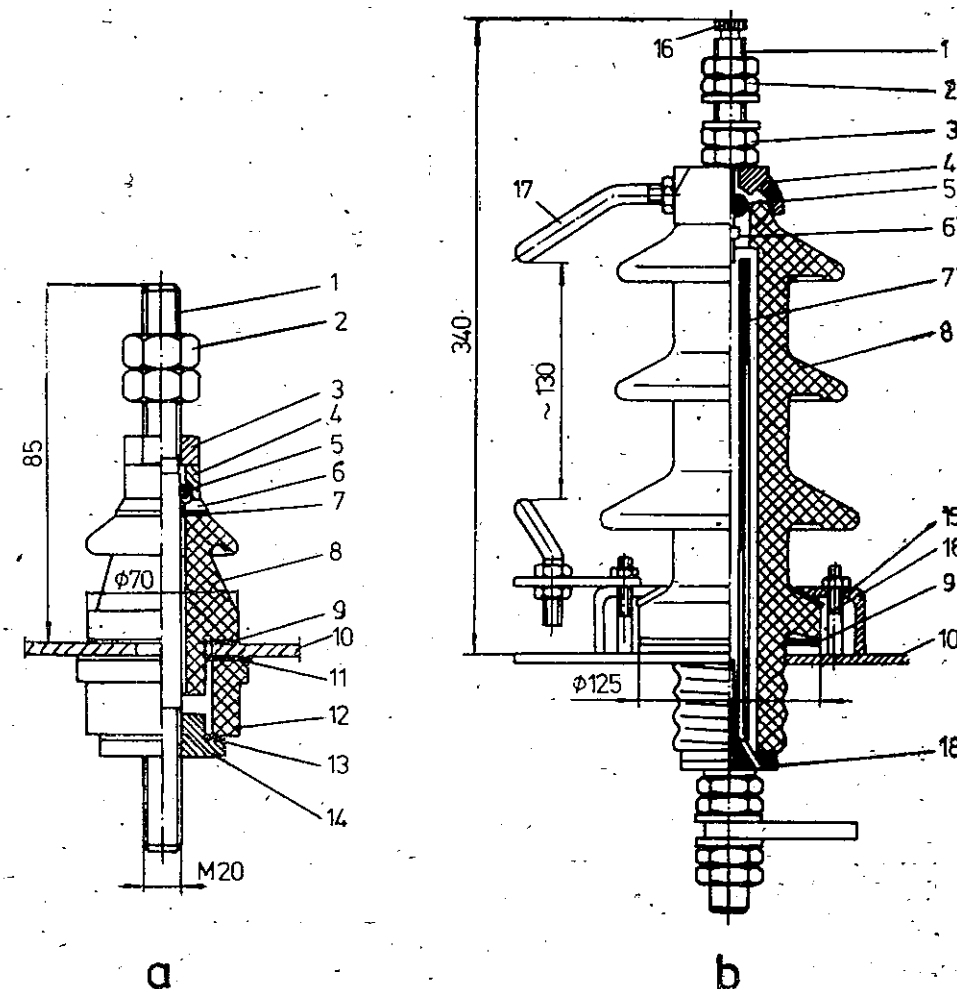


Fig. 15.28. Izolatoare de trecere:

a — de joasă tensiune ($U_n \leq 1$ kV); b — de înaltă tensiune; 1 — lije de trecere; 2 — piulițe de stringere a conductoarelor; 3 — piulițe de stringere a izolatorului; 4 — capac metalic; 5 — garnitură; 6 — saibă de etanșare; 6' — bolț de siguranță; 7 — garnitură; 7' — tub izolant; 8 — corp izolator exterior; 9 — garnitură; 10 — capac cuvă; 11, 13 garnituri de etanșare; 12 — corp izolator interior; 14 — guler de stringere; 15 — bride de stringere; 16 — prezon de stringere; 17 — eclator; 18 — rondela de etanșare.

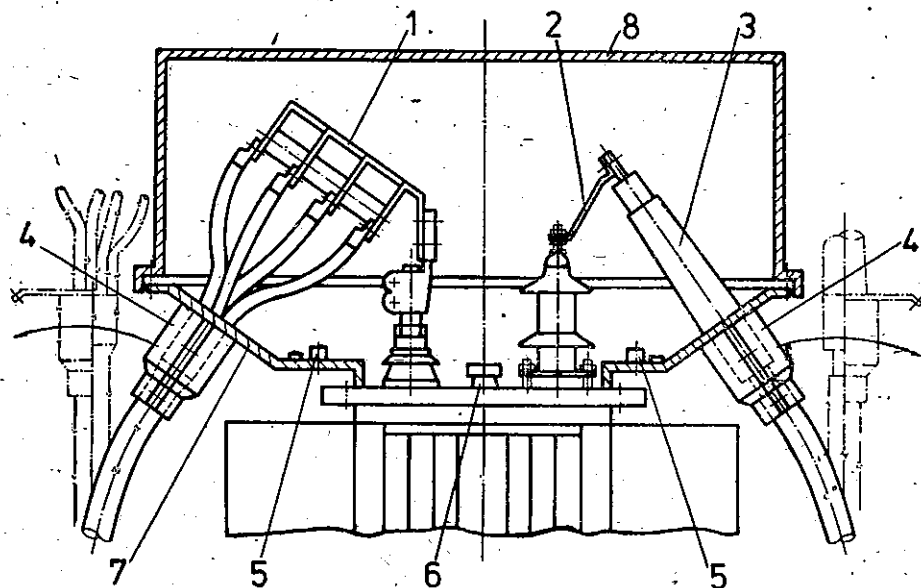


Fig. 15.29. Cutie de cabluri, în aer :

1 — legătură cablu joasă tensiune (pentru patru fire în paralel) ; 2 — legătură cablu înaltă tensiune ; 3 — izolator aer — aer pentru cablu de înaltă tensiune ; 4 — mufă fixare cablu ; 5 — legare la pământ ; 6 — dispozitiv acționare comutator prize ; 7 — partea inferioară a cutiei de cablu ; 8 — partea superioară a cutiei de cablu.

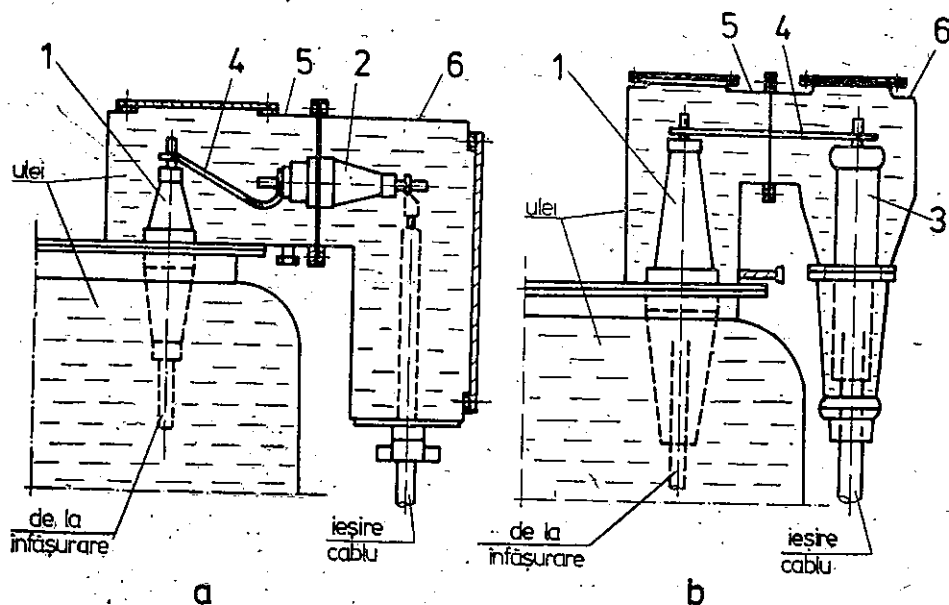


Fig. 15.30. Cutie de cabluri, în ulei :

a — pentru tensiuni până la 35 kV ; b — pentru tensiuni mai mari de 35 kV ; 1 — izolator ulei — ulei pentru ieșirea din transformator ; 2 — izolator ulei — ulei intermediar (de trecere) ; 3 — izolator pentru cabluri de tensiuni înalte ; 4 — legături ; 5 — cutie de racordare ; 6 — cutie cablu.

La valori ale curentului prin tija izolatorului mai mari de 600 A, pierderile în fierul capacului cuvei, provocate de fluxul magnetic creat în jurul izolatorului, devin mari, ducând la o încălzire locală inadmisibilă a capacului ; de aceea se impune utilizarea, în zona dintre izolatori, a unor fante care se umplu cu un material solid nemagnetic.

La curenți mari, dar și tensiuni ridicate, ansamblul de izolatoare de trecere se assemblează pe plăci din material nemagnetic (alamă, duraluminu, pertainax) care se montează apoi pe capacul cuvei.

În practică, de regulă, deoarece calculul izolatoarelor de trecere este destul de dificil, tipurile de izolatoare utilizate în construcția transformatoarelor sînt normalizate sau standardizate.

În afara transformatoarelor cu ieșire prin izolatoare se construiesc și transformatoare cu ieșire prin cablu. În figura 15.29 este reprezentată o ieșire prin cabluri, în aer. Se observă că ieșirile din transformator se fac prin izolatoare de trecere obișnuite, iar racordarea rețelelor la transformator, atât pe partea de joasă tensiune cit și de înaltă tensiune, se face prin cabluri corespunzătoare.

În figura 15.30 sînt reprezentate două variante de ieșiri prin cabluri, în ulei. În prima variantă cablu de tensiune corespunzătoare se leagă direct la izolatorul de trecere, iar în cea de a doua variantă, pentru tensiuni mai mari, ieșirea cablului se face cu ajutorul unui izolator special ; întregul ansamblu conexiuni este cufundat în ulei de transformator.

15.5.2. RELEUL DE GAZE

Releul de gaze este unul din aparatele cele mai răspîndite în practică pentru protecția transformatoarelor, fiind cunoscut și sub numele de releul Buchholz (v. fig. 15.31).

Orice neajunsuri în funcționarea unui transformator (defectarea izolației dintre spire, defectarea miezului etc.) dau naștere unor centre locale de temperatură ridicată, provocînd în locul respectiv descompunerea uleiului care este însoțită de eliminarea unor gaze ca produse ale descompunerii.

Releul de gaze este montat pe conducta de legătură dintre capacul cuvei și conservator, fiind prevăzut cu două plutitoare, cel superior (A în fig. 15.31) coborînd cînd se adună o anumită cantitate (mică) de gaze și închizînd întreruptorul cu mercur al unei instalații de alarmă.

În cazul defectelor importante cantitatea de gaze crescînd, în momentul evacuării lor către conservator sau cînd viteza de trecere a uleiului prin releu depășește o anumită limită, releul comandă deconectarea transformatorului atît pe partea de joasă tensiune, cit și pe cea de înaltă tensiune (B în fig. 15.31).

Releul mai poate comanda deconectarea transformatorului cînd nivelul uleiului din transformator a scăzut sub nivelul releului.

15.5.3. SUPAPA DE SIGURANȚĂ

Supapa de siguranță care mai este denumită și țevă de evacuare, asigură cuva transformatorului contra exploziilor (ca urmare a unei presiuni interioare excesive) și contra defectărilor ce produc o degajare bruscă și în cantitate mare de gaze.

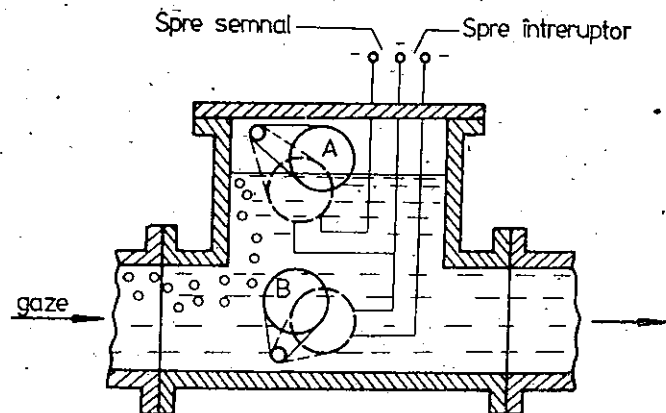


Fig. 15.31. Releu de gaze (Buchholz).

În figura 15.32 se reprezintă construcția unei supape de siguranță cu membrană din sticlă sau din pertinax și a unei supape-cu piston. Grosimea acestei membrane se alege corespunzător cu presiunea pe care o poate suporta cuva.

Supapa de siguranță se prevede, în general, la transformatoarele cu puteri peste 1 000 kVA.

15.5.4. INDICATOARELE DE TEMPERATURĂ

Transformatoarele mici sînt înzestrate, pentru verificarea temperaturii uleiului în stratul superior, cu termometre simple, cu mercur. Orificiul în care se montează termometrul se prevede cu o teacă etanșă de protecție, care la montare se umple cu ulei.

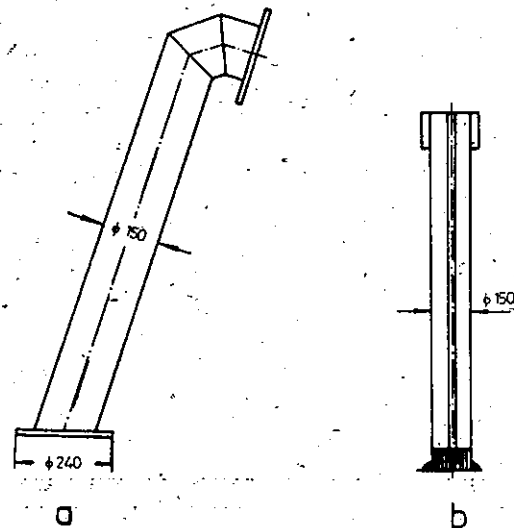


Fig. 15.32. Supape de siguranță: a — cu membrană; b — cu piston.

Termometrele cu cadran sînt construite similar ca un manometru, acul indicator fiind legat la locul de măsurare printr-un tub capilar cu o lungime de cîțiva metri. Cadranul indicator se montează pe cuva transformatorului, fiind înzestrat frecvent și cu contacte pentru semnalizarea temperaturii maxime.

Transformatoarele cu o putere mai mare de 10 MVA se echipează cu termometre cu rezistență.

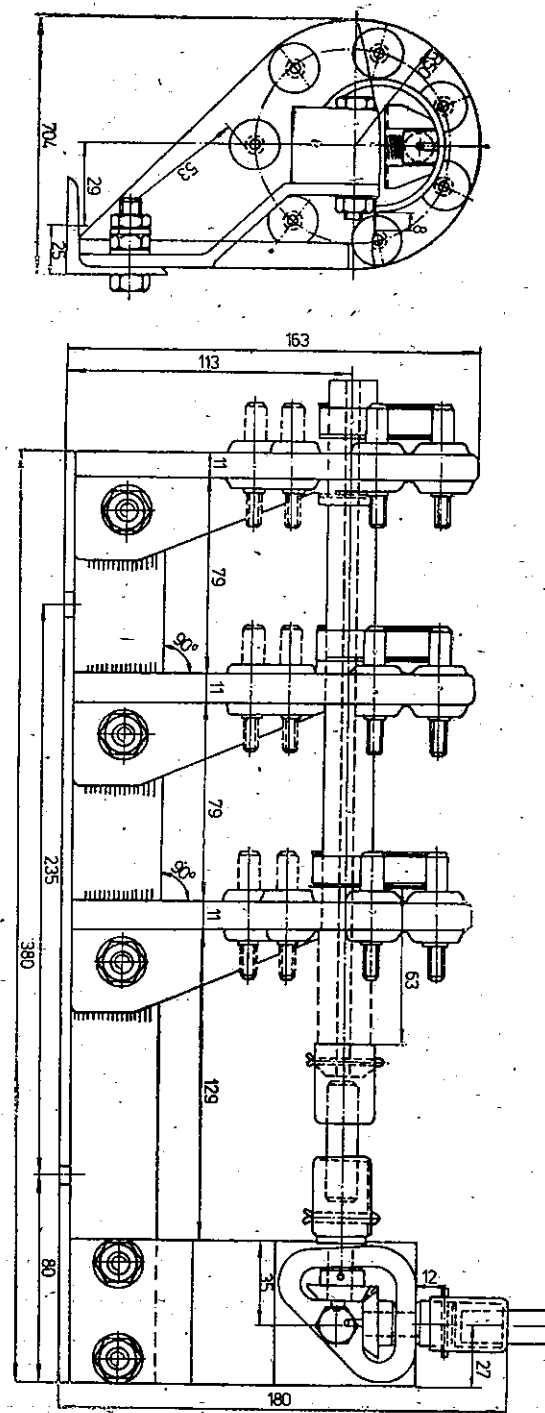


Fig. 15.33. Comutator rotativ de 20 kV/100 A.

15.5.5. COMUTATORUL DE REGLARE A TENSIUNII

Cînd reglarea tensiunii se face în starea deconectată de la rețea a transformatorului, comutatorul are rolul de a modifica numărul de spire aflate în circuit, ceea ce implică modificarea tensiunii secundare.

Construcția acestuia depinde de valoarea tensiunii și a curentului nominal. Tipul de comutator liniar se folosește pentru un curent de regim de 60 A și pentru tensiuni pînă la 35 kV. Acest comutator este destinat transformatoarelor trifazate de putere pînă la cca. 1 600 kVA și poate ocupa trei poziții, corespunzătoare domeniului de reglaj de $\pm 5\%$.

În figura 15.33 se prezintă, detaliat, construcția unui comutator rotativ, folosit în prezent în diverse țări, pentru curenți de 100 A, cu cinci prize de reglaj ($\pm 2 \times 2,5\%$).

Acționarea din greșeală a comutatorului cînd transformatorul este conectat la tensiunea de alimentare, provoacă formarea unui arc pe contacte, ducînd la distrugerea comutatorului. Din acest motiv transformatoarele se înzestreză adeseori cu dispozitive de blocare, care fac imposibilă acționarea comutatorului înaintea deschiderii întreruptoarelor.

Comutatoarele pentru reglajul în sarcină al tensiunii transformatoarelor pot fi cu reactanță limitatoare și acționare lentă a contactelor ruptorului sau cu rezistențe de limitare și acționare rapidă a ruptorului (tip Jansen), iar manevrarea se face de pe cuvă, de la distanță (printr-un manipulator) sau automat, în funcție de căderea de tensiune din rețea.

Transformatoarele cu reglajul tensiunii în sarcină se prevăd cu mai multe prize. De exemplu, se prevăd cu 17 prize de reglaj ($\pm 8 \times 1,25\%$ din tensiunea nominală) pentru transformatoarele cu tensiunea înaltă de 66 kV sau cu 27 de prize de reglaj ($\pm 13 \times 1,25\%$ din tensiunea nominală) pentru transformatoarele de 220/110 kV.

15.5.6. FILTRUL DE AER

Filtrul de aer este montat pe conducta de legătură dintre conservator și mediul ambiant (poz. 9, fig. 15.27), izolînd uleiul de influența atmosferei (a umidității, a impurităților aerului). În etapa actuală, ca absorbant al umidității, se folosește silicagelul, care în stare uscată este *albastru*, iar sub influența umidității capătă culoarea *roșie*. Caracteristicile higroscopice ale silicagelului pot fi regenerare, încălzindu-l la o temperatură de 400–500°C.

Capitolul 16. CALCULUL ELECTROMAGNETIC AL TRANSFORMATORULUI

Se vor trata numai transformatoarele de putere; transformatoarele de măsură prezintă unele particularități constructive și de calcul specifice, în principiu însă calculul lor este asemănător.

16.1. DATELE NOMINALE ALE TRANSFORMATORULUI

Datele nominale constituie acele date de la care se pornește cu dimensionarea transformatorului și pe care transformatorul trebuie să le asigure, după fabricație, în funcționare.

Acestatea sînt:

- *puterea aparentă nominală*: S_N , în VA sau kVA;
- *tensiunile nominale* din primar și secundar: U_{1N}/U_{2N} , în V sau kV; La transformatoarele trifazate aceste tensiuni sînt cele de linie (între faze);
- *treptele de reglaj a tensiunii*, în % din U_N ;
- *factorul de putere al sarcinii*: $\cos \varphi_2$ (în special la transformatoarele mici cu $S_N < 1$ kVA);
- *frecvența tensiunii de alimentare*: f , în Hz. În cazul în care nu se specifică altă valoare, se înțelege $f = 50$ Hz;
- *numărul de faze m* . Pentru transformatorul monofazat $m = 1$, iar pentru cel trifazat $m = 3$;
- *conexiunile înfășurărilor* Y, D, Z etc. (pentru înalta tensiune) și y, d, z etc. (pentru joasa tensiune) și grupa de conexiuni;
- *tipul constructiv*: cu coloane, în manta etc.;
- *sistemul de răcire*: cu aer, cu ulei (cu circulație naturală sau forțată) etc.;
- *alte date*: *curentul de funcționare în gol* I_0 , *pierderile în fier sau la funcționarea în gol* $P_0 \approx P_{Fe}$, *pierderile electrice în înfășurări sau de funcționare în scurtcircuit la curentul nominal* $P_{KN} = P_{el}$, *tensiunea de scurtcircuit* u_{KN} etc.

Nu întotdeauna este obligatoriu să se impună toate datele de mai sus; o parte din ele, dacă nu sînt impuse în mod special, se pot alege din standardele în vigoare.

De asemenea, trebuie menționat faptul că de obicei, transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA) se construiesc cu răcire în aer; afară de cazurile cînd se impune un alt mod de răcire. Transformatoarele mai mari însă ($S_N > 1$ kVA) se construiesc, de obicei, cu răcire cu ulei, dacă, întocmai ca în primul caz, nu se impune, în mod special un alt mod de răcire.

16.2. CALCULUL CIRCUITULUI MAGNETIC AL TRANSFORMATORULUI

După cum s-a menționat (v. paragraful 15.1), circuitul magnetic este constituit din coloane pe care se așază înfășurările transformatorului și din juguri, prin care se închide fluxul magnetic al coloanelor. Constructiv, formele secțiunilor coloanei și jugului pot fi dreptunghiulare sau în trepte.

Miezul feromagnetic cu secțiunea dreptunghiulară este mai ușor de executat (prin împachetare din tole egale), însă bobinele se construiesc mai greu, mai ales cînd este vorba de dimensiuni mari.

De aceea, de regulă, miezul cu secțiunea dreptunghiulară se folosește la transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA), care sînt, de obicei, monofazate.

La transformatoarele ceva mai mari ($S_N > 1$ kVA), se folosesc, mai frecvent, miezurile feromagnetice cu secțiunea în trepte. Dezavantajul acestora constă în faptul că fiind din mai multe trepte, tehnologia de împachetare este ceva mai dificilă. De asemenea, nici umplerea cercului (cu diametrul

D_c) nu se poate face perfect, deoarece ar fi nevoie de un număr de trepte foarte mare. Tehnologia de fabricație însă, a bobinelor rotunde, este mai ușoară, iar rezistența mecanică a acestora la acțiunea forțelor electrodinamice (la scurt-circuite bruște) mai bună.

Numărul de trepte și dimensiunile fiecărei trepte corelate și cu cele ale jugului, constituie pentru fiecare fabrică elemente normalizate, cu scopul tipizării cât mai mult a proceselor tehnologice de fabricație.

În figura 16.1 sînt reprezentate, de exemplu, cîteva forme constructive de miezuri în trepte și dimensiunile fiecărei trepte, astfel încît (pentru numărul respectiv de trepte) secțiunea ocupată de miez (din suprafața cercului cu diametrul D_c) să fie maximă.

Cum s-a menționat, ca materiale pentru miezurile feromagnetice de transformatoare, mai ales la cele mai mari, se folosește tablă silicioasă laminată la rece, cu cristale orientate, avînd grosimea de 0,28—0,35 mm și pierde-

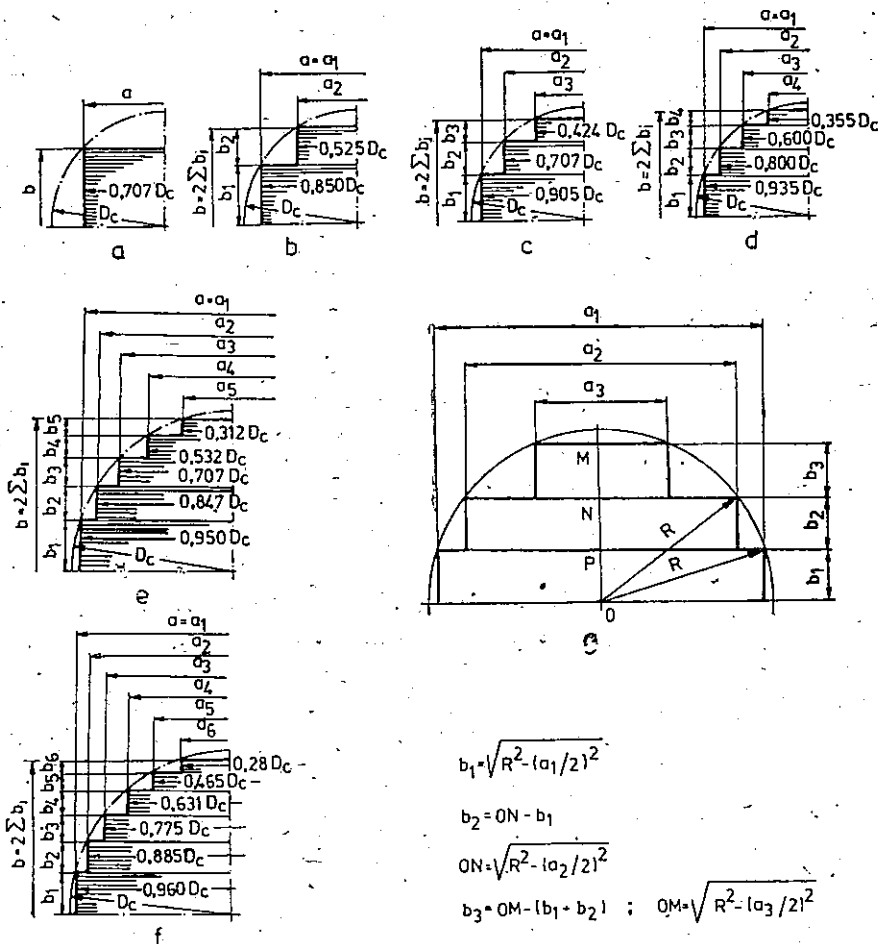


Fig. 16.1. Dimensiunile treptelor miezului magnetic, astfel încât secțiunea miezului să fie maximă:

a — cu o treaptă; b — cu două trepte; c — cu trei trepte; d — cu patru trepte; e — cu cinci trepte; f — cu șase trepte.

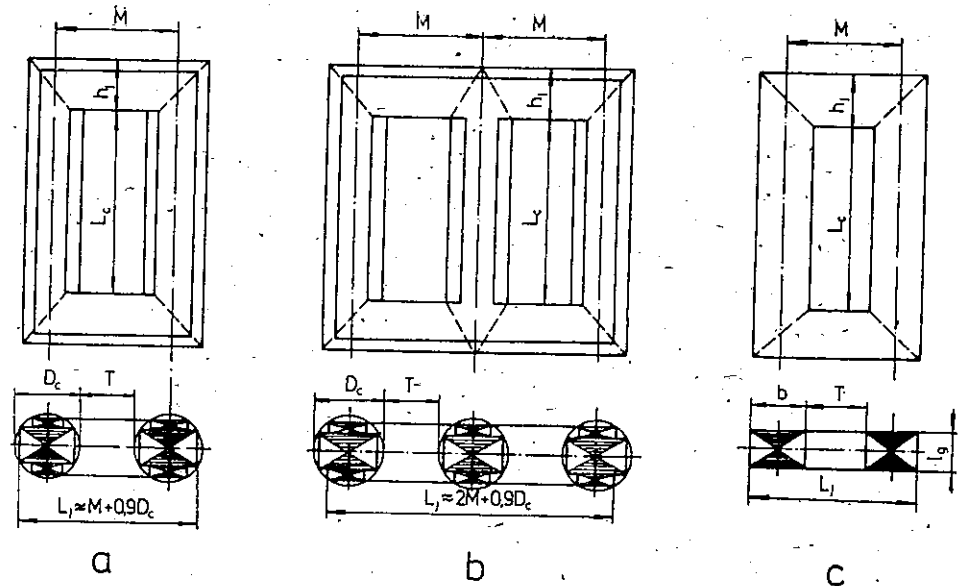


Fig. 16.2. Dimensiunile principale ale unui miez magnetic:

a — monofazat, cu două coloane în trepte; b — trifazat, cu trei coloane în trepte; c — monofazat, cu două coloane dreptunghiulare.

rile specifice la inducția magnetică de 1 T și frecvența de 50 Hz, $p_{10/50} = 0,47$ W/kg (cifra de pierderi specifice în fier la diferite inducții magnetice și frecvențe, precum și caracteristica de magnetizare $B = f(H)$, sînt elemente caracteristice ale materialului miezului feromagnetic și sînt furnizate de firma care fabrică tolele pentru miezul feromagnetic).

La transformatoarele mici, se folosește frecvent însă și tabla silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate, avînd grosimea de 0,5 mm și pierderile specifice $p_{10/50} = 2,3$ W/kg.

În figura 16.2, a și b sînt reprezentate dimensiunile principale ale miezurilor feromagnetice cu coloane (monofazate și trifazate), avînd forma secțiunii miezului în trepte. În mod similar, se reprezintă și miezurile cu secțiunea coloanei dreptunghiulară, a cărei lățime este b (fig. 16.2, c).

De multe ori, transformatoarele mici se construiesc cu miezul în manta. În figura 16.3 este reprezentat un astfel de transformator bobinat; poziția 2 reprezintă tola miezului cu dimensiunile respective (v. și fig. 15.9).

16.2.1. CALCULUL SECȚIUNILOR COLOANEI ȘI JUGULUI

— Secțiunea (transversală) netă de fier a coloanei se determină, orientativ cu relația:

$$S_c = C_t \sqrt{\frac{S_1}{f}} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (16.1)$$

în care:

S_1 este puterea aparentă a transformatorului pe o coloană, în VA.

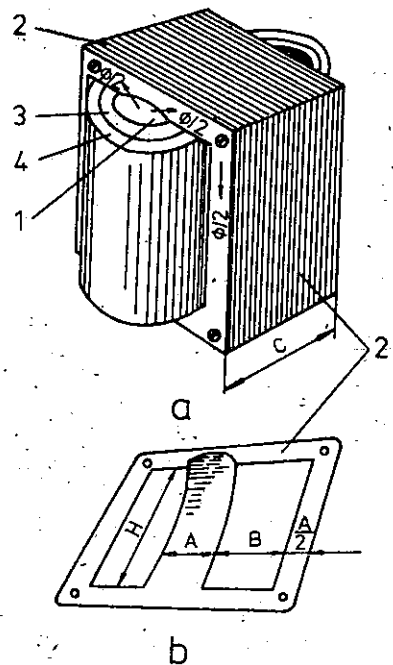


Fig. 16.3. Transformator monofazat în manta cu tole din întregul: a — transformatorul (vedere); b — tola miezului; 1 — spațiu prevăzut în carcasa bobinei pentru împachetarea miezului; 2 — tola miezului; 3 — bobină primară; 4 — bobină secundară.

În funcție de puterea nominală S_N a transformatorului, în VA, rezultă:

— $S_1 = S_N$ [VA], pentru transformatorul monofazat în manta și pentru transformatorul monofazat cu înfășurările concentrice (dispușe pe o coloană);

— $S_1 = \frac{S_N}{2}$ [VA], pentru transformatorul monofazat cu înfășurările dispuse pe două coloane;

— $S_1 = \frac{S_N}{3}$ [VA], pentru transformatorul trifazat cu înfășurările pe trei coloane (concentrice);

— f — frecvența tensiunii de alimentare, în Hz;

— $C_t = (4 \div 6) \cdot 10^{-4}$ — constantă de calcul. În medie se poate lua $C_t = 5 \cdot 10^{-4}$.

— Dimensiunile geometrice ale coloanei rezultă din valoarea secțiunii nete a coloanei, pe baza următoarelor relații:

— pentru secțiunea coloanei, în trepte (fig. 16.2, a, b)

$$S_c = k_m \frac{\pi D_c^2}{4} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (16.2)$$

de unde rezultă, diametrul coloanei:

$$D_c = \sqrt{\frac{4 S_c}{\pi k_m}} \text{ [m]}; \quad (16.2, a)$$

— pentru secțiunea coloanei dreptunghiulare (fig. 16.2, c)

$$S_c = k_{Fe} b l_g \text{ [m}^2\text{]}, \quad (16.3)$$

de unde rezultă l_g când se impune b , sau invers (orientativ se poate lua raportul $b/l_g = 1 \dots 1,5$), în care:

k_{Fe} este coeficientul de împachetare al miezului, adică de umplere cu fier al spațiului ocupat de tole. Pentru tole de 0,35 mm — din tablă silicoasă laminată la rece cu cristale orientate și izolate cu carlit,

$$k_{Fe} = 0,94 \dots 0,96. \quad (16.4)$$

Pentru tabla laminată la rece cu cristale neorientate (grosime 0,5 mm) $k_{Fe} = 0,95$;

$k_m = k_{Fe} k_g$, este coeficientul total de umplere al cercului cu diametrul D_c , cu fier și care depinde atât de k_{Fe} cât și de coeficientul geometric de umplere a cercului k_g . La rândul lui k_g depinde direct de numărul de trepte ale miezului coloanei, de modul de strângere al acesteia și la transformatoarele cu canale de răcire în miez, de lărgimea acestor canale. În tabelul 16.1 este dat numărul orientativ de trepte în funcție de diametrul D_c al coloanei și coeficientul k_g corespunzător.

Tabelul 16.1

Numărul orientativ de trepte n_{tr} în funcție de diametrul D_c al coloanei și coeficientul k_g corespunzător, pentru diferite moduri de strângere a miezului coloanei

a) Miez strâns cu înfășurarea sau prin lipire cu lac și fără canale de răcire

D_c [cm]	<8	8	9	10÷18	20÷30	32÷40
n_{tr}	3	4	5	6	7-8	9÷11
k_g	0,851	0,877	0,915	0,915÷0,92	0,918÷0,925	0,915÷0,925

b) Miez strâns cu bandă de sticlă sau de oțel (fără a forma spiră în scurtcircuit) și cu n_c canale longitudinale

D_c [cm]	20÷26	28÷30	32÷34	36÷38	40÷42	45÷50
n_{tr}	7	7	8	8	10	13
n_c	1	1	1	1	1	1
k_g	0,90	0,91	0,910	0,90	0,910	0,915

c) Miez pentru transformatoarele uscate

D_c [cm]	<8	8	9÷14	16÷22	24÷26	28÷32
n_{tr}	3	4	5-6	7-8	7	8
n_c	1	1	1	1	1	2
k_g	0,851	0,877	0,915÷0,920	0,930÷0,935	0,80	0,820

Notă

1) Numărul treptelor n_{tr} și al canalelor longitudinale n_c date în tabel pot fi modificate din considerente tehnico-economice ale întreprinderii constructoare.

2) La calculul factorului k_g s-au luat în considerație și canalele n_c , largi de 6 mm pentru miezurile în ulei și de 20 mm pentru cele în aer.

3) La transformatoarele uscate, pentru $D_c \leq 22$ cm, strângerea se face cu înfășurarea și cu pene; pentru $D_c > 22$ cm, strângerea se face cu bandă de sticlă sau de oțel.

După definitivarea și rotunjirea dimensiunilor geometrice ale coloanei (b , l_g sau D_c), se recalculează valoarea definitivă a secțiunii coloanei cu relațiile (16.2) sau (16.3), în care se folosesc, de asemenea, și valorile exacte ale coeficienților k_g și k_{Fe} .

Este indicat ca secțiunea coloanei să se determine din dimensiunile fiecărei trepte cu relația

$$S_c = k_{Fe} 2 \sum_{i=1}^{n_{tr}} a_i b_i \text{ [m}^2\text{]}, \quad (16.4, a)$$

unde (v. fig. 16.1 și fig. 18.2), a_i și b_i reprezintă lățimea și respectiv grosimea treptei „i” (n_{tr} fiind numărul de trepte ale coloanei).

— Secțiunea (transversală) netă a jugului se ia egală sau mai mare cu circa 10% decât secțiunea coloanei, deoarece jugurile miezului feromagnetic al transformatorului au condiții de răcire mai dificile decât ale coloanelor

(jugul inferior este în partea de jos unde nu circulă uleiul de răcire, iar jugul superior este în partea de sus unde uleiul este cald și se îndreaptă spre radiatora-rele de răcire). Astfel:

— pentru miezurile dreptunghiulare, cu coloane, răcite cu aer:

$$S_j = S_c; \quad (16.5)$$

— pentru miezurile în manta;

$$S_j = \frac{1}{2} S_c; \quad (16.6)$$

— pentru miezurile în trepte și în ulei:

$$S_j = \beta_j S_c = (1,03 + 1,1) S_c. \quad (16.7)$$

— Dimensiunile geometrice ale jugului pentru valoarea calculată a secțiunii, rezultă în funcție de forma secțiunii jugului (în trepte sau dreptunghiulară), similar ca dimensiunile coloanei, din relațiile (16.2) și (16.3).

Teoretic numărul de trepte al secțiunii jugului ar trebui să fie egal cu cel al secțiunii coloanei n_{tr} .

Dar, deoarece se dorește ca $S_j > S_c$, atunci numărul de trepte al secțiunii jugului se ia cu una, cel mult cu două trepte mai mic. Acest lucru (creșterea secțiunii jugului S_j) se face în mod uzual prin realizarea ultimei sau ultimelor două trepte la lățimea treptei anterioare, grosimile b_i rămânând aceleași ca la coloană.

De exemplu, presupunând că $n_{tr} = 5$ (fig. 16.1, e), se încearcă mai întâi jugul cu 4 trepte, făcând pe $a_5 = a_4$; dacă S_j calculat cu relația (16.4, a) rezultă prea mic ($S_j < 1,03 S_c$), atunci se măresc ultimele două trepte făcând $a_5 = a_4 = a_3$ după care se recalculează S_j , care trebuie să se încadreze în limitele date de relația (16.7).

Ca și la coloană, după definitivarea și rotunjirea dimensiunilor geometrice al jugului, se recalculează valoarea definitivă a secțiunii jugului S_j .

16.2.2. DIMENSIUNILE FERESTREI TRANSFORMATĂRULUI

Fereastra transformatorului (spațiul în care se amplasează înfășurările) este determinată de dimensiunile finite ale înfășurărilor și distanțele de izolație cospunzătoare, distanțe care depind, în primul rând, de tensiunile nominale.

Trebuie menționat că transformatoarele mici au, în general, tensiunile nominale primare și secundare sub 1 000 V ceea ce înseamnă că nu sînt necesare anumite distanțe izolante, impuse, așa cum se recomandă la tensiuni peste 1 000 V.

Din această cauză, rezultă că ferestrele transformatoarelor de tensiuni mici vor fi procentual mai mici, decît ferestrele transformatoarelor de aceeași putere, dar de tensiuni mai mari.

De aceea, la transformatoarele mici, este mai comod ca dimensionarea lățimii ferestrei să se facă definitiv după stabilirea înfășurărilor. Este necesar însă în prealabil să se determine prin calcul înălțimea ferestrei în funcție de care rezultă înălțimea bobinei (v. și exemplul de calcul de la paragraful 19.1).

Tabelul 16.2

Valorile inducției magnetice maxime în coloană B_c , a păturii de curent J și a densității de curent J , pentru transformatoarele cu înfășurări din cupru

Categorie	mici		mijlocii și mari												
	cu aer		cu ulei												
S_N [kVA]	≤ 1	1-5	5-10	10-50	50-100	100-1 000	1 600-10 000	>10 000							
B_c [T]	1-1,1	1,2-1,35	1,25-1,4	1,45-1,6	1,55-1,65	1,65-1,7	1,67-1,71	1,68-1,73							
A [A/cm]	80-120	150-180	175-210	200-250	220-300	250-400	400-600	500-750							
J [A/mm ²]	2,5-3	2,2-2,5	2,3-2,7	2,3-3,0	2,4-3,2	2,5-3,3	2,6-3,5	3,2-4,2							

Notă:

1. La transformatoarele mici valoarea inducției magnetice B_c este indicată pentru cazul cînd miezul se confecționează din tablă laminată la rece cu cristale neorientate, cu grosimea de 0,5 mm; în celelalte cazuri se consideră tablă laminată la rece cu cristale orientate grosă de 0,3 mm.
2. Pentru transformatoarele în ulei cu înfășurări din aluminiu, densitatea de curent J se ia mai mică cu 30-40% față de cea din tabel, pentru puterea respectivă, adică

$$J_{Al(ulei)} \approx (0,6-0,7) J_{Cu(ulei)}$$

3. Pentru transformatoarele mijlocii, cu înfășurări din cupru și răcire cu aer (uscate), se recomandă pentru densitatea de curent următoarele limite:

$$J_{Cu(aer)} \approx (0,5-0,6) J_{Cu(ulei)}$$

pentru cazul în care transformatorul uscat are înfășurările în clasa de izolație A;

$$J_{Cu(aer)} \approx J_{Cu(ulei)}$$

pentru cazul în care transformatorul uscat are înfășurările în clasa de izolație F (prin $J_{Cu(ulei)}$ se înțeleg valorile din tabel).

Deoarece nu se cunosc încă, în această etapă, dimensiunile înfășurărilor, se va face o dimensionare prealabilă a ferestrei, urmînd ca dimensiunile definitive să fie stabilite după calculul înfășurărilor.

— Înălțimea coloanei (și a ferestrei) se determină, orientativ (vezi fig. 16.2), cu relația

$$L_c = \frac{S_1}{100 A e_1} [\text{m}] = \frac{S_1}{A e_1} [\text{cm}], \quad (16.8)$$

în care:

S_1 are aceeași semnificație ca în relația (16.1), în VA;

A este pătura de curent a transformatorului, în A/cm.

Prin definiție, considerînd cazul că pe o coloană se află o singură înfășurare (ca la transformatorul monofazat cu înfășurările pe coloane diferite),

$$A = \frac{w_1 I_1}{L_c} [\text{A/cm}]. \quad (16.8, a)$$

Deoarece nu se cunoaște încă numărul de spire al înfășurării primare w_1 , pentru a calcula pe A , se estimează inițial valoarea lui A , din tabelul 16.2;

e_1 — tensiunea electromotoare (t.e.m.) indusă într-o spirală, în V, care se determină cu relația:

$$e_1 = \pi \sqrt{2} f \Phi = 4,44 f \Phi = 4,44 f S_c B_c [\text{V}], \quad (16.8, b)$$

unde:

B_c este inducția magnetică în coloană (amplitudinea); în T, care se ia, preliminar, din tabelul 16.2;

S_c — secțiunea exactă a coloanei, obținută cu relația (16.4, a) după stabilirea dimensiunilor, în m^2 .

Cum se vede din relația (16.8, b),

$$\Phi = B_c S_c = [Wb], \quad (16.8, c)$$

reprezintă amplitudinea fluxului magnetic util al transformatorului.

— Lățimea ferestrei se determină definitiv după dimensionarea înfășurărilor.

Preliminar însă, distanța dintre coloane (fig. 16.2) se determină cu relațiile aproximative:

— pentru miezul cu secțiunea coloanei dreptunghiulară

$$M = \alpha b [\text{m}]; \quad (16.9)$$

— pentru miezuri cu secțiunea coloanei în trepte (înscrisă în cercul cu diametrul D_c)

$$M = \alpha D_c [\text{m}], \quad (16.9, a)$$

în care:

$\alpha \approx 1,8 \dots 2,3$, pentru transformatoarele în ulei, cu înfășurarea din cupru (în medie se poate lua $\alpha \approx 2$);

$\alpha \approx 2,2 \dots 2,6$, pentru transformatoarele în ulei, cu înfășurarea din aluminu (în medie se poate lua $\alpha \approx 2,3 - 2,4$).

Pentru transformatoarele uscate (în aer), valorile lui α se iau mai mari cu 40–50% decît limitele de mai sus, ale transformatoarelor în ulei, adică

$$\alpha_{\text{aer}} \approx (1,4 \dots 1,5) \alpha_{\text{ulei}}$$

— Lățimea ferestrei transformatorului (a spațiului în care se introduc înfășurările) rezultă astfel (valoare preliminară)

$$T = M - b \text{ (sau } D_c) [\text{m}] \quad (16.9, b)$$

— Lungimea medie a jugurilor magnetice, pentru fazele marginale rezultă cu relațiile (v. fig. 16.2, a și b):

— pentru transformatorul monofazat cu coloane

$$L_j \approx M + 0,9 D_c [\text{m}]; \quad (16.9, c)$$

— pentru transformatoarele trifazate cu coloane

$$L_j \approx 2M + 0,9 D_c [\text{m}]; \quad (16.9, d)$$

— pentru transformatorul monofazat în manta (fig. 16.2, c și fig. 16.6, c, și 16.9, d)

$$L_j = 2(b + T) [\text{m}]. \quad (16.9, e)$$

Se recomandă cu aceste dimensiuni ale miezului, o verificare prealabilă a pierderilor în fier cu relația (16.44).

16.3. CALCULUL INFĂȘURĂRILOR TRANSFORMATORULUI

Înfășurările transformatorului — primară 1 și secundară 2 — pot fi așezate fie pe aceeași coloană, prin suprapunere (la transformatorul monofazat în manta și cel trifazat), fie pe coloane separate (de regulă la transformatorul monofazat cu două coloane).

• La transformatoarele mici, bobinele se confecționează din conductor rotund cu diametrul maxim pînă la 2–2,5 mm sau din conductor profilat (dreptunghiular cu muchiile rotunjite) mai ales cele la tensiunea joasă.

Izolația conductorului este fie numai din email tereftalic (ET) cu grosime de 0,06–0,12 mm bilateral, fie din email tereftalic peste care se mai prevăd și două straturi din fire de sticlă (E2S) cu grosimea bilaterală de 0,4–0,5 mm pe ambele laturi. Se obține astfel o înfășurare cu izolația în clasa F cu suprațempatura admisă — peste cea a mediului ambiant — de 100°C (v. și tabelele 3.1 și 3.3).

Confecționarea bobinei (sau bobinelor) se face prin depănarea conductorului direct pe o carcasă izolantă (fig. 16.4), carcasă care constituie și izolația față de masă.

După confecționare, înainte de asamblarea pe miez, bobina se impregnează cu lac, corespunzător clasei de izolație F.

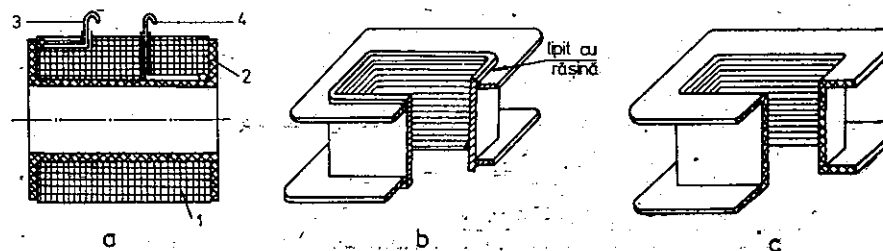


Fig. 16.4. Bobină cu carcasă, pentru transformatoarele mici:

a — bobina cu carcasă; 1 — bobina; 2 — carcasa; 3 — clemă de ieșire; 4 — clemă de intrare; b — carcasă confecționată din stratificate; c — carcasă din mase de turnare.

Deoarece nu se cunosc încă, în această etapă, dimensiunile înfășurărilor, se va face o dimensionare prealabilă a ferestrei, urmînd ca dimensiunile definitive să fie stabilite după calculul înfășurărilor.

— **Înălțimea coloanei** (și a ferestrei) se determină, orientativ (vezi fig. 16.2), cu relația

$$L_c = \frac{S_1}{100 A e_1} [\text{m}] = \frac{S_1}{A e_1} [\text{cm}], \quad (16.8)$$

în care:

S_1 are aceeași semnificație ca în relația (16.1), în VA;

A este pătura de curent a transformatorului, în A/cm.

Prin definiție, considerînd cazul că pe o coloană se află o singură înfășurare (ca la transformatorul monofazat cu înfășurările pe coloane diferite),

$$A = \frac{w_1 I_1}{L_c} [\text{A/cm}]. \quad (16.8, a)$$

Deoarece nu se cunoaște încă numărul de spire al înfășurării primare w_1 , pentru a calcula pe A , se estimează inițial valoarea lui A , din tabelul 16.2;

e_1 — tensiunea electromotoare (t.e.m.) indusă într-o spirală, în V, care se determină cu relația:

$$e_1 = \pi \sqrt{2} f \Phi = 4,44 f \Phi = 4,44 f S_c B_c [\text{V}], \quad (16.8, b)$$

unde:

B_c este inducția magnetică în coloană (amplitudinea); în T, care se ia, preliminar, din tabelul 16.2;

S_c — secțiunea exactă a coloanei, obținută cu relația (16.4, a) după stabilirea dimensiunilor, în m^2 .

Cum se vede din relația (16.8, b),

$$\Phi = B_c S_c = [Wb], \quad (16.8, c)$$

reprezintă amplitudinea fluxului magnetic util al transformatorului.

— **Lățimea ferestrei** se determină definitiv după dimensionarea înfășurărilor.

Preliminar însă, **distanța dintre coloane** (fig. 16.2) se determină cu relațiile aproximative:

— pentru miezul cu secțiunea coloanei dreptunghiulară

$$M = \alpha b [\text{m}]; \quad (16.9)$$

— pentru miezuri cu secțiunea coloanei în trepte (înscrisă în cercul cu diametrul D_c)

$$M = \alpha D_c [\text{m}], \quad (16.9, a)$$

în care:

$\alpha \approx 1,8 \dots 2,3$, pentru transformatoarele în ulei, cu înfășurarea din cupru (în medie se poate lua $\alpha \approx 2$);

$\alpha \approx 2,2 \dots 2,6$, pentru transformatoarele în ulei, cu înfășurarea din aluminu (în medie se poate lua $\alpha \approx 2,3 - 2,4$).

Pentru transformatoarele uscate (în aer), valorile lui α se iau mai mari cu 40–50% decît limitele de mai sus, ale transformatoarelor în ulei, adică

$$\alpha_{\text{aer}} \approx (1,4 \dots 1,5) \alpha_{\text{ulei}}$$

— **Lățimea ferestrei transformatorului** (a spațiului în care se introduc înfășurările) rezultă astfel (valoare preliminară)

$$T = M - b \text{ (sau } D_c) [\text{m}] \quad (16.9, b)$$

— **Lungimea medie a jugurilor magnetice**, pentru fazele marginale rezultă cu relațiile (v. fig. 16.2, a și b):

— pentru transformatorul monofazat cu coloane

$$L_j \approx M + 0,9 D_c [\text{m}]; \quad (16.9, c)$$

— pentru transformatoarele trifazate cu coloane

$$L_j \approx 2M + 0,9 D_c [\text{m}]; \quad (16.9, d)$$

— pentru transformatorul monofazat în manta (fig. 16.2, c și fig. 16.6, c, și 16.9, d)

$$L_j = 2(b + T) [\text{m}]; \quad (16.9, e)$$

Se recomandă cu aceste dimensiuni ale miezului, o verificare prealabilă a pierderilor în fier cu relația (16.44).

16.3. CALCULUL ÎNFĂȘURĂRILOR TRANSFORMATORULUI

Înfășurările transformatorului — primară 1 și secundară 2 — pot fi așezate fie pe aceeași coloană, prin suprapunere (la transformatorul monofazat în manta și cel trifazat), fie pe coloane separate (de regulă la transformatorul monofazat cu două coloane).

• **La transformatoarele mici**, bobinele se confecționează din conductor rotund cu diametrul maxim pînă la 2–2,5 mm sau din conductor profilat (dreptunghiular cu muchiile rotunjite) mai ales cele la tensiunea joasă.

Izolația conductorului este fie numai din email tereftalic (ET) cu grosime de 0,06–0,12 mm bilateral, fie din email tereftalic peste care se mai prevăd și două straturi din fire de sticlă (E2S) cu grosimea bilaterală de 0,4–0,5 mm pe ambele laturi. Se obține astfel o înfășurare cu izolația în clasa F cu supratemperatura admisă — peste cea a mediului ambiant — de 100°C (v. și tabelele 3.1 și 3.3).

Confecționarea bobinei (sau bobinelor) se face prin depănarea conductorului direct pe o carcasă izolantă (fig. 16.4), carcasă care constituie și izolația față de masă.

După confecționare, înainte de asamblarea pe miez, bobina se impregnează cu lac, corespunzător clasei de izolație F.

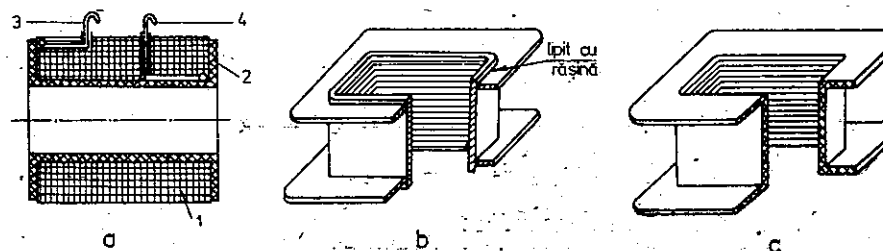


Fig. 16.4. Bobină cu carcasă, pentru transformatoarele mici:

a — bobina cu carcasă; 1 — bobina; 2 — carcasă; 3 — clemă de ieșire; 4 — clemă de intrare; b — carcasă confecționată din stratificate; c — carcasă din mase de turnare.

• La transformatoarele mijlocii și mari, în general, bobinele se confecționează separat (pe șabloane), izolația față de miez fiind constituită și ea separat din cilindri și rame izolante circulare (la cele două capete ale bobinelor).

Dacă răcirea este în aer, atunci se folosesc toți conductoare izolate în clasa F ca și la transformatoarele mici.

Dacă răcirea este în ulei, atunci izolația conductorului este din 2+5 straturi de bandă din hirtie înfășurată pe conductor prin suprapunere având o grosime totală (pe ambele părți) de 0,25+0,5 mm, pentru conductoarele rotunde și de 0,3+0,6 mm pentru cele profilate. Numărul straturilor de hirtie și grosimea bilaterală a izolației conductoarelor este conform STAS 6163-76.

În construcția înfășurărilor transformatoarelor se are în vedere așa-zisa „coordonare a izolației”, care constă din următoarele măsuri:

— primele 5-6% și ultimele 5-6% din spire, se izolează suplimentar (de regulă au izolație dublă față de restul spirelor) pentru a rezista la supra-tensiuni;

— din motive de utilizare mai rațională a izolațiilor și distanțelor de izolație, când înfășurările transformatorului sînt concentrice (una peste alta) atunci, întotdeauna, la interior (adică lângă miezul feromagnetic al coloanei), se prevede înfășurarea de joasă tensiune, care se va nota cu indice j , iar la exterior (peste ea) înfășurarea de înaltă tensiune, care se va nota cu indice i (v. fig. 16.7, fig. 16.8 și tabelul 16.3).

16.3.1. STABILIREA NUMĂRULUI DE SPIRE

— Pentru înfășurarea primară

— numărul de spire, corespunzător t.e.m. nominale de fază

$$w_1 = \frac{E_1}{e_1} = \text{nr. întreg}; \quad (16.10)$$

— numărul de spire corespunzător treptei maxime de reglaj a tensiunii primare (adică reglajul se face în limitele $\pm k'\Delta u\%$)

$$\Delta w_1 = \frac{k'\Delta u\%}{100} w_1, \quad (16.10, a)$$

$k'\Delta u\%$ fiind procentul din tensiunea nominală în limitele în care se face reglajul tensiunii;

— numărul total de spire al înfășurării primare

$$w_{1T} = w_1 + \Delta w_1; \quad (16.10, b)$$

— Pentru înfășurarea secundară:

— în cazul conexiunii stea (y) sau triunghi (d)

$$w_2 = \frac{E_2}{e_2} = \text{nr. întreg}; \quad (16.10, c)$$

— în cazul conexiunii zig-zag (z)

$$w_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{E_2}{e_2} = \text{nr. întreg par} \quad (16.10, d)$$

deoarece înfășurarea de fază se compune din două semibobine egale, cu câte $w_2 = w_2/2$ spire fiecare, în care:

e_1 este t.e.m. indusă într-o spirală, în V, dată de relația (16.8, b);

E_1, E_2 — t.e.m. de fază din primar și secundar, în V, date de relațiile:

— pentru transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA)

$$E_1 = U_{1f} - \frac{\Delta u[\%]U_{1f}}{200} [\text{V}]; \quad (16.11)$$

$$E_2 = U_{2f} + \frac{\Delta u[\%]U_{2f}}{200} [\text{V}]$$

— pentru transformatoarele mijlocii și mari ($S_N > 1$ kVA)

$$E_1 \approx U_{1f}; \quad (16.11, a)$$

$$E_2 \approx U_{2f}$$

unde:

U_{1f} și U_{2f} sînt tensiunile nominale de fază ale înfășurării primare respectiv ale înfășurării secundare, în V și anume:

— pentru înfășurarea transformatorului monofazat

$$U_{1f} = U_{1N}; U_{2f} = U_{2N}; \quad (16.11, b)$$

— pentru înfășurarea transformatorului trifazat, cu conexiunea stea (Y, y) sau zig-zag (z)

$$U_{1f} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}}; U_{2f} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}}; \quad (16.11, c)$$

— pentru înfășurarea transformatorului trifazat, cu conexiunea triunghi (Δ sau $D; d$)

$$U_{1f} = U_{1N}; U_{2f} = U_{2N}; \quad (16.11, d)$$

$\Delta u(\%)$ este căderea de tensiune, procentuală, a transformatorului de mică putere. Orientativ, valoarea lui $\Delta u(\%)$ se ia din figura 16.5.

Valorile lui w_1 și w_2 obținute cu relațiile (16.10) și (16.10, c și d), se rotunjesc la numere întregi, însă astfel încît raportul de transformare

$$k = \frac{E_1}{E_2}$$

să se mențină în toleranțele indicate în STAS 1703/1-80.

De aceea, după rotunjirea la număr întreg a unui număr de spire (de regulă w_j),

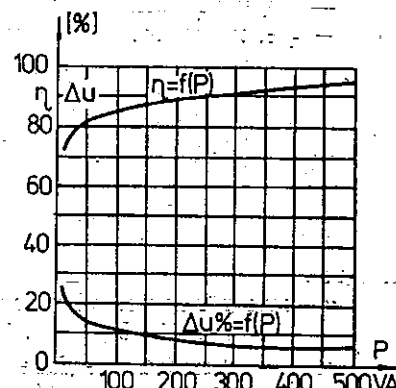


Fig. 16.5. Randamentul și căderea de tensiune (în procente) ale transformatoarelor de putere mică.

se recalculează celălalt număr de spire, din raportul de transformare k și anume (v. și exemplul de calcul):

— pentru conexiunile stea (y) sau triunghi (d), rezultă

$$w_i = kw_j; \quad (16.11, e)$$

— pentru conexiunea zig-zag (z), rezultă

$$w_i = \frac{\sqrt{3}}{2} kw_j \quad (16.11, f)$$

— Valorile definitive ale fluxului magnetic și inducțiilor magnetice:

— fluxul magnetic util (amplitudinea)

$$\Phi = \frac{E_1}{\pi \sqrt{2} fw_1} = \frac{E_1}{4,44 fw_1} [\text{Wb}]; \quad (16.12)$$

— inducția magnetică în coloană

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} [\text{T}], \quad (16.12, a)$$

valoare care trebuie să fie apropiată de cea estimată inițial din tabelul 16.2;

— inducția magnetică în jugul transformatoarelor cu coloane

$$B_j = \frac{\Phi}{S_j} [\text{T}]; \quad (16.12, b)$$

— inducția magnetică în jugul transformatoarelor în manta

$$B_j = \frac{\Phi}{2S_j} [\text{T}]; \quad (16.12, c)$$

— t.e.m. într-o spirală

$$e_i = E_1/w_1 [\text{V/spirală}]. \quad (16.12, d)$$

16.3.2. SECȚIUNILE ȘI DIMENSIUNILE CONDUCTOARELOR

— Curenții nominali ai transformatorului:

— pentru transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA)

$$I_1 = \frac{S_N \cos \varphi_2}{mU_{1f} \eta \cos \varphi_1} [\text{A}]; \quad I_2 = \frac{S_N}{mU_{2f}} [\text{A}]; \quad (16.13)$$

— pentru transformatoarele mai mari ($S_N > 1$ kVA)

$$I_1 \approx \frac{S_N}{mU_{1f}} [\text{A}]; \quad I_2 = \frac{S_N}{mU_{2f}} [\text{A}], \quad (16.13, a)$$

în care:

η este randamentul transformatorului, care se ia orientativ din figura 16.5;

m — numărul de faze. Pentru transformatorul monofazat $m = 1$, iar pentru cel trifazat $m = 3$;

$\cos \varphi_1 = 0,9 \dots 0,92$ deoarece, de obicei, $\cos \varphi_2 = 1$, iar miezul feromagnetic este din tole de calitate superioară.

O valoare mai exactă a lui $\cos \varphi_1$ se poate determina cu relația

$$\cos \varphi_1 \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_{12}}{I_{1a}}\right)^2}}$$

— Secțiunile și dimensiunile conductoarelor:

$$s_{w1} = \frac{I_1}{J_1} [\text{mm}^2]; \quad s_{w2} = \frac{I_2}{J_2} [\text{mm}^2], \quad (16.14)$$

în care:

J_1, J_2 sînt densitățile de curent din înfășurarea primară și secundară, în A/mm² și se iau din tabelul 16.2.

De obicei, în cazul în care condițiile de răcire ale înfășurărilor sînt identice, se ia

$$J_1 = J_2.$$

Dacă înfășurările nu au condiții de răcire identice, atunci se poate lua

$$J_1 \neq J_2,$$

valoarea mai mică avînd-o înfășurarea cu condiții mai grele de răcire (cu grosime mai mare, fără canale etc.).

Pentru valorile secțiunilor obținute cu relațiile (16.14) se stabilesc dimensiunile definitive ale conductoarelor din STAS-ul de conductoare.

Astfel, pentru valorile secțiunilor mai mici ca 5–6 mm² (la transformatoarele mici) se alege din STAS 685-74 (vezi anexa 5) sau din STAS 3033-87 (vezi anexa 6) conductor rotund, care de regulă, este izolat numai cu email tereftalic (ET), pentru un strat de email sau ET2, pentru două straturi de email), pentru cupru și cu hîrtie pentru aluminiu.

Se stabilesc astfel definitiv:

$$\text{diametrele } \frac{d_1}{d_1'} \xrightarrow{\text{(STAS)}} > s_{w1}, \text{ pentru primar}; \quad (16.14, a)$$

$$\text{diametrele } \frac{d_2}{d_2'} \xrightarrow{\text{(STAS)}} > s_{w2}, \text{ pentru secundar},$$

unde:

d_1 și d_2 sînt diametrele neizolate iar d_1' , d_2' diametrele izolate.

Dacă valoarea secțiunii este mai mare ca 6 mm², atunci din STAS 2873/1-86 (v. anexa 7) sau din STAS 6499/1-74 (v. anexa 8) se alege un conductor dreptunghiular (profilat), care este izolat cu email tereftalic (tip PET), pentru un strat de email sau PET₂, pentru două straturi de email sau email tereftalic peste care se dau și două straturi de fire de sticlă (tip PE2S) pentru transformatoarele uscate (răcite cu aer) și izolat cu hîrtie pentru transformatoarele cu ulei (de la 2 la 5 straturi 1/2 sau 1/3 suprapus).

Se stabilește, deci, definitiv, un conductor cu dimensiunile:

$$\frac{a \times b \text{ (neizolat)}}{a' \times b' \text{ (izolat)}} \xrightarrow{\text{(STAS)}} > s_w \quad (16.14, b)$$

Grosimile izolațiilor în funcție de care rezultă dimensiunile conductoarelor izolate (d' sau a' , b') sînt indicate ori atativ în anexa 9 (în practică valorile exacte sînt date de fabrica furnizoare de conductori).

OBSERVAȚIE: În lucrarea de față se consideră că a este dimensiunea conductorului pe grosimea bobinei, iar b pe înălțimea bobinei și $a < b$.

Cu valorile definitive, din STAS, ale secțiunilor conductoarelor, se stabilesc valorile definitive ale densităților de curent

$$J_1 = \frac{I_1}{s_{w1}} [\text{A/mm}^2]; J_2 = \frac{I_2}{s_{w2}} [\text{A/mm}^2], \quad (16.14, c)$$

valori care trebuie să se încadreze în limitele indicate în tabelul 16.2.

16.3.3. DIMENSIUNILE ÎNFĂȘURĂRILOR ȘI ALE FERESTREI TRANSFORMATORULUI

După cum s-a arătat (v. paragraful 16.2.2), între dimensiunile înfășurărilor, ferestrei și tensiunile transformatorului există o strinsă legătură.

A. Transformatoarele mici

La transformatoarele mici, care au, de regulă, tensiuni nominale sub 1 000 V, nu sînt necesare anumite spații sau distanțe cu rol izolant între înfășurări și masa miezului sau între înfășurări, așa cum se recomandă la cele de tensiuni înalte ($U_N > 1 \text{ kV}$), ci se prevăd numai izolațiile strict necesare, ale căror grosimi sînt mult mai mici.

De aceea, la transformatoarele mici, așa cum reiese și din figura 16.6, dimensiunile ferestrei rezultă din condiția de a încăpea înfășurările cu carcasa respectivă. Se observă, în acest caz, că din cele două dimensiuni ale ferestrei (T și L_c), pentru dimensionarea definitivă este necesară, inițial, numai una (de obicei L_c), din care rezultă înălțimea bobinei H_B , cealaltă dimensiune T rezultînd în funcție de grosimile a_1 și a_2 ale înfășurărilor.

Pentru dimensionarea înfășurărilor și ferestrei sînt necesare următoarele etape:

— se determină înălțimea bobinelor

$$H_B = L_c - 5 \text{ mm}, \quad (16.15)$$

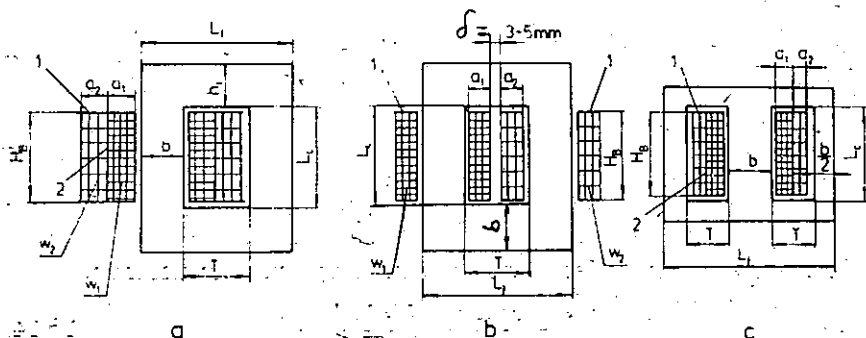


Fig 16.6. Dimensiunile înfășurărilor și miezului transformatoarelor monofazate mici: a — transformator cu două coloane cu înfășurările suprapuse; b — transformator cu două coloane cu înfășurările dispuse pe coloane separate; c — transformator în mantă; 1 — carcasa bobinelor; 2 — izolația dintre înfășurări.

considerînd că 2 mm este grosimea carcasi, iar 0,5 mm joc (sus și jos) de asamblare (H_B și L_c se iau în mm);

— se determină numărul de spire pe un strat ale fiecărei bobine:

— pentru conductorul rotund

$$w_{s1} = \frac{H_B}{d_1}; w_{s2} = \frac{H_B}{d_2}; \quad (16.16)$$

— pentru conductorul profilat

$$w_{s1} = \frac{H_B}{b_1}; w_{s2} = \frac{H_B}{b_2}, \quad (16.16, a)$$

în care b_1, b_2 este latura mare cu izolația pe ambele părți a conductorului înfășurării primare, respectiv secundare;

— se determină numărul de straturi ale fiecărei bobine:

$$n_{s1} = \frac{w_{s1}}{w_{s1}} = \text{nr. întreg}; n_{s2} = \frac{w_{s2}}{w_{s2}} = \text{nr. întreg}, \quad (16.17)$$

valori care se rotunjesc la numărul întreg imediat superior;

— se determină grosimile bobinelor:

— pentru conductorul rotund

$$a_1 = n_{s1}d_1' [\text{mm}]; a_2 = n_{s2}d_2' [\text{mm}]; \quad (16.18)$$

— pentru conductorul profilat:

$$a_1 = n_{s1}a_1' [\text{mm}]; a_2 = n_{s2}a_2' [\text{mm}], \quad (16.18, a)$$

în care a_1', a_2' reprezintă latura mică cu izolația pe ambele părți a conductorului înfășurării primare, respectiv secundare;

— lățimea ferestrei rezultă (ținînd cont și de grosimea de 2 mm a carcasi):

— pentru înfășurările suprapuse (fig. 16.6, a, c)

$$T = 1 + 2 + a_1 + a_2 + (3+5) [\text{mm}]; \quad (16.19)$$

— pentru înfășurările separate (fig. 16.6, b)

$$T = 2(1 + 2) + a_1 + a_2 + (3+5) [\text{mm}], \quad (16.19, a)$$

în care:

1 mm este jocul (pe o parte) între interiorul carcasi și miez;

2 mm — grosimea carcasi;

3+5 mm — distanța de asamblare (în care se include și grosimea izolației dintre bobine — poz. 2).

B. Transformatoarele mijlocii și mari

La transformatoarele mijlocii și mari, care au tensiuni și curenți mari (a se vedea și par. 15.2), înfășurările se pot realiza cu bobine concentrice sau alternate (cu galeți alternați).

Modul, cel mai frecvent, de așezare pe coloane a înfășurărilor concentrice (care sînt și cele mai utilizate) și principalele dimensiuni ale lor, este indicat în figura 16.7.

În figura 16.8 se prezintă detaliat acest mod de așezare, indicîndu-se și distanțele de izolare atât între înfășurări cît și față de coloanele și jugurile miezului feromagnetic, în funcție de care, prin construcția grafică la scară

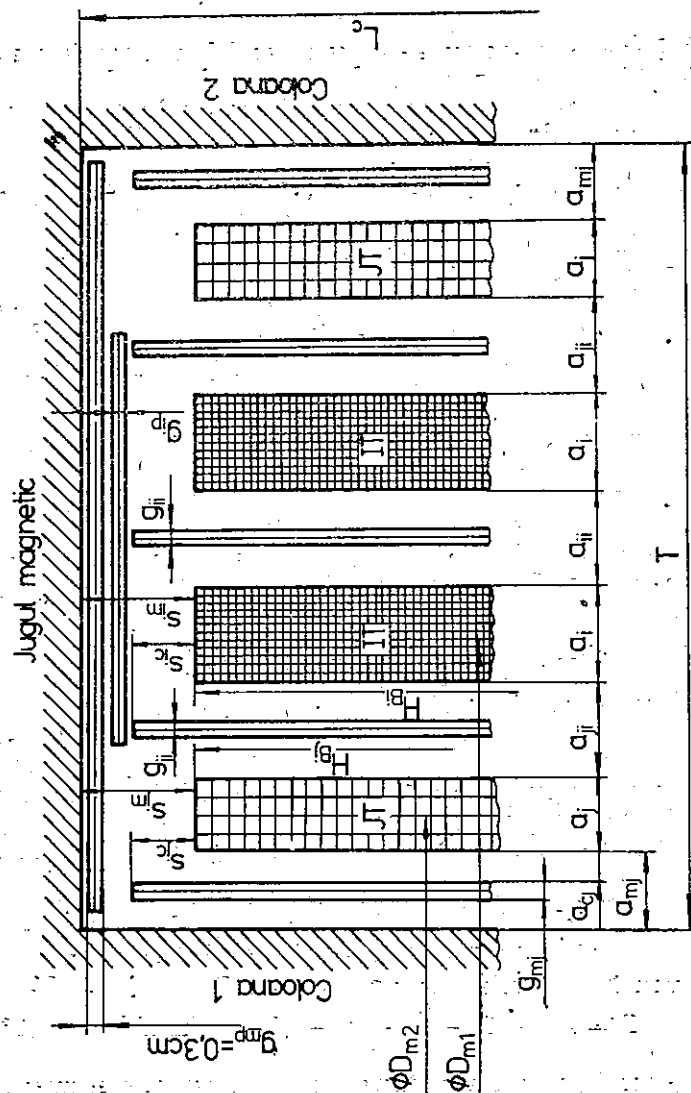


Fig. 16.8. Distanțele de izolare la transformatorul de înaltă tensiune cu coloane.

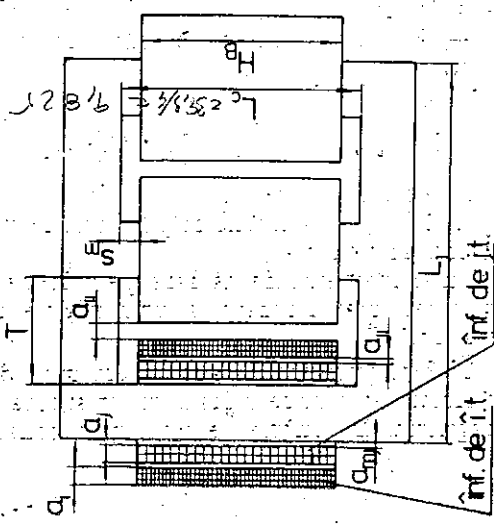


Fig. 16.7. Așezarea înfășurărilor și dimensiunile lor principate la transformatorul cu coloane.

sau prin calcul, se determină dimensiunile considerate definitive L_c și T , ale ferestrei transformatorului (dacă se verifică tensiunile de scurtcircuit și încălzirile). Valorile acestor distanțe de izolare necesare, în funcție de tensiunile nominale ale înfășurărilor transformatoarelor în ulei și uscate, sînt indicate în tabelul 16.3.

Tabelul 16.3

Izolația tip a transformatoarelor cu coloane (fig. 16.8, 3)
a) Distanțele de izolare pentru transformatoarele în ulei, în cm

(a)* $U_N^{(inf)}$ [kV]	(b)* U_{inc} [kV]	** JT față de miez			** Inf. față de jug.		Între JT și IT		Între IT și IT (între bobinele de IT vecine)		
		a_{mj}	g_{mj}	s_{jc}	s_{jt}	s_{im}	a_{jt}	g_{jt}	a_{it}	g_{it}	s_e
1	5	0,3-0,4	0,3	-	2	-	-	-	-	-	-
3	16	0,6	0,3	0,8	2	0,6	0,3	0,6	-	1	
6	22	0,6	0,3	1	2,2	0,8	0,3	0,7	-	1,2	
10	28	0,6	0,3	1	2,5	0,8	0,3	0,8	0,3	1,5	
20	50	0,8	0,4	2	3	1,2	0,4	1	0,4	2	
35	80	1,4	0,6	4	6	1,8	0,6	1,6	0,5	4,5	
60	140	1,8	0,8	8,5	11,5	3,4	0,8	18,0	0,8	9	
110	185	2,0	1,0	12	15	4,0	1,0	20,0	1,0	12,5	

* (a) În STAS 1703/3-80, în loc de U_N se prevede U_m (tensiunea cea mai ridicată a înfășurării - valoare eficace).
(b) Pentru U_m și U_{inc} , vezi STAS 1703/3-80.
** Distanțele față de masa miezului se determină, pentru fiecare înfășurare, în funcție de tensiunea nominală U_N a acesteia. Exemplu:
 a_{mj}, s_{jm} - pentru U_{Nj} ; s_{im} - pentru U_{Ni} .
Distanțele între înfășurări (a_{jt} și a_{it}) se determină pentru tensiunea înaltă U_N .
(1) Distanța s_e servește la dimensionarea cuvei (vezi fig. 18.4).
OBSERVAȚIE. Toate distanțele sînt indicate din punct de vedere al izolării. Pentru scoaterea bornelor și pentru ecranele de protecție se măresc distanțele respective cu spațiul necesar acestora.

Tabelul 16.3 (continuare)

b) Distanțele de izolare pentru transformatoarele uscate, în cm

$U_N^{(inf)}$ [kV]	U_{inc} [kV]	JT față de miez			Inf. față de jug.		Între JT și IT		Între IT și IT (între bobinele de IT vecine)		
		a_{mj}	g_{mj}	s_{jc}	s_{jm}	s_{im}	a_{jt}	g_{jt}	a_{it}	g_{it}	s_e
1	3	1÷2	-	-	1,5	-	1,0	-	1,0	-	-
3	10	1÷2	-	-	2,0	-	1,5	-	1,0	-	-
6	20	1÷2	0,3	4,5	5,5	0,3	2,5	0,4	2,5	0,4	4,5
10	28	1÷2	0,4	7,0	8,0	0,4	3,5	0,4	4	0,6	7,0
15	38	1÷2	0,5	10	11,0	0,5	3,8	0,5	4,5	1	10
20	50	1÷2	0,5	12	13,0	0,5	4	0,5	4,5	1	12

NOTA.
1) Limița maximă a distanței a_{mj} , este indicată din punctul de vedere al răcirii.
2) Distanțele a_{jt} și a_{it} din tabel, sînt considerate minime din punct de vedere al izolării și nu sub aspectul circulației aerului de răcire.
3) Cînd înfășurarea de JT este spiralată, la $U_N = 1$ kV se ia $a_{mj} \geq 2$ cm, iar $g_{mj} = 0,4$ mm.

Se atrage atenția că valorile distanțelor de izolație indicate în tabelul 16.3, trebuie corelate și cu o serie de măsuri constructive, menite să îmbunătățească rigiditatea dielectrică a lor. În figurile 19.2 și 19.3 se indică două moduri concrete de realizare a acestor izolații.

După cum se observă din figura 19.3, când tensiunea nominală a unei înfășurări (sau a ambelor) $U_N \geq 20$ kV, se prevăd atât *cilindrii izolanti moi* cu grosimi de $2 \div 5$ mm, realizați din mai multe straturi de hîrtie și răsfrinți la capete, peste înfășurare (poziția 7), cât și *șeibi izolante răsfrinte* cu grosimi de $2 \div 6$ mm, confecționate separat din carton electrotehnic (poziția 8). Aceste măsuri contribuie substanțial la o bună comportare a distanțelor de izolație prevăzute în tabelul 16.3, mai ales la impulsul de tensiune.

Așa cum s-a amintit și cum se observă și din figurile 16.7 și 16.8, lângă miezul coloanei se află înfășurarea de joasă tensiune (notată cu indicele j sau 2), iar peste ea, înfășurarea de înaltă tensiune (notată cu indicele i sau 1). Suprapunerea înfășurărilor se poate face fie direct din procesul de fabricație al bobinelor sub formă de *înfășurare monolit* (la transformatoarele de puteri mai mici) fie, când bobinele sînt fabricate separat, la asamblarea lor pe miezul magnetic.

Similar ca la transformatoarele mici și în cazul transformatoarelor mijlocii și mari, pentru dimensionarea înfășurărilor și ferestrei sînt necesare următoarele etape:

- se determină înălțimea orientativă a bobinelor (fig. 16.8)

$$H_B = L_c - 2s_{tm} \text{ [mm]}, \quad (16.20)$$

unde s_{tm} se ia din tabelul 16.3.

După cum se observă din figura 16.8, distanțele s_{jm} și s_{tm} , pot avea valori diferite care se iau din tabelul 16.3, în funcție de tensiunea nominală a fiecărei înfășurări, caz în care înălțimile bobinelor de joasă tensiune (j.t.) și înaltă tensiune (i.t.) diferă între ele ($H_{Bj} > H_{Bi}$) situație întâlnită frecvent când tensiunile înfășurărilor diferă mult între ele (zeci de kV), sau s_{jm} și s_{tm} se pot lua egale la valoarea lui s_{tm} , când bobinele rezultă cu înălțimi egale;

— pentru dimensiunile stabilite ale conductoarelor izolate se estimează numărul de spire pe strat și numărul de straturi în funcție de care se determină, cu relațiile menționate în continuare pentru fiecare tip de înfășurare, dimensiunile înfășurării și apoi ale ferestrei transformatorului.

În scopul unei corecte conectări a bobinelor din cadrul unei înfășurări, pentru a se obține schemele de conexiuni și grupa de conexiuni impusă, trebuie stabilite convențiile pentru sensurile de înfășurare. În figura 16.9 se dau convențiile pentru sensurile de depănare ale bobinelor față de capătul (începutul) acestora, care va forma borna de intrare (vezi și fig. 15.10).

În continuare se vor prezenta principalele tipuri constructive de înfășurări, domeniul lor de aplicare și modul de determinare al dimensiunilor (înălțimea și grosimea) acestora.

a) **Înfășurările cilindrice** (fig. 16.10) se utilizează pentru curenți pînă la 800 A și tensiuni sub 1 000 V. Se realizează cu maximum 8 conductoare profilate în paralel. Pentru reducerea pierderilor suplimentare datorită refluxării curentului, se recomandă ca depănarea conductorului să se facă pe lat, fără ca latura mică a să depășească valorile din tabelul 16.4 (dar, de obicei, sub 4 mm), iar latura mare b să nu depășească, în mod normal, 15 mm.

Înfășurările cilindrice cu conductoarele în paralel ale unei căi de curent, așezate alăturat pe direcția axială a coloanei (fig. 16.11) se pot realiza într-un strat sau două straturi (fig. 6.10) și mai rar în trei sau patru straturi.

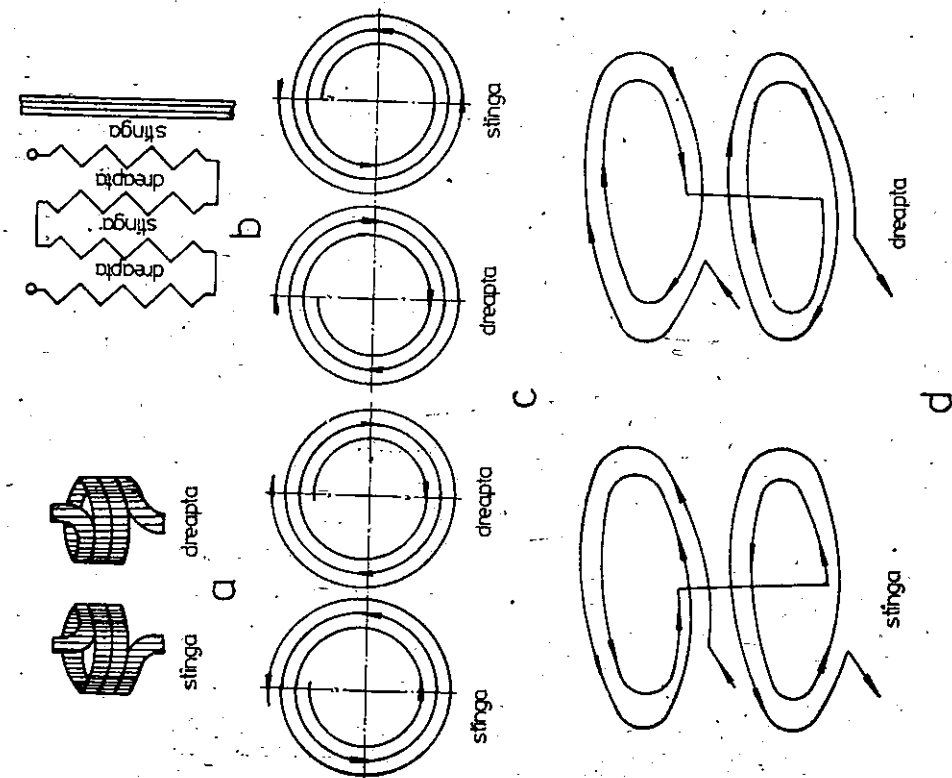
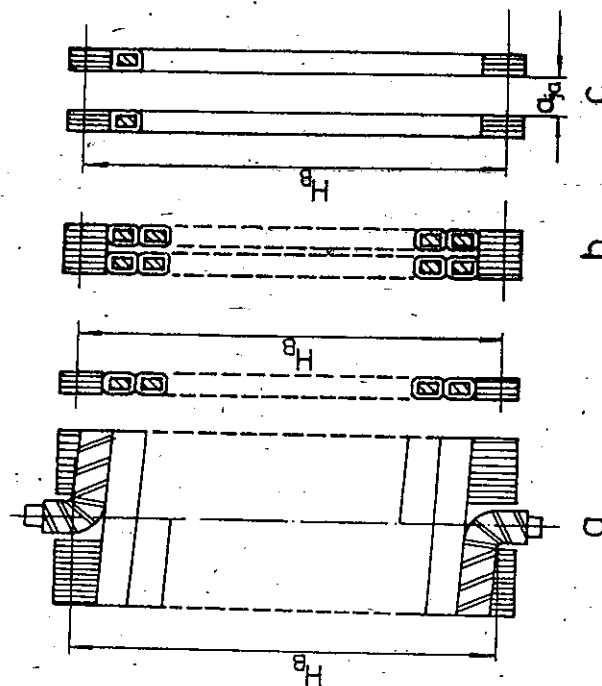


Fig. 16.9. Convenții privind sensurile de depănare ale bobinelor:
a — înfășurare cilindrică într-un strat; b — înfășurare stratificată;
c — sensurile la galefiți stîpiti; d — sensul la galefiți dubli.

Fig. 16.10. Înfășurare cilindrică:

a — într-un strat; b — în două straturi; c — în două straturi cu canal de răcire a_n între ele.



Tabelul 16.4

Dimensiunile radiale-orientative ale conductoarelor profilate utilizate la realizarea înfășurărilor cilindrice și stratificate pentru ca factorul k , de majorare a pierderilor în curent alternativ la 50 Hz, în aceste conductoare, să nu depășească anumite valori admisibile (Dimensiunile conductoarelor sînt în mm)

Numărul de straturi al înfășurării	Înfășurări de cupru				Înfășurări de aluminiu			
	k , mai mic ca :				k , mai mic ca :			
	1,05	1,10	1,15	1,20	1,05	1,10	1,15	1,20
1	10,0	11,8	12,5	13,2	11,6	13,5	15,6	16,8
2	7,1	8,0	8,5	9,5	8,8	10,0	10,8	11,6
3	5,8	6,3	7,1	7,5	6,4	8,0	9,3	10,0
4	4,75	5,6	6,3	7,1	5,9	6,9	8,0	8,6
5	4,0	5,0	5,6	6,0	5,1	6,4	6,9	7,4
6	3,75	4,75	5,0	5,6	4,7	5,9	6,4	6,9
7	3,55	4,25	4,75	5,0	4,4	5,5	6,0	6,5
8	3,35	4,0	4,5	4,75	4,1	5,1	5,5	6,0
9	3,15	3,75	4,25	4,5	3,8	4,7	5,1	5,5
10	3,0	3,55	4,0	4,25	3,8	4,4	5,1	5,5

În vederea asigurării răcirii, fiecare strat trebuie să fie în contact cu agentul de răcire cel puțin pe una din părți. Lățimile minime ale canalelor de răcire a_m se aleg, în funcție de putere și tensiune între 3 ÷ 8 mm.

Înfășurările cu conductoarele în paralel ale unei căi de curent așezate suprapus radial (cu straturile puse în paralel) trebuie prevăzute cu *transpoziții* sau *transpuneri* (fig. 16.12). Dacă există m conductoare în paralel suprapuse radial, atunci sînt necesare $m - 1$ transpuneri uniforme distribuite în lungul înfășurării (pentru explicații privind denumirea și rolul transpozițiilor, vezi mai jos la înfășurările spiralate). În unele cazuri practice, schemele transpunerilor complete din figura 16.12, a și b se reduc la schemele *transpunerilor simplificate* din figura 16.12, c și figura 16.13. În ambele situații pentru fiecare transpoziție se mărește înălțimea bobinei cu cel puțin o înălțime h_s a spirei.

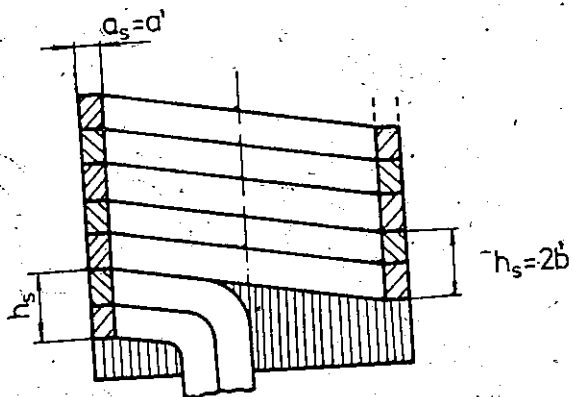


Fig. 16.11. Înfășurare cilindrică cu două conductoare în paralel, suprapuse axial (a' și b' sînt dimensiunile unui conductor izolat).

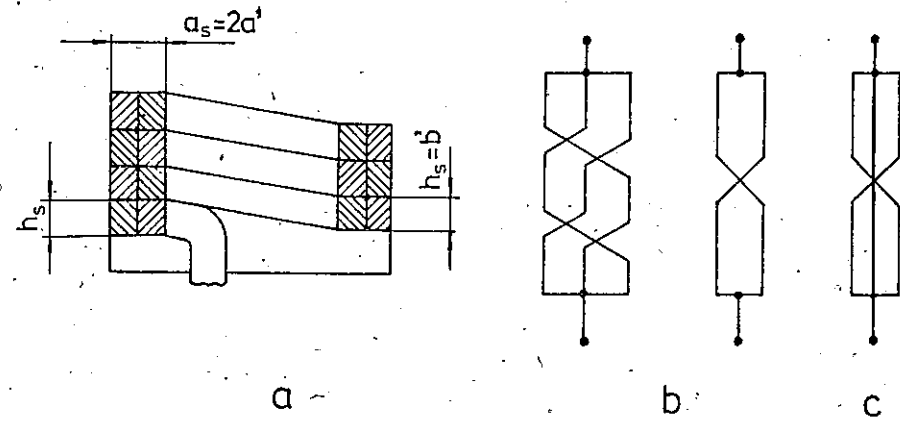


Fig. 16.12. Înfășurare cilindrică-cu conductoare în paralel suprapuse radial: a — secțiune printr-o bobină cu două conductoare în paralel; b — schema transpozițiilor complete pentru trei, respectiv două conductoare în paralel; c — schema transpunerilor simplificate pentru trei conductoare în paralel.

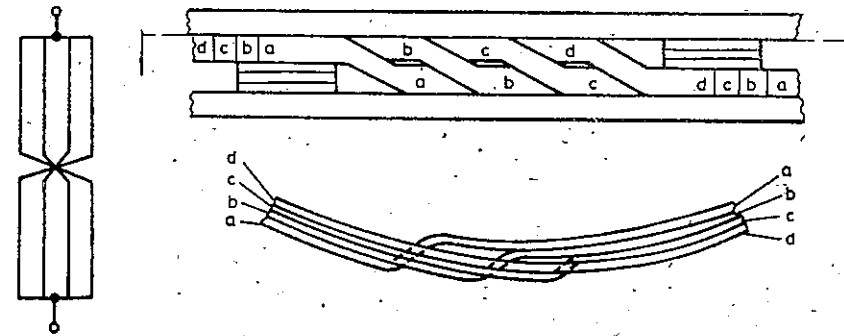


Fig. 16.13. Schema și modul de realizare a transpunerilor simplificate în cazul a patru conductoare în paralel.

Pentru nivelarea părților frontale ale bobinei la spirele de capăt ale straturilor se prevăd pene (segmente) circulare pentru egalizare și izolare, pene decupate dintr-un cilindru izolant sau formate din discuri izolante (fig. 16.14). În acest scop, se pot utiliza și rășinile de turnare. Penele de capăt se fixează de spirele marginale ale bobinei cu bandă izolantă.

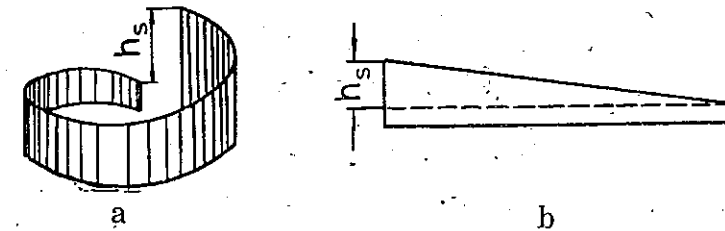


Fig. 16.14. Pană (sector) pentru nivelarea capetelor de bobină: a — forma normală; b — desfășurată.

Înălțimea unei înfășurări cilindrice care are w_s spire pe strat (determinat din condiția obținerii lui H_B în limitele relației (16.20)) este

$$H_B = (w_s + 1)h_s k_e + n_t h_s \text{ [mm]}, \quad (16.21)$$

unde:

h_s este înălțimea mănunchiului care formează spira (fig. 16.11 și fig. 16.12);

n_t — numărul transpozițiilor (fig. 16.13);

$k_e = 1,01 - 1,02$ factor care ține seama de abaterile efective ale grosimii izolației. Când bobinele se presează, fie înainte de impregnare fie, cele neimpregnate, la montaj, atunci se ia de regulă $k_e = 1$.

Grosimea înfășurării cilindrice este

$$a_j = n_s a_s + n_a a_{ja} + (n_s - n_a - 1) \delta_{iz} \text{ [mm]}, \quad (16.21, a)$$

unde:

n_s este numărul de straturi de dimensiuni a_s (fig. 16.12), a' fiind grosimea conductorului izolat (vezi rel. 16.14, b);

n_a — numărul canalelor axiale alese, de lățime a_{ja} ;

δ_{iz} — grosimea izolației dintre straturi de $1 \times 0,2$ mm preșpan, pentru tensiuni între straturi sub 150 V și

$2 \times 0,2$ mm sau $1 \times 0,5$ mm preșpan, pentru tensiuni pînă la 500 V.

La transformatoarele uscate în clasa de izolație F și H, se folosește ca izolație între straturi pînza de sticlă de 0,2—0,3 mm.

În prima fază a dimensionării înfășurării, se pleacă de la înălțimea aproximativă a înfășurării care rezultă din înălțimea L_c a coloanei, în funcție de distanțele de izolare stabilite conform figurii 16.8 și tabelului 16.3, de la numărul de spire corespunzător unei faze și de la secțiunea spirei. În baza acestor date globale, se determină dimensiunile conductoarelor pentru una din formele de bobine reprezentate în figura 16.11 sau figura 16.12, cu cerințele specifice lor.

Sub aspectul realizării, înfășurarea cilindrică este cea mai simplă și mai ieftină dintre toate tipurile de înfășurări utilizate la tensiuni joase.

b) **Înfășurările spiralate** (v. și par. 15.2.5) sînt specifice curenților mari, peste 200 A și tensiuni pînă la 35 kV.

Înfășurările spiralate se realizează cu unul sau mai multe începuturi, fiecare început (mănunchi) avînd m conductoare profilate în paralel suprapuse radial (fig. 16.15), iar $m \in [1; 12]$. Dimensiunile conductoarelor în mm, sînt cuprinse în domeniile $a \in [2; 4]$, $b \in [8; 16]$, iar secțiunile conductoarelor nu trebuie să depășească $40 \div 60 \text{ mm}^2$.

Între spire, sau între mănunchiuri care alcătuiesc spire, sînt prevăzute canale radiale h_c între $5 \div 8$ mm pentru transformatoarele pînă la 630 kVA și între $4 \div 7$ mm pentru transformatoarele mai mari: la transformatoarele cu puteri peste 800 kVA, pentru diminuarea forțelor axiale, se măresc aceste canale, în dreptul galeților de reglaj putînd ajunge pînă la $15 \div 20$ mm.

Conductoarele elementare (firele în paralel) fiind suprapuse radial, unul peste altul, vor avea atît lungimi cît și poziții în cîmpul magnetic de scăpări diferite, adică parametrul (rezistențe și reactanțe de scăpări) diferiți. Acest lucru conduce la apariția între firele în paralel, a unui curent de circulație și deci la pierderi electrice suplimentare importante.

De aceea, pentru uniformizarea lungimilor și pentru a ocupa fiecare conductor în paralel, succesiv aceeași poziție în cîmpul magnetic de scăpări, ceea ce înseamnă că firele în paralel vor avea aceeași parametri și deci nu vor mai apare curenții de circulație între ele, sînt necesare transpoziții sau

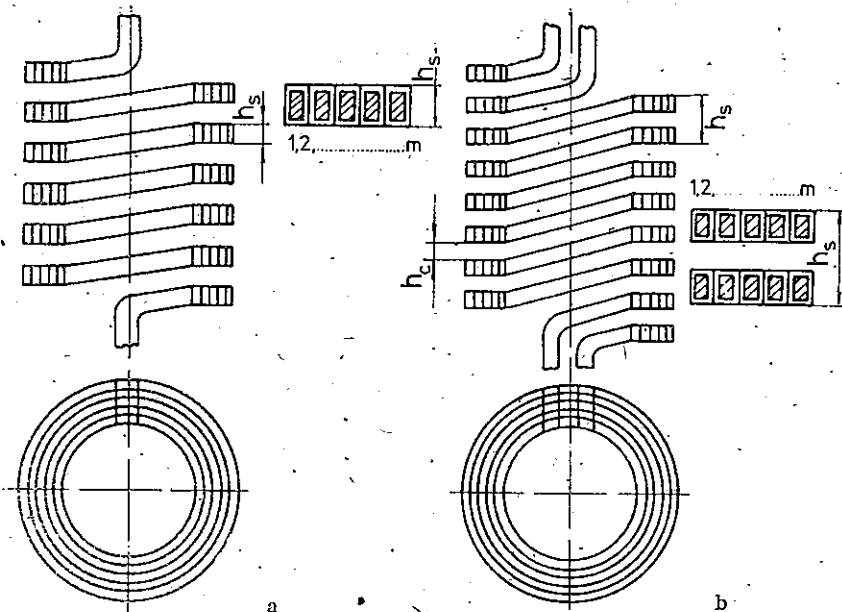


Fig. 16.15. Înfășurări spiralate:

a — cu un început; b — cu două începuturi.

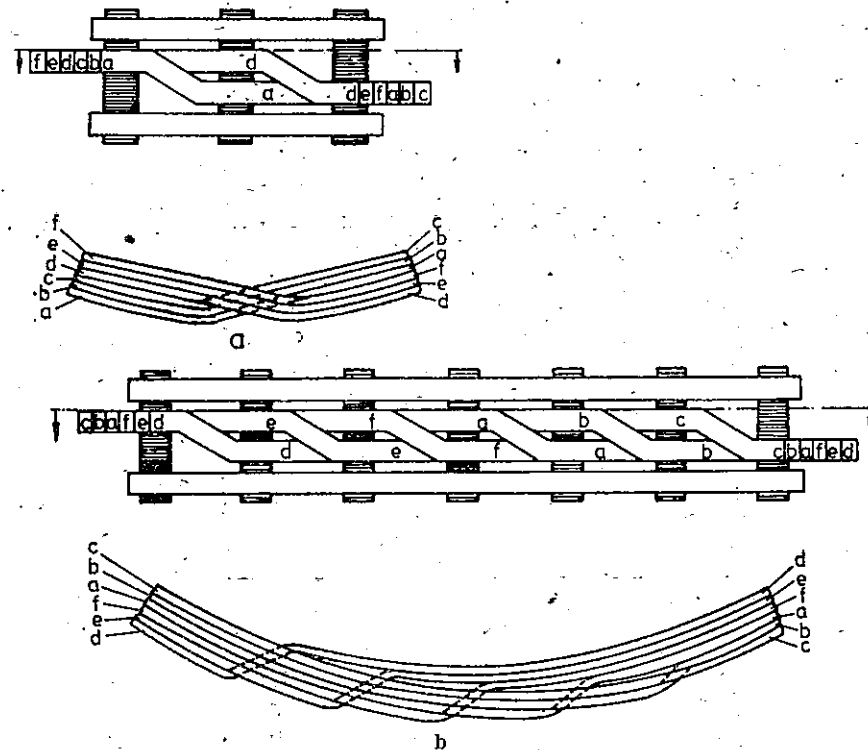


Fig. 16.16. Modul de realizare a transpunerilor la înfășurarea spiralată cu un început și șase conductoare în paralel (suprapuse radial):

a — transpuneri pe grupe de conductoare (transpunere de grup); b — transpuneri a tuturor conductoarelor, luate câte unul (transpunere simplificată sau totală).

transpuneri, adică schimbarea în timpul deparării (bobinării) înfășurării a ordinii sau poziției firelor în paralel între ele, astfel încât fiecare fir în paralel să ocupe aceeași poziție, o anumită înălțime din bobină (aceeași pentru toate firele în paralel).

La înfășurările cu un început, teoretic sînt necesare $m - 1$ transpuneri uniform repartizate pe înălțimea acestora. Deoarece în locurile în care se fac transpozițiile sînt necesare canale mai mari, cum se vede în figura 16.16, în practică se utilizează un sistem simplificat, cu transpoziții numai în trei locuri (fig. 16.17). În două locuri, la $1/4$ și la $3/4$ din numărul total de spire se

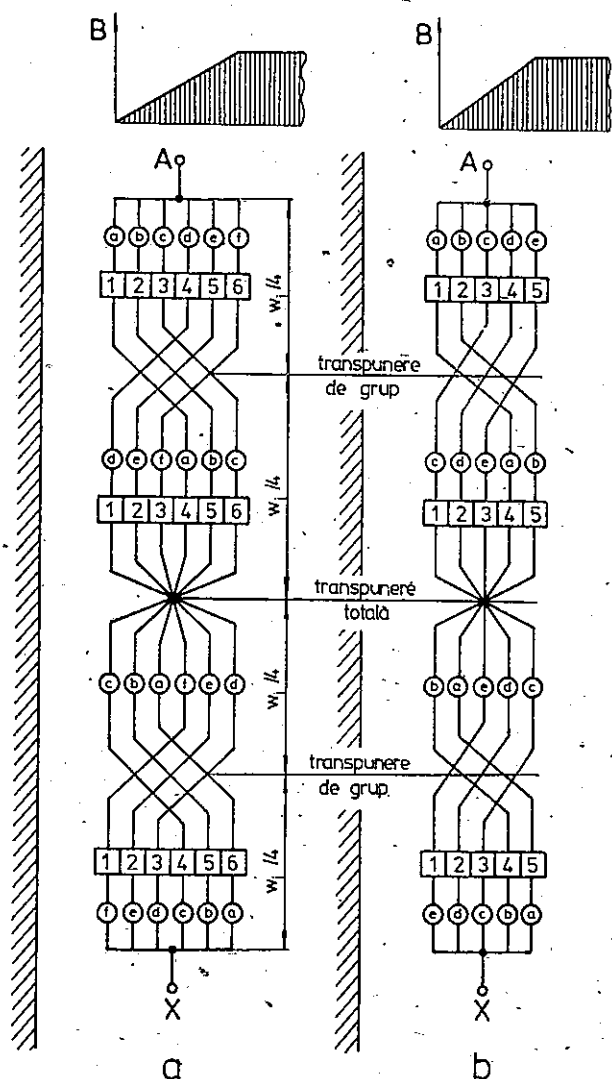


Fig. 16.17. Schema pentru transpuneri simplificate la înfășurările spiralate cu un început:
a — cu număr par de conductoare; b — cu număr impar de conductoare.

fac transpoziții (transpuneri) de grup, iar la mijloc, o transpunere a tuturor conductoarelor, luate câte unul numită *transpunere simplificată* sau *totală*. Schema transpunerilor este corect realizată dacă suma pozițiilor pe care le ocupă un conductor este aceeași pentru toate conductoarele din cadrul mănunchiului. Astfel, pentru conductoarele din figura 16.17, a, suma este 14 (conductorul a: $1 + 4 + 3 + 6 = 14$), iar pentru cele din figura 16.17, b, este 12 (conductorul a: $1 + 4 + 2 + 5 = 12$). Aceeași sumă se găsește, în ambele cazuri, și pentru celelalte conductoare: b, c, d etc.

Înălțimea înfășurării spiralate cu un început este

$$H_B = b'(w_j + 1 + n_t) + k_t h_c (w_j + n_t) \text{ [mm]} \quad (16.22)$$

unde, în afara notațiilor cunoscute;

n_t este numărul locurilor transpozițiilor;

$k_t = 0,94 - 0,96$, este factorul de tășare.

În cazul din figura 16.17, $n_t = 3$ și relația (16.22) devine

$$H_B = b'(w_j + 4) + k_t h_c (w_j + 3) \text{ [mm]}. \quad (16.22, a)$$

La înfășurările cu două începuturi, teoretic sînt necesare $2m - 1$ transpoziții uniforme repartizate în lungul înfășurării.

Numărul transpozițiilor se poate reduce la $m - 1$ dacă se fac transpunerile duble. În figura 16.18 se arată poziția conductoarelor transpuse la o înfășurare cu $2m = 8$ conductoare în paralel și modul cum se realizează transpunerile simple și duble.

Transpunerile fiind uniform repartizate în lungul înfășurării, dacă numărul de spire w_j este divizibil la numărul m de conductoare în paralel suprapuse radial, atunci transpunerile se plasează pe o generatoare a cilindrului. În caz contrar, ele se plasează pe o elicoidă.

Trebuie menționat că înfășurările cu două începuturi nu necesită spații suplimentare între spire în locurile unde se fac transpunerile.

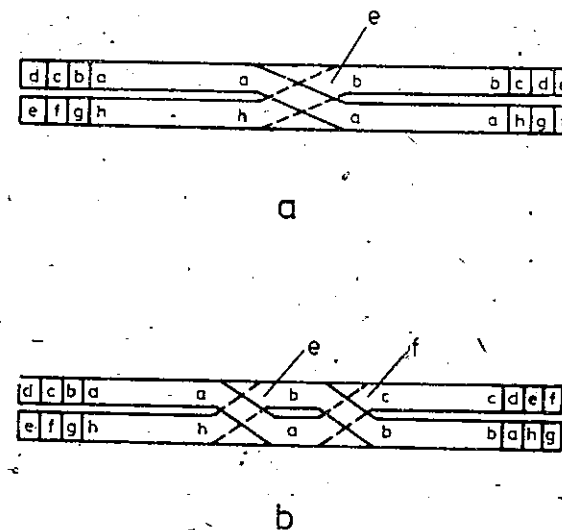


Fig. 16.18. Înfășurarea dublu spiralată:
a — cu transpunere simplă; b — cu transpunere dublă.

Înălțimea înfășurărilor dublu spiralate, când se lasă canal atât între mânunchiurile spirei, cât și între spire (fig. 16.15; b) este

$$H_B = 2b'(w_j + 1) + k_c h_c (2w_j + 1) \text{ [mm]}, \quad (16.23)$$

iar când se lasă canal numai între spire (cele două mânunchiuri fiind alăturate)

$$H_B = 2b'(w_j + 1) + k_c h_c w_j \text{ [mm]}. \quad (16.23, a)$$

Grosimea înfășurărilor spiralate cu m conductoare suprapuse radial este

$$a_j = ma' \text{ [mm]}. \quad (16.23, b)$$

În prima etapă a dimensionării înfășurării, numărul de începuturi al acesteia se estimează în funcție de b' rezultat din relația (16.22 a) în care se ia $k_c = 1$ și H_B dat (estimat din L_c și distanțele de izolare v , rel. 16.20) stabilite conform figurii 16.8 și tabelului 16.3

$$b' = \frac{H_B}{w_j + 4} - h_c \frac{w_j + 3}{w_j + 4} \text{ [mm]}. \quad (16.24)$$

Dacă $b' \leq 15$ mm, se alege înfășurarea simplu spiralată — cu un început, iar dacă $15 < b' \leq 35$ mm se alege înfășurare dublu spiralată — cu două începuturi.

Înfășurările spiralate au rezistență mecanică bună, la puteri mari putându-se executa ușor și răirea spirelor pentru realizarea canalelor. Răcirea este de asemenea bună.

Utilizarea înfășurărilor spiralate ca înfășurări de înaltă tensiune, nu este potrivită, datorită dificultăților care apar la efectuarea lipiturilor necesare prizelor pentru reglarea tensiunii și la stabilirea valorilor treptelor de reglaj impuse, numărul de spire fiind mic.

În privința prețului de cost, înfășurarea spiralată este mai scumpă decât înfășurarea cilindrică cu conductoare în paralel, datorită manoperei necesare realizării transpunerilor și pentru distanțarea spirelor între ele. Totodată, factorul de umplere a ferestrei este mai mic.

c) **Înfășurările continue, în galeți** sînt specifice tensiunilor ridicate, peste 3 kV.

Înfășurările continue se realizează din conductoare la care dimensiunile conductoarelor, în mm, sînt cuprinse în domeniile $a \in [1; 2; 3]$ și $b \in [12; 18]$.

În figura 16.19 se indică stadiile succesive de realizare a unei înfășurări continue, în galeți. Capătul A se fixează de cadrul pe care se realizează bobina, iar capătul X vine de la tamburul pe care este înfășurat conductorul. Se depănă, de exemplu, 6 spire suprapuse (poziția a) care constituie un *galet normal*, apoi, în mod analog, încă 6 spire alăturat (poziția b). Se oprește mașina de bobinat și se fixează capătul X (poziția c), apoi se mută spirele una peste alta cum se arată la poziția d din figura 16.19 pînă se ajunge la situația e. Se trage galetul lîngă celălalt, la distanța impusă de distanțier cu grosimea h_c (situația f) realizîndu-se astfel *galetul răsturnat*, apoi se continuă depănarea cu spirele următoare realizînd un nou galet normal, după care se repetă operațiunile descrise mai înainte pentru realizarea celui de al doilea galet răsturnat ș.a.m.d.

Înfășurarea astfel obținută cuprinde bobine în formă de disc, numite *galeți*, care au trecerile consecutiv în interior, respectiv în exterior, fără a tăia conductorul și eliminîndu-se lipiturile, de unde și denumirea de *înfășurare continuă*.

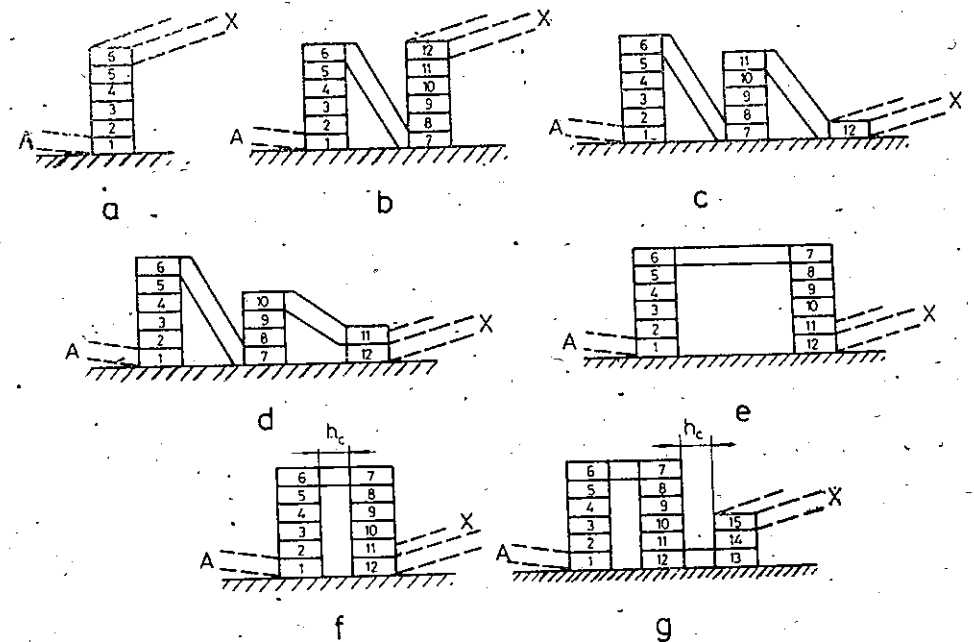


Fig. 16.19. Stadiile succesive la realizarea unei înfășurări continue, în galeți.

Galeții înfășurărilor continue se pot realiza cu un număr întreg sau fracționar de spire, număr care poate diferi la galeții aceleiași înfășurări, cu condiția ca diametrul exterior al galeților să fie practic același. Astfel, galeții de intrare de la înfășurările cu tensiuni nominale peste 15 kV, galeți care conțin 3—10% din numărul de spire, se execută cu izolație întărită și, pentru a păstra același diametru cu galeții mijlocii, vor trebui să aibă un număr de spire mai mic.

Canalele radiale h_c dintre galeți, se aleg în limitele 4—8 mm, valorile mai mari fiind pentru transformatoare mai mici. Canalele radiale se pot lăsa și din doi în doi galeți, dacă răcirea este asigurată (fig. 16.20).

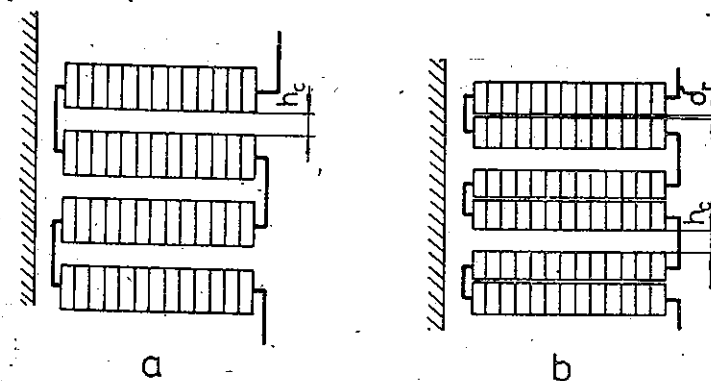


Fig. 16.20. Scheme de principiu pentru așezarea galeților la înfășurările continue:

a — cu canal după fiecare galet; b — cu canal după fiecare doi galeți, aceștia fiind izolați între ei prin rîndurile de prespan cu grosimea δ .

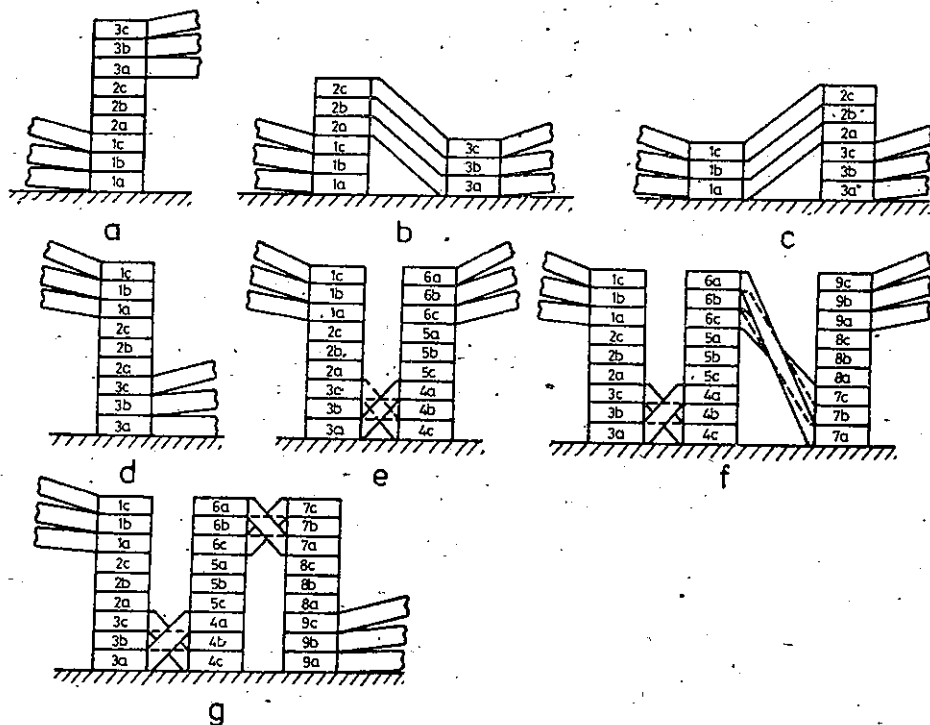


Fig. 16.21. Stadiile de realizare a unei înfășurări continue, în galeți, cu trei conductoare în paralel (se observă și realizarea transpozițiilor).

În cazul curenților mai mari și tensiuni ridicate, când nu se poate realiza o înfășurare spiralată din cauza numărului mare de spire, se pot realiza înfășurări continue în galeți, cu pînă la 4 conductoare în paralel suprapuse radial. La realizarea unei asemenea înfășurări care necesită transpoziții, transpunerile se fac, în locurile de trecere de la un galet la altul, cum se vede în figura 16.21.

Înălțimea bobinelor la înfășurările cu canale radiale între toți galetii (fig. 16.20, a) este

$$H_B = n_g b' + k_t h_c (n_g - 1) \text{ [mm]}, \quad (16.25)$$

iar la înfășurările cu canale din 2 în 2 galetii (fig. 16.20, b) este

$$H_B = n_g b' + k_t h_c \left(\frac{n_g}{2} - 1 \right) + \frac{n_g}{2} \delta_r \text{ [mm]}; \quad (16.25, a)$$

grosimea înfășurărilor continue este

$$a_t = n_s n_p a' \text{ [mm]}, \quad (16.26)$$

în care:

- n_g — este numărul de galeți de pe o coloană;
- n_s — numărul maxim de spire al unui galet;
- δ_r — grosimea discurilor izolate dintre doi galetii alăturați (fig. 16.20, b), în mm;
- n_p — numărul de conductoare în paralel, dacă este cazul (factorul de tasare $k_t = 0,94-0,96$, are aceleași valori ca în relațiile (16.22) și (16.22, a)).

Izolația dintre galetii alăturați se realizează din minimum două rondele a căror grosime să fie cel puțin 0,5 mm fiecare.

Canalele radiale h_c pot avea valori diferite, 6 ÷ 8 mm la extremitățile bobinei și 4 ÷ 7 mm la mijloc; rezultă că la calculul înălțimii bobinei, cu relația (16.25) sau (16.25, a) se va avea în vedere acest lucru, luîndu-se separat înălțimea tuturor canalelor.

În prima etapă, numărul orientativ de galeți se determină, după caz, din relațiile (16.25) și (16.25, a) și anume

$$n_g = \frac{H_B + k_t h_c}{b' + k_t h_c} \quad (16.27)$$

sau:

$$n_g = \frac{2(H_B + k_t h_c)}{2b' + k_t h_c + \delta_r} \quad (16.27, a)$$

în care H_B se estimează inițial din relația (16.20) cu distanțele de izolare stabilite conform figurii 16.8 și tabelului 16.3, iar valorile pentru celelalte elemente se aleg în limitele indicate mai sus.

Numărul mediu de spire al galetilor se estimează luînd ca bază numărul de spire pe fază w_t

$$w_g = \frac{w_t}{n_g} \quad (16.28)$$

La definitivarea numărului de galeți și al numărului de spire pentru fiecare tip de galet, trebuie respectate următoarele condiții:

— spirele de reglaj și spirele cu izolație întărită trebuie așezate în galeți separați;

— pe o coloană se pot găsi trei tipuri de galeți: de capăt, normali sau mijlocii și de reglaj. Numărul galetilor normali și de capăt trebuie să fie cu soț, iar cel al galetilor de reglaj, ideal ar trebui să fie un multiplu de patru pentru o scoatere ușoară a prizelor;

— numărul de spire corespunzător unui galet poate fi întreg sau fracționar. Când numărul este fracționar, numitorul fracției trebuie să fie egal cu numărul distanțoarelor, pentru înlăturarea erorilor la obținerea numărului total de spire (dacă sînt 16 distanțoare și 7 1/4 spire pe galet, se vor trece 7 4/16 spire, pentru ca bobinatorul, după înfășurarea celor 7 spire, să mai înfășoare conductorul pînă la distanțorul al patrulea);

— dimensiunile radiale ale galetilor să nu difere; galetii cu spire mai puține, dacă nu au aceeași grosime, vor fi aduși la aceeași grosime fie printr-un suport la bază, fie prin introducerea unor benzi de carton între spire, cum se arată la înfășurările secționare;

— pentru repartizarea mai ușoară a spirelor între galeți, dimensiunile canalelor radiale dintre galeți, se pot lua cu 10-30% mai mari decît limitele minime indicate mai jos.

Înfășurarea continuă necesită mai multă manoperă și este mai costisitoare decît înfășurarea cilindrică echivalentă. Dar, datorită rezistenței mecanice mari, a comodității realizării prizelor de reglaj, a lipsei lipiturilor între galetii, și a simplității consolidării axiale și radiale, înfășurarea continuă este utilizată pe scară largă ca înfășurare de înaltă tensiune la transformatoarele cu puterea pe o coloană de la 60 kVA în sus și pentru tensiuni peste 3 kV, fără limită superioară.

Cînd înfășurarea continuă este utilizată ca înfășurare de joasă tensiune, la transformatoarele cu puterea mai mare de 800 kVA, se poate realiza foarte simplu rărirea spirelor în dreptul galetilor de reglaj de pe înalta tensiune, prin mărirea canalelor radiale pînă la 15 ÷ 20 mm.

d) **Înfășurările secționare**, numite și **înfășurări în galeți**, sînt utilizate ca înfășurări de înaltă tensiune, pînă la 60 kV. Ele se realizează din conductoare rotunde cu diametre cuprinse între 0,5 și 3 mm, sau din conductoare profilate, cu secțiuni de la 8 la 16 mm² și de formă apropiată de un pătrat. La aceste înfășurări nu se utilizează conductoare în paralel.

Înfășurările secționare pot fi depănate în același sens (fig. 16.22), trecerea de la ultimul strat al unui galet la primul strat al următorului, făcîndu-se prin spațiul dintre galeți.

Pentru simplificarea legăturilor între galeți și asigurarea unei izolații mai bune, se execută galeți dubli denumiți și **galeți jumelați**, adică perechi de cîte doi galeți alăturați, din care unul este înfășurat la dreapta iar altul la stînga (fig. 16.23 și fig. 16.24). Cei doi galeți, unitari, care formează galetul dublu, pot diferi prin numărul de spire, prin izolația spirelor, izolația dintre straturi și, în unele cazuri, chiar prin secțiunea conductoarelor. Cu toate acestea, diametrul exterior trebuie să fie practic același la toți galeții, la galeții

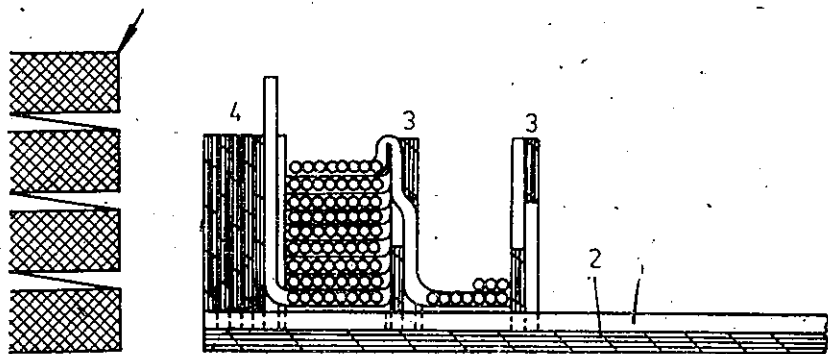


Fig. 16.22. Înfășurarea în galeți depănați în același sens (galeți simpli): a — schema de legare a galeților; b — trecerea (la execuție) de la un galet la altul.

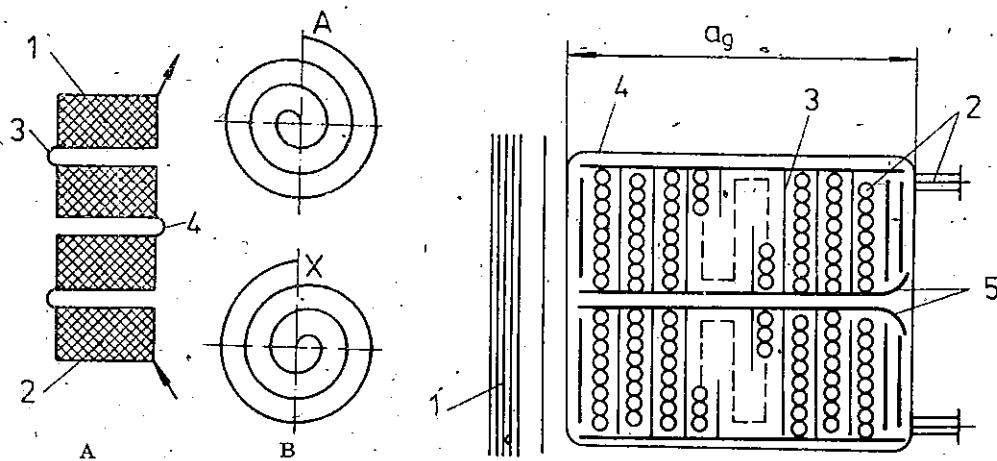


Fig. 16.23. Schema de legare a galeților dubli (jumelați) (a) și sensul lor de depănare (b): 1, 2 — galeți jumelați; 3 — legătura interioară; 4 — legătura exterioară.

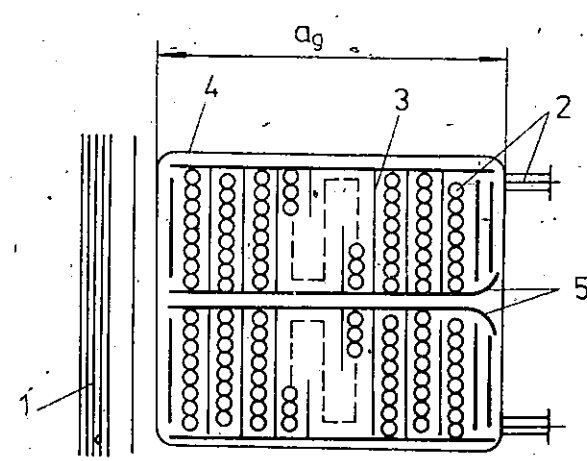
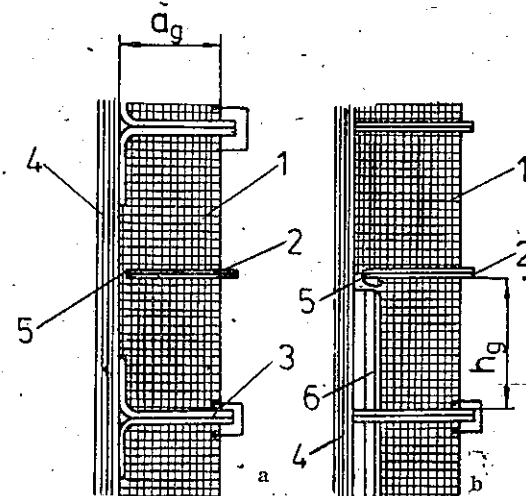


Fig. 16.24. Secțiune prin doi galeți jumelați: 1 — cilindru izolant; 2 — conductor; 3 — izolație între straturi; 4 — izolația galetului; 5 — izolația între galeții jumelați.

Fig. 16.25. Înfășurarea secționată (în galeți) depănată direct pe cilindru izolant:

a — cu galeți de aceeași dimensiune radială (grosime); b — cu galeți de dimensiuni radiale diferite; 1 — galet; 2 — disc izolant; 3 — disc izolant răsfrânt; 4 — cilindru izolant; 5 — legătură interioară; 6 — suport de compensare.



mai subțiri crescîndu-se diametrul interior prin suportii de compensare (fig. 16.25, b — poziția 6), din material electroizolant.

Galeții sînt separați între ei prin discuri izolante (fig. 16.25) sau distanțoare care asigură canale radiale (fig. 16.26).

Conductoarele se depănă direct pe cilindrii izolanți sau pe pene, permițînd circulația fluidului de răcire prin canalele formate. Modul de execuție al galeților dubli este, în principiu, similar cu cel al galeților de la înfășurarea continuă. Legăturile interioare se realizează la depănare, iar legăturile exterioare se execută după montarea galeților.

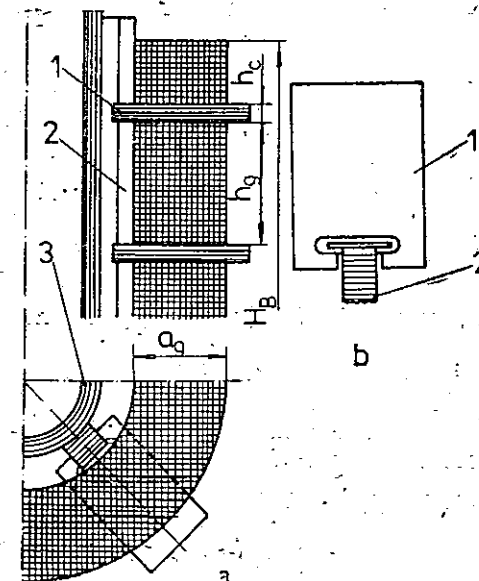


Fig. 16.26. Așezarea distanțoarelor la înfășurările secționare (în galeți): a — secțiune longitudinală și transversală; b — modul de prindere a distanțoarelor cu penete respective; 1 — distanțor; 2 — pană; 3 — cilindru izolant.

Numărul de galeți în care trebuie divizată înfășurarea se determină, ținînd seama de solicitările termice, de tensiunea nominală care revine unui galet și de rezistența mecanică la acțiunea forțelor electrodinamice axiale. Astfel, pentru asigurarea răcirii la o grosime radială a galetului de 30 ÷ 35 mm, înălțimea lui nu trebuie să depășească 30 ÷ 35 mm. Sub aspectul tensiunilor de lucru, se recomandă ca tensiunea între două straturi a galeților să nu depășească 200 — 400 V. Rezistența mecanică este foarte bună la galeții realizați cu conductor dreptunghiular; la cei realizați cu conductor rotund, aceasta scade pe măsură ce diametrul conductorului depășește 2 mm și se impune limitarea înălțimii galetului la 30 ÷ 40 mm.

Valori informative privind numărul galeților se dau, în funcție de puterea și tensiunea de fază a transformatorului, în tabelul 16.5. Distanțele dintre galeți funcție de puterea și nivelul de izolație al înfășurărilor, se iau între aceleași limite ca și canalele h_c de la înfășurarea continuă, iar izolația între straturile galeților se ia din folie izolantă cu grosimea de 0,4–0,5 mm; pentru galeții de la capete și cu grosimea de 0,15–0,25 mm pentru galeții mijlocii.

Tabelul 16.5

Numărul orientativ de galeți realizați din conductoare rotunde, în funcție de puterea și tensiunea transformatorului

U_{fN} [kV]	S_N [kVA]						
	20–50	75–125	160–200	250–315	400–500	630–800	1 000–1 600
6 și 10	2	2–6	2–8	10	12	14	16
15 și 20	2	2–8	2–10	12	14	16	18
30 și 35	8	10	12	14	16	18	20

La tensiuni nominale mai mari de 15 kV, primii doi galeți de intrare și ultimii doi galeți ai fiecărei faze se execută cu izolația spirelor și cea dintre straturi, întărită.

Având estimat numărul galeților, se determină partea din înălțimea bobinei ocupată de canalele radiale și de grosimile discurilor izolante, dintre galeți (fig. 16.25 și fig. 16.26)

$$h_{iz} = \Sigma h_c + \Sigma \delta_r \text{ [mm]}, \quad (16.29)$$

unde, lățimea canalelor h_c dintre galeți se ia în limitele 4–8 mm, ca la înfășurarea continuă, iar grosimile δ_r ale discurilor sau rondelilor izolante se iau de 1–2 mm ($2 \times 0,5 + 4 \times 0,5$ mm).

Înălțimea orientativă a tuturor galeților este

$$\Sigma h'_g = H_B - h_{iz} \text{ [mm]}, \quad (16.30)$$

iar înălțimea medie a unui galeț,

$$h_g = \frac{\Sigma h'_g}{n_g} \text{ [mm]}. \quad (16.30, a)$$

În acest caz, având w_s spire pe fază, numărul orientativ de spire al unui galeț se determină cu relația (16.28).

Având înălțimea galețului și diametrul izolat d' (sau înălțimea b') a conductorului, se poate estima numărul de straturi n_s , cu ajutorul cărora se definește repartitia spirelor pe galeți, fără a se realiza mai mult de 4 tipuri de galeți. Înălțimea definitivă a galețului va fi deci

$$h_g = (w_s + 1)d' \text{ [mm]}, \quad (16.31)$$

iar cea a înfășurării

$$H_B = h_g + k_t \Sigma h_c + \Sigma \delta_r \text{ [mm]}, \quad (16.31, a)$$

unde w_s este numărul de spire pe un strat al galețului.

Lățimile h_c ale canalelor radiale se aleg în limitele indicate mai sus rotunjindu-se pentru a se obține înălțimea totală a înfășurării de înaltă tensiune egală cu cea a înfășurării de joasă tensiune,

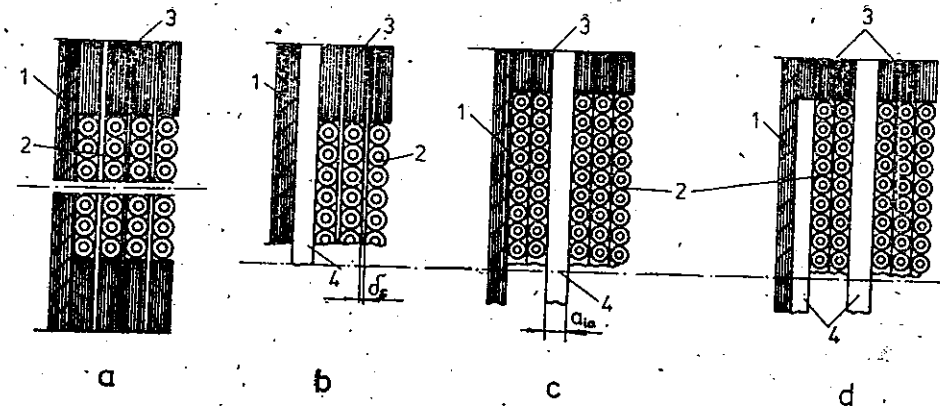


Fig. 16.27. Înfășurări stratificate:

a — depănată direct pe cilindru; b — depănată pe pene care asigură canal axial; c — depănată pe cilindru și cu canal axial de răcire interior; d — depănată pe pene și cu canal axial de răcire interior; 1 — cilindru izolat; 2 — izolație între straturi; 3 — piese de egalizare; 4 — pene pentru realizarea canalelor axiale.

Grosimea galețului se determină cu relația

$$a_g = n_s d' + (n_s - 1) \delta_s \text{ [mm]}, \quad (16.32)$$

unde grosimea izolației dintre straturi δ_s se ia de 0,4–0,5 mm la galeții de capăt (sus și jos), de 0,3 mm la galeții vecini celor de capăt și de 0,12–0,15 mm la cei mijlocii.

Înfășurările în galeți dubli au rezistență mecanică și răcire bună, dar tehnologia de fabricație este complicată și conduce la o umplere proastă a ferestrei, mai ales când sînt canale radiale între toți galeții. Domeniul de aplicare este limitat numai de dimensiunile conductoarelor.

Înfășurările în galeți simpli (înfășurați în același sens) sînt mai simple, iar legăturile de trecere dintre galeții vecini pot conduce în exploatare la scurtcircuite.

e) Înfășurările stratificate sau în mai multe straturi sînt utilizate la transformatoarele de putere cu tensiuni peste 1 kV. Ele se realizează din conductoare rotunde, cu diametrul pînă la 3–3,5 mm, sau din conductoare profilate cu secțiuni pînă la 30 mm² (fig. 16.27).

Înfășurările stratificate se pot realiza și cu 2–4 conductoare în paralel, așezate alăturat în direcția axială, dar straturile sînt conectate numai în serie.

Între straturile înfășurării, care are w_s spire pe strat, se adaugă folie de materiale termoizolante corespunzătoare claselor de izolație, avîndu-se în vedere tensiunea dintre straturi dată de relația

$$U_s = 2w_s e_1 \text{ [V]}. \quad (16.33)$$

În funcție de această tensiune, se stabilește atît grosimea izolației dintre spire, cît și lungimea cu care izolația trebuie să depășească bobina pentru înlăturarea conturnărilor (tabelul 16.6). La transformatoarele uscate se utilizează ca izolație între straturi pînza de sticlă de 0,2–0,3 mm.

Pentru îmbunătățirea condițiilor de răcire, se folosesc canale axiale care divizează înfășurarea în două părți, partea interioară avînd în jurul a 1/3 pînă la 2/5 din numărul total de straturi.

izolația cu hîrtie de 0,12 mm între straturi, pentru înfășurările stratificate (pentru alte grosimi ale hîrtiei se variază numărul de straturi, astfel încît să se respecte grosimea izolației dintre straturi)

Tensiunea normală între două straturi [V]	Grosimea izolației dintre straturi [mm]	Depășirea capătului bobinei de către izolația dintre straturi [mm]
<1 000	2×0,12	1,0
1 000—2 000	3×0,12	1,6
2 001—3 000	4×0,12	1,6
3 001—3 500	5×0,12	1,6
3 501—4 000	6×0,12	2,2
4 001—4 500	7×0,12	2,2
4 501—5 000	8×0,12	2,2
5 001—5 500	9×0,12	2,2

Notă. Pentru transformatoarele cu puteri mai mari de 1 000 kVA, izolația între straturi se alege tot din acest tabel, dar nu se ia mai puțin de 6 × 0,12 mm, iar depășirea izolației de capăt nu se ia mai mică de 2 mm, chiar dacă tensiunile dintre straturi sînt mai mici.

Lățimea canalelor pentru o răcire bună se ia între 4÷7 mm pentru canale cu lungime pînă la 1 m și între 6÷10 mm cînd canalele sînt mai lungi de 1 m, iar valori orientative pentru grosimea bobinelor se dau în figura 16.28.

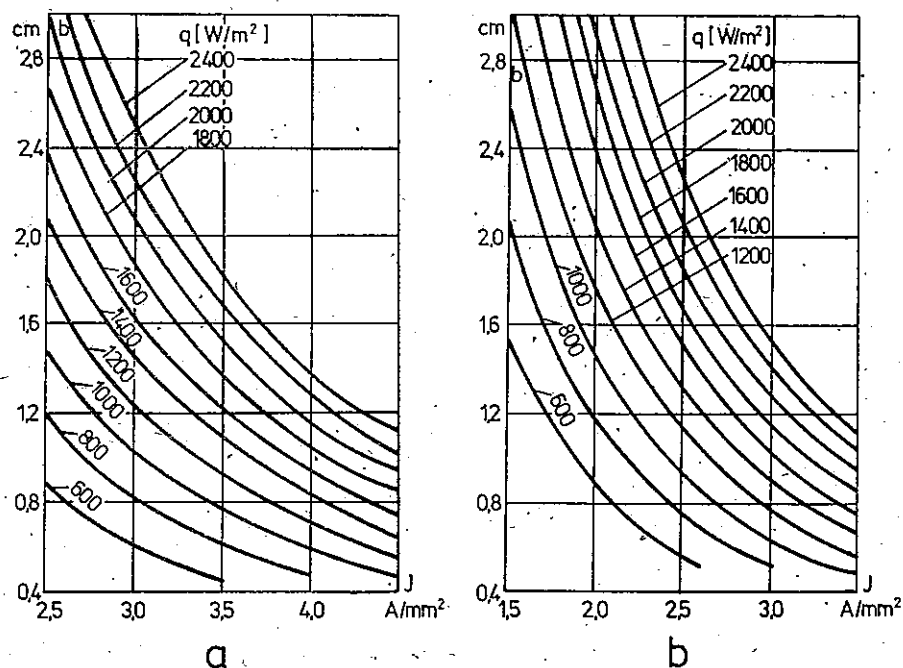


Fig. 16.28. Grosimile orientative ale bobinelor din conductoare profilate, funcție de densitatea de curent din conductor, pentru diferite valori ale densității de suprafață, q , date de pierderile produse în acele bobine:

a — conductoare de cupru; b — conductoare de aluminiu.

Înălțimea înfășurării stratificate cu conductor rotund, este

$$H_B = d'(w_s + 1) \text{ [mm]}, \quad (16.34)$$

iar grosimea, pentru cazul din figura 16.27, a și b , este

$$a_i = n_s d' + (n_s - 1) \delta_s \text{ [mm]} \quad (16.35)$$

și pentru cazul din figura 16.27, c și d este

$$a_i = n_s d' + a_{ia} + (n_s - 2) \delta_s \text{ [mm]}, \quad (16.35, a)$$

în care, în afara notațiilor cunoscute:

n_s este numărul de straturi;

δ_s — grosimea izolației dintre straturile de conductoare, în mm, care se alege din tabelul 16.6.

În cazul înfășurărilor cu conductor profilat, dimensiunile bobinelor se determină tot cu relațiile (16.34), (16.35) și (16.35, a), cu singura deosebire că diametrul d' al conductorului izolat se înlocuiește, după caz, cu dimensiunile conductorului profilat a' (pentru grosime) și b' (pentru înălțime).

La înfășurările prevăzute cu ecran, dimensiunea radială a înfășurării se mărește cu o grosime care poate fi între 0,5—1 mm.

Luînd înălțimea bobinei egală sau mai mică cu a înfășurării de joasă tensiune, se determină numărul de spire pe strat $w_s = \frac{H_B}{a'} - 1$. Dacă sînt utilizate conductoare profilate, atunci se înlocuiește d' cu b' .

Numărul de straturi $n_s = \frac{w_i}{w_s}$, se rotunjește, prin adaus, la un număr

întreg; se determină din nou $w_s = \frac{w_i}{n_s}$ și apoi $H_{B1} = (w_s + 1)d'$. Se admit și situații cînd pe ultimul sau ultimele două trei straturi numărul de spire este mai mic, dar spirele vor fi așezate simetric față de mijlocul bobinei.

Înfășurările stratificate sînt utilizate curent atît la transformatoarele de mică putere cu spire multe și de secțiune mică, cît și la înfășurările de înaltă tensiune ale transformatoarelor mari, limitarea fiind impusă de rezistența mecanică la forțele electrodinamice axiale de scurtcircuit.

Înfășurările stratificate realizate cu conductor rotund se limitează la transformatoarele cu puteri pe o coloană pînă la 200 kVA. La puteri mai mari, se utilizează conductoare profilate.

Înfășurările stratificate se comportă bine la impulsurile de tensiune, avînd o repartiție inițială a gradientului de potențial destul de bună [13], [20].

Înfășurarea stratificată este simplă, și implică o manoperă mai redusă în raport cu celelalte tipuri de înfășurări.

f) **Înfășurările din folie** sînt utilizate la transformatoare cu puteri pînă la 2 500 kVA și tensiuni pînă la 10—15 kV. Se utilizează în special folia de aluminiu, cu grosimi de la 0,025 la 2 mm (STAS 5681-74).

Înfășurările din folie se pot realiza monobloc, lățimea foliei fiind egală cu înălțimea totală a înfășurării sau din galeți cu înălțimea egală cu lățimea foliei.

Divizarea înfășurării în galeți este impusă de valoarea curentului, respectiv, de grosimea foliei, de tensiunea pe spiră, respectiv de modul de izolație și uneori de repartiția temperaturilor în lungul înfășurărilor, datorită repartiției neuniforme a curentului pe înălțimea foliei, produsă de cîmpurile magnetice de scăpări.

Izolarea spirelor (între straturile de folie) se face cu hîrtie (telefonică sau de cablu), cu lacuri sau cu oxizi. Izolarea cu hîrtie este mai simplă înlăturînd posibilitățile de străpungere la capete prin depășirea lățimii foliei cu $3 \div 5$ mm (fig. 16.29) între care se prevede și o fișie izolantă cu grosimea cît a foliei, pentru asigurarea înălțimii H_B a bobinei (fig. 16.29 — poz. 3). În schimb, la foliile subțiri, acest sistem de izolare conduce la un factor de umplere prost al ferestrei. Izolarea cu lacuri sau oxizi impune ca marginile foliei să fie rotunjite și bine izolate, iar executarea bobinelor să se facă cu mai mare atenție. După executarea bobinelor, indiferent de izolarea spirelor, acestea sînt impregnate cu un lac epoxidic care definitivă izolarea capetelor bobinelor și consolidează bobina.

Realizarea înfășurărilor din folie nu necesită instalații speciale în atelierele de bobinaj.

Înfășurările din folie sînt rezistente din punct de vedere mecanic și se răcesc bine. Bornele bobinei din folie sînt scoase cel mai frecvent prin două bare între care se găsește folia sudată frontal pe toată înălțimea ei (fig. 16.29 și fig. 16.30, a) sau prin îndoirea succesivă a foliei și apoi, ieșirea, sudată prin puncte (fig. 16.30, b).

g) **Înfășurările alternate**, numite și **înfășurări cu galeți alternati**, sînt utilizate atunci cînd se urmărește o tensiune de scurtcircuit mică și o diminuare a forțelor electrodinamice axiale. Acest tip de înfășurare se mai utilizează la transformatoarele în manta și la transformatoarele răcite cu aer, cu coloane orizontale.

La înfășurările alternate, porțiuni din înfășurarea de joasă tensiune alternează cu porțiuni din cea de înaltă tensiune (fig. 16.31 și fig. 16.32). În cazul figurii 16.31, solenațiile galeților de joasă tensiune sînt egale cu cele ale galeților de înaltă tensiune; galeții de capăt avînd cîte o jumătate din solenația galeților principali pentru a forma înfășurări alternate simetrice, cu o

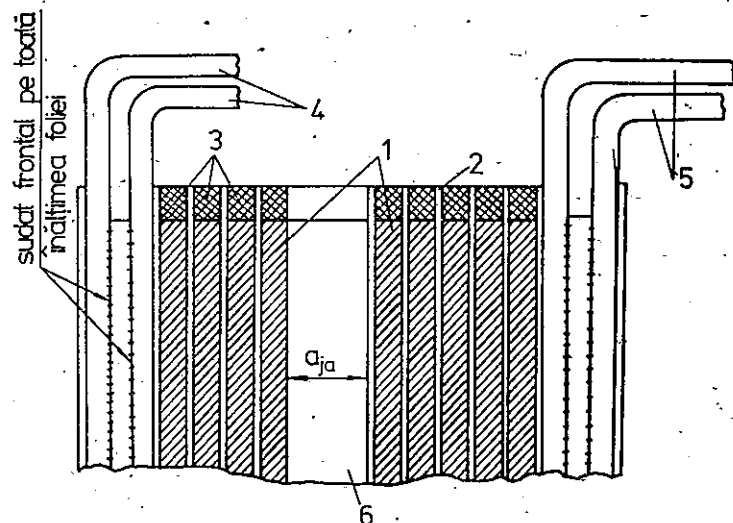


Fig. 1a.29. Înfășurare cilindrică stratificată din folie de Aluminiu:
1 — folie; 2 — izolație de hîrtie dintre straturi; 3 — izolație egalizare;
4 — bare de ieșire (interioare); 5 — bare de ieșire (exterioare); 6 — canal de răcire.

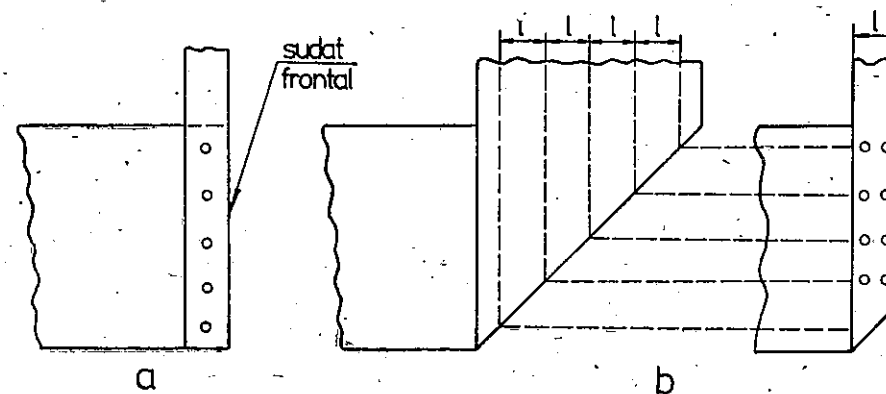


Fig. 16.30. Forme de realizare a capetelor (ieșirilor) înfășurărilor din folie:
a — cu câte două bare de aluminiu, între care se sudează frontal folia; b — prin îndoirea succesivă a foliei și sudare prin puncte.

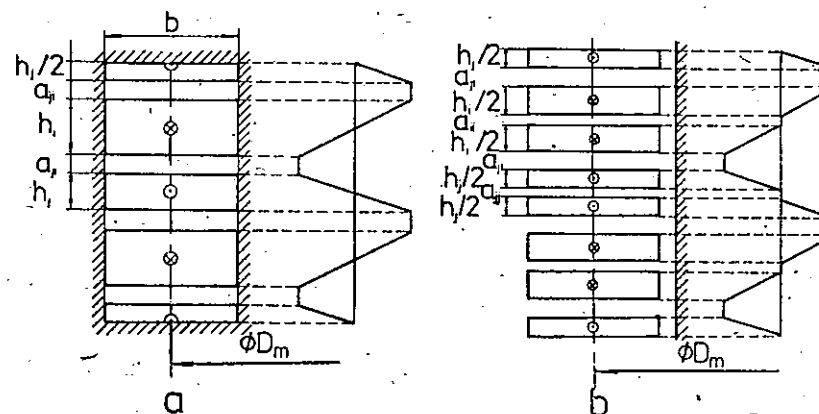


Fig. 16.31. Înfășurări alternate simetrice și formele corespunzătoare de variație a câmpului magnetic de scăpări:
a — cu bobine întregi; b — cu bobine secționare și canale de răcire a_{11} sau a_{12} între ele.

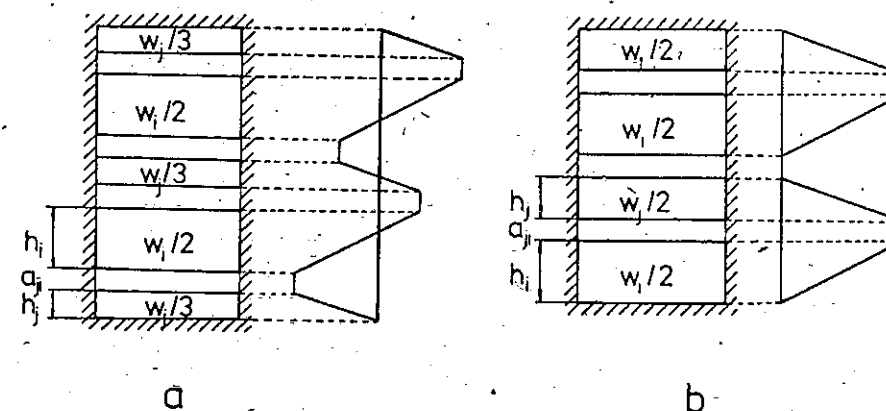


Fig. 16.32. Înfășurări alternate nesimetrice și formele corespunzătoare de variație a câmpului magnetic de scăpări:
a — joasă tensiune cu un galeț mai mult decît înalta tensiune; b — joasă și înaltă tensiune cu același număr de galeți.

repartiție simetrică a cimpului magnetic de scăpări. Uneori, în vederea îmbunătățirii răcirii, galeții se divid astfel încât întreaga înfășurare este constituită din semigaleți (fig. 16.31, b). Cîmpul magnetic fiind nul în canalul dintre semigaleți, prezența acestui canal nu influențează valoarea tensiunii de scurtcircuit care se calculează cu aceeași relație ca și pentru cazul din figura 16.31, a.

În cazul din figura 16.32, galeții de înaltă tensiune sînt egali între ei și alternează cu galeții de joasă tensiune care sînt, de asemenea egali între ei, dar fără a se simetriza solenațiile, formînd înfășurări alternate nesimetrice, folosite mai rar.

Bobinele înfășurărilor de înaltă tensiune se pot realiza din conductori rotunzi sau profilați, sub formă de galeți jumelați sau secțiuni de bobine continue în galeți. Bobinele înfășurării de înaltă tensiune se leagă de obicei în serie pentru înlăturarea nesimetriilor.

Înfășurarea de joasă tensiune se formează din secțiuni de înfășurări spiralate sau de înfășurări continue în galeți legate în paralel sau serie-paralel.

Luînd cazul înfășurărilor alternate simetric — cazul-utilizat în practică — în baza definiției lor se poate scrie relația solenațiilor

$$\frac{1}{2} w_i I_i = w_j I_{jc} = \frac{1}{2} w_j I_j, \quad (16.36)$$

notațiile fiind cele din figura 16.33.

Din relația (16.36) rezultă

$$I_{jc} = \frac{1}{2} I_i \frac{w_i}{w_j} = \frac{1}{2} I_j \text{ [A]} \quad (16.36, a)$$

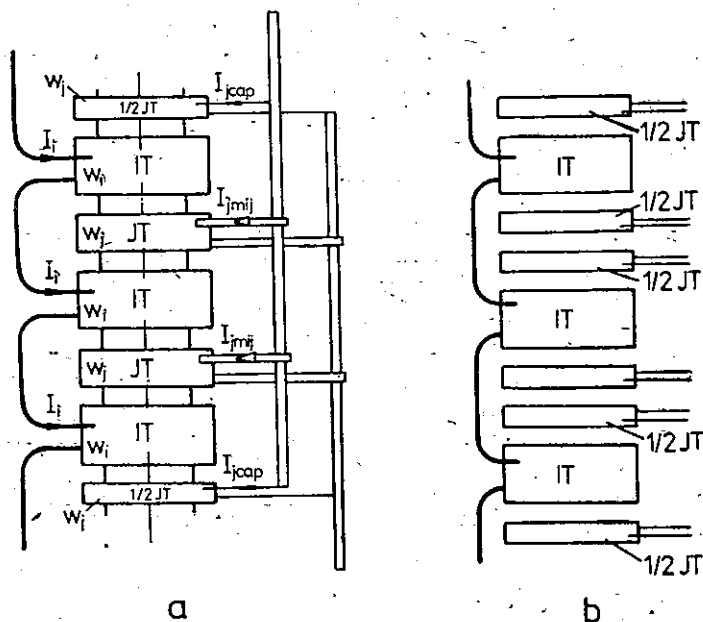


Fig. 16.33. Repartiția curenților la înfășurările alternate simetric: a — cu jumătăți de galeți (de joasă tensiune) la capete; b — cu galeți de joasă tensiune egali.

adică, valoarea curentului I_{jc} al galețului de capăt este egală cu jumătate din valoarea curentului I_j al galeților intermediari. În ipoteza unor densități egale de curent, secțiunile conductoarelor vor fi în același raport.

În concluzie, tipul constructiv de înfășurare se alege în funcție de cerințele de exploatare și de producție pentru întregul transformator. Totodată, la toate tipurile de înfășurări examinate s-au indicat și limitele uzuale de utilizare a acestora în funcție de puterea pe coloană, de secțiunea spirei, respectiv de curentul de fază și de tensiunea înfășurării. O recapitulare a domeniilor de aplicare a tipurilor de înfășurări utilizate la transformatoarele de putere, este dată în tabelul 16.7.

Dacă transformatorul prezintă particularitatea de a avea solicitări mecanice, electrice sau termice ridicate, tipul constructiv de înfășurări adoptat trebuie să prezinte avantaje mai mari în acea privință.

La alegerea, apoi dimensionarea înfășurării, trebuie să se aibă în vedere posibilitățile de transmisie a căldurii de la înfășurare la agentul de răcire. De aceea, după dimensionarea bobinelor, trebuie să se verifice densitatea de suprafață q a pierderilor, adică pierderile din înfășurare disipate pe unitatea de suprafață de răcire a bobinei, măsurate în W/m^2 . La transformatoarele cu circulația naturală a uleiului, densitatea de suprafață a pierderilor trebuie să nu depășească valorile $q = 1\ 200 - 1\ 400\ W/m^2$, iar la cele cu circulație forțată, $q = 2\ 000 - 2\ 200\ W/m^2$. La transformatoarele uscate, valorile lui q depind de clasa de izolație a transformatorului și de lărgimea canalelor de răcire; pentru clasa de izolație F se admite $q = 300 - 700\ W/m^2$.

Schema de reglaj a tensiunii transformatorului contribuie și ea în mare măsură la alegerea tipului constructiv al înfășurării, mai ales atunci cînd pot apare forțe electrodinamice axiale de scurtcircuit periculoase [3].

Avînd determinate numerele de spire și secțiunile căilor de curent și cunoscînd condițiile de realizare ale diferitelor tipuri de înfășurări, în baza tabelului 16.7 se poate alege, într-o primă etapă, cite un tip de înfășurare pentru joasa și înalta tensiune.

Plecînd de la înfășurarea de joasă tensiune, se determină dimensiunile geometrice ale ambelor înfășurări, cum sînt: înălțimile H_B , grosimile a_j și a_i , precum și diametrele interioare și exterioare ale acestora. Definitivarea acestor dimensiuni rămîne să fie confirmată de verificarea parametrilor de scurtcircuit și a temperaturilor înfășurărilor.

Cu aceste dimensiuni, lățimea ferestrei transformatorului în această etapă, conform figurii 16.8 rezultă

$$T = 2(a_{mj} + a_j + a_{ji} + a_i) + a_{ti} \text{ [m]}. \quad (16.37)$$

16.3.4. PRIZELE DE REGLAJ ȘI REDUCEREA SOLENAȚIILOR

Transformatoarele de putere se echipează cu dispozitive care permit reglajul tensiunii în trepte, prin schimbarea numărului de spire al uneia dintre înfășurări. Reglarea numărului de spire se efectuează cînd transformatorul este deconectat de la rețea sau cînd este în sarcină, în funcție de construcția comutatorului și de măsurile constructive adoptate în acest sens.

Nr. crt.	Tip înfășurare	Avantaje	Dezavantaje	Utilizare		Limite de aplicare		Dimensiuni conductoare [mm]		Număr maxim de conductoare în paralel
				preferată	posibilă	curenți [A]	tensiuni [kV]	a	b	
1	Cilindrică	Tehnologie simplă; Răcire bună	Rigiditate mecanică redusă	JT	IT	60-800	≤1	4-10	6-15	4
2	Tip Brush	Tehnologie simplă; Răcire bună	Rigiditate mecanică redusă	JT	IT	≤1 000	≤35	2-3	12-18	4-16
3	Spirală	Rigiditate mecanică bună; Izolație sigură; Răcire bună	Cost ridicat față de înfășurarea cilindrică	JT	-	<200	≤35	2-4	8-16	12 la un început
4	Continuă în galeți	Idem	Idem	IT	JT	>20	>3	1,2-3	12-18	4
5	Secționată (în galeți)	Idem	Idem	IT	-	<50	≤60	∅0,5-3		
6	Stratificată	Tehnologie simplă	Rigiditate mecanică scăzută la conductor rotund	IT	JT	≤100	>1	2-4	3-6	
7	Înfășurare din folie	Rigiditate mecanică bună; Răcire bună; Comportare bună la impuls de tensiune	Tehnologia de izolare și de realizare a conexiunilor este mai complicată	JT	IT	20-1 000	<15	∅3-3,5	4-6	

Prizele de reglaj pot fi prevăzute în principiu fie la înfășurarea primară, fie la cea secundară, prin modificarea sau păstrarea solicitărilor magnetice. La transformatoarele de putere, indiferent de rolul înfășurărilor ca primare sau secundare, de regulă înfășurarea de înaltă tensiune este prevăzută cu reglajul numărului de spire, din următoarele motive:

— scoaterea prizelor de reglaj este mai ușoară tehnologic, înfășurarea de înaltă tensiune fiind așezată la exterior, iar secțiunea conductoarelor este mai redusă;

— numărul de spire necesar treptei de reglaj se poate ajusta mai ușor, fiind mai mare și, totodată, permițând o poziționare mai adecvată pentru reducerea forțelor axiale;

— comutatorul de prize este mai simplu, având contactele și bornele pentru curenți mai mici, chiar dacă cresc distanțele de izolație.

Reglajul tensiunii la transformatoarele de distribuție se face în limitele standardizate de $\pm 5\%$; la unele transformatoare mai mari, pentru diminuarea forțelor axiale se împart treptele la $\pm 2 \times 2,5\%$. În funcție de destinația transformatorului, se pot utiliza și alte trepte de reglaj a tensiunii, cum este cazul transformatoarelor cu reglaj sub sarcină la care se realizează trepte de forma $\pm 6 \times 1,67\% = \pm 10\%$; $\pm 6 \times 1,5\% = \pm 9\%$; $\pm 8 \times 1,25\% = \pm 10\%$; $\pm 8 \times 1,5\% = \pm 12\%$; $\pm 9 \times 1,78\% = \pm 16\%$ etc.

Schemele de principiu pentru reglajul tensiunii sînt date în figura 16.34.

Cazul din figura 16.34, a este întâlnit la înfășurările stratificate. La înfășurările stratificate conectate în stea, legătura la borne se scoate, de obicei de la interior (fig. 16.35), iar prizele de reglaj sînt aduse la un comutator de nul. La conexiunea în triunghi, poziția stratului de la care se face legătura la bornă este indiferentă.

La înfășurările stratificate, prizele de reglaj așezate pe ultimul strat nu produc asimetrii prea mari și, în consecință, nici forțe axiale însemnate.

În scopul diminuării și mai mult a nesimetriilor datorate prizelor de reglaj, se poate utiliza schema din figura 16.36.

Scoaterea prizelor de reglaj de la înfășurările stratificate se face sub formă de buclă, întărindu-se izolația, așa cum se arată în figura 16.37.

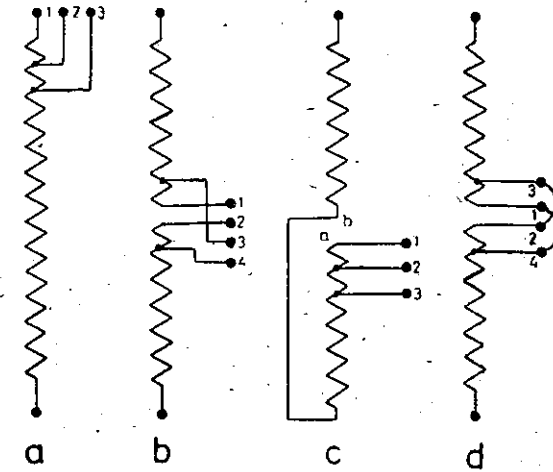


Fig. 16.34. Scheme pentru reglarea tensiunii în limite mici.

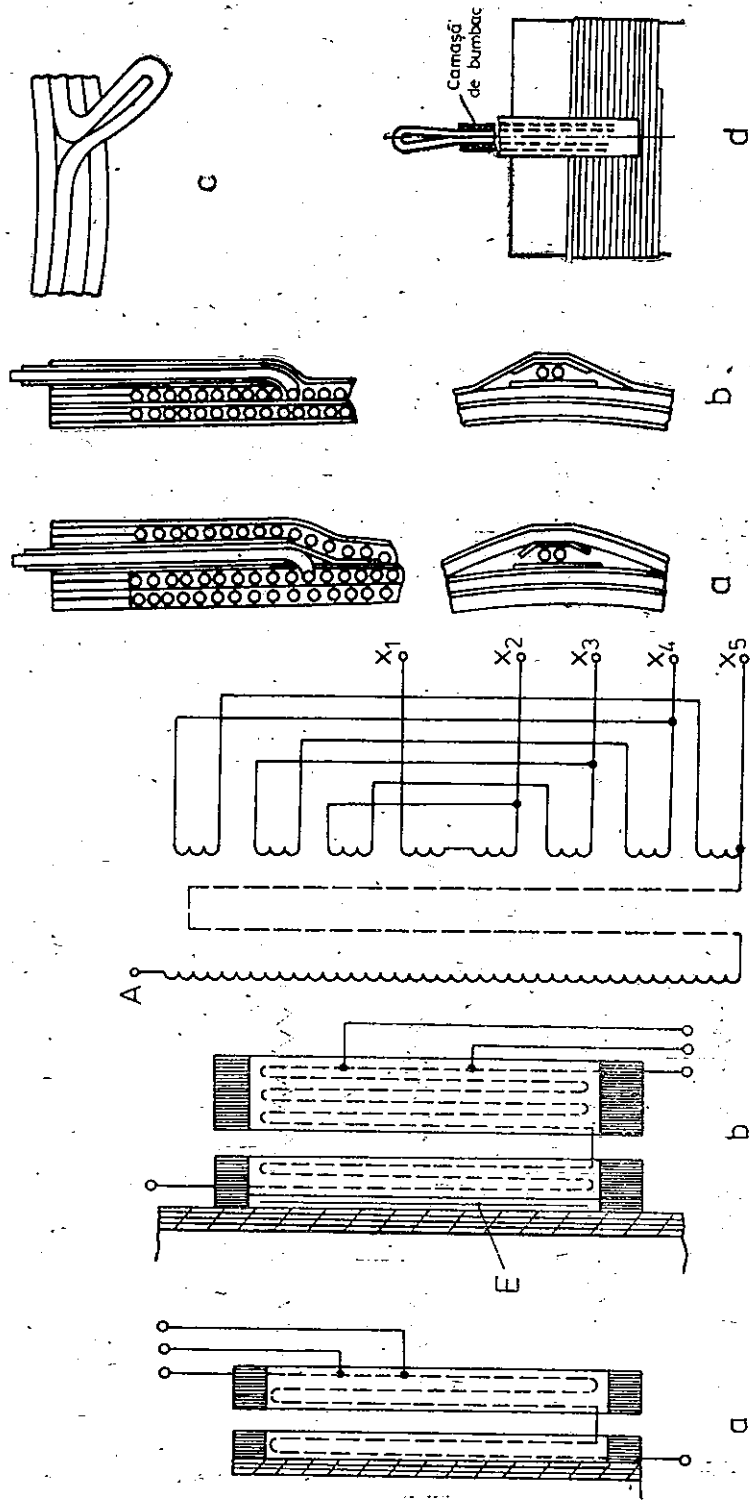


Fig. 16.35. Scoaterea prizelor la înfășurările stratificate: a — înfășurare cu tensiunea până la 10 kV; b — înfășurare cu tensiunea până la 35 kV cu ecran electrostatic E legat la borna de linie; c — înfășurare cu o cale de curent în paralel înfășurate în sensuri opuse; d — înfășurare de tip stratificat.

Fig. 16.36. Modul de scoatere a prizelor de reglaj la înfășurările stratificate, pentru micșorarea nesimetriilor.

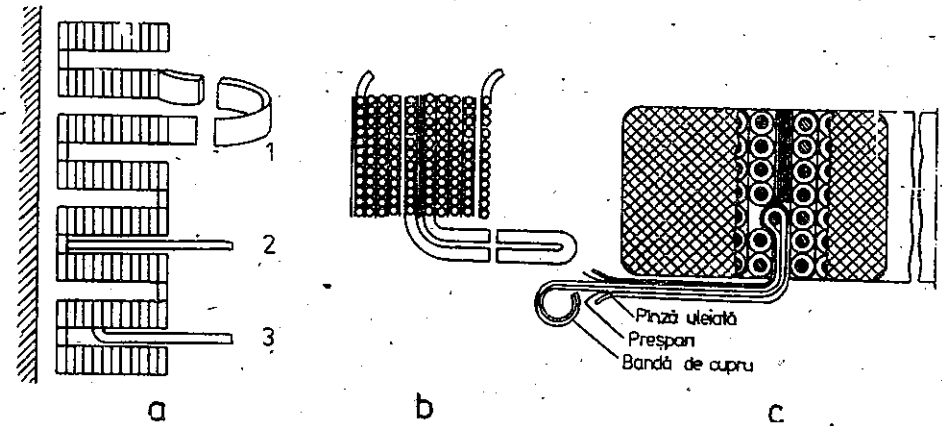


Fig. 16.39. Posibilități de scoatere a prizelor și modul lor de izolare: a — la o înfășurare continuă în galeși; b — la galeși din conductor rotund, cu buclă a conductorului; c — cu bandă de cupru lipită.

Fig. 16.38. Scheme pentru reglarea tensiunii în limite mici: a — înfășurare cu o cale de curent; b — cu două căi de curent în paralel înfășurate în sensuri opuse; c — cu patru căi de curent în paralel, înfășurate succesiv în sensuri opuse.

Schemele din figura 16.34, *b*, *c* și *d* sînt tipice pentru înfășurările secționate de tip galeți. Cazul din figura 16.34, *c*, este utilizat numai cînd înfășurarea este conectată în stea și se urmărește reducerea izolației comutatorului, altfel trebuie lăsată o distanță de izolație la jumătate din tensiunea de fază. În cazurile *b*, *c* și *d* din figura 16.34, galeții cu spirele de reglaj sînt așezați fie la mijlocul înălțimii înfășurării, fie repartizați simetric față de mijloc, la un sfert de înălțime începînd de la capete, cum se arată în figura 16.38.

La înfășurările continue sau la cele cu galeți dubli, se recomandă scoaterea prizelor de la trecerile exterioare dintre galeți fără lipire, cu buclă din același conductor (1 — fig. 16.39, *a*).

Scoaterea prizelor printre galeți (2 — fig. 16.39, *a*) se face cu lipituri și o izolație corespunzătoare, mărindu-se și canalul dintre galeți, dacă este cazul. Scoaterea prizei din interiorul galețului (3 — fig. 16.39, *a*) nu se practică decît în cazuri speciale la galeți realizați cu conductor rotund (fig. 16.39, *b* și *c*).

Scoaterea din circuit a galeților de reglaj provoacă o asimetrie în repartiția spațială a solenațiilor, asimetrie care este cauza forțelor electrodinamice axiale. Aceste forțe pot fi micșorate (reduse) prin rărirea spirelor în zonele de reglaj și la cealaltă înfășurare care nu este prevăzută cu prize de reglaj.

Această rărire a spirelor la înfășurarea fără prize se face în zonele de reglaj în așa fel încît solenația părții rărîte să fie egală cu jumătatea solenației galeților de reglaj. Astfel, la un reglaj de $\pm 5\%$, care ocupă 10% din înălțimea bobinei, va trebui plasată numai 5% din solenația înfășurării fără reglaj. Acest lucru se realizează prin creșterea distanțelor între galeți sau spire.

La transformatoarele mari și cu tensiuni înalte, cu izolația galeților de capăt întărită, apare o anumită neuniformitate a repartiției solenației și se impune, în acest caz, o rărire corespunzătoare și a spirelor la înfășurarea de joasă tensiune.

Rărirea spirelor se practică la transformatoarele de putere, începînd cu 800 kVA.

16.4. CALCULUL PIERDERILOR ȘI CURENTULUI DE FUNCȚIONARE ÎN GOL

În timpul funcționării în transformator se produc pierderi atît în înfășurări datorită rezistenței electrice, cît și în miez, datorită curenților turbionari și fenomenului de histerezis, ca urmare a variației în timp cu frecvența f , a fluxului magnetic. Este important, de asemenea, de determinat curentul de magnetizare care creează solenația necesară producerii fluxului magnetic.

16.4.1. PIERDERILE ÎN ÎNFĂȘURĂRI ȘI MASELE CONDUCTOARELOR

— Rezistențele înfășurărilor pe fază — primară 1 și secundară 2 — se determină cu relația

$$R_{1,2} = \rho_{\vartheta} \frac{w_{1,2} l_{med\ 1,2}}{s_{w1,2}} \quad [\Omega], \quad (16.38)$$

în care :

ρ_{ϑ} este rezistivitatea materialului conductorului din care este făcută înfășurarea, la temperatura convențională, de lucru ϑ , în $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Pentru conductoarele din cupru electrolitic moale (CuEm) $\rho_{Cu115^\circ} = 0,0246 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, pentru clasă de izolație F, la care $\vartheta = 115^\circ\text{C}$ (la transformatoarele în aer — uscate);

$\rho_{Cu75^\circ} = 0,022 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, pentru clasă de izolație A, la care $\vartheta = 75^\circ\text{C}$ (la transformatoarele în ulei).

Pentru conductoarele din aluminiu :

$\rho_{Al75^\circ} = 0,037 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (deoarece aluminiul se folosește, în special, la transformatoarele în ulei);

$l_{med\ 1,2}$ este lungimea medie a spirei înfășurării primare, respectiv înfășurării secundare, în m, și se determină din construcția grafică (la scară) a înfășurărilor.

De exemplu, pentru transformatoarele mici, cu miezul dreptunghiular, rezultă :

— pentru înfășurările suprapuse (fig. 16.6, *a*, *c*) :

$$\begin{aligned} l_{med1} &\approx 2(0,5 \text{ cm} + b + l_g + 2a_1) \text{ [cm];} \\ l_{med2} &\approx 2(0,5 \text{ cm} + b + l_g + 4a_1 + 2a_2) \text{ [cm];} \end{aligned} \quad (16.39)$$

— pentru înfășurările separate (fig. 16.6, *b*) :

$$\begin{aligned} l_{med1} &\approx 2(0,5 \text{ cm} + b + l_g + 2a_1) \text{ [cm];} \\ l_{med2} &\approx 2(0,5 \text{ cm} + b + l_g + 2a_2) \text{ [cm],} \end{aligned} \quad (16.39, a)$$

unde cei 0,5 cm, țin seama de jocul de asamblare al carcasi pe miez și de grosimea carcasi bobinei care se confecționează de regulă din sticloteolit gros de 1 mm (b , l_g , a_1 și a_2 se introduc în cm, apoi rezultatul se transformă în m).

Pentru transformatoarele mai mari, cu miezul în trepte, lungimea medie se determină în funcție de diametrul mediu al fiecărei înfășurări.

Astfel,

$$l_{med\ 1,2} = \pi D_{m\ 1,2} \text{ [m],} \quad (16.39, b)$$

unde $D_{m\ 1,2}$ sînt diametrele medii ale înfășurării primare, considerată de înaltă tensiune, respectiv secundare, date de relațiile (v. fig. 16.8)

$$\begin{aligned} D_{m2} &= D_c + 2a_{mj} + a_j \text{ [cm];} \\ D_{m1} &= D_c + 2(a_{mj} + a_j + a_{jt}) + a_t \text{ [cm];} \end{aligned} \quad (16.39, c)$$

$s_{w1,2}$ — secțiunea din STAS a conductorului, în mm^2 .

— Pierderile în înfășurări :

— pentru înfășurarea primară 1 și secundară 2

$$P_{e11,2} = mk_{r1,2} R_{1,2} I_{1,2}^2 \text{ [W],} \quad (16.40)$$

unde :

$k_{r1,2}$ este factorul de majorare a pierderilor în curent alternativ, față de cele în curent continuu. Valoarea medie a acestui factor este :

— pentru înfășurările realizate din conductor rotund

$$k_r = 1 + 0,8 \alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 d^4 m_s^2; \quad (16.40, a)$$

— pentru înfășurările din conductor profilat

$$k_r = 1 + 1,73 \alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (m_s^2 - 0,2) \quad (16.40, b)$$

și în care :

$$\alpha_r = k_R \frac{dn}{H_B}; \quad \alpha_p = k_R \frac{bn}{H_B}, \quad (16.40, c)$$

k_R — coeficientul lui Rogowski și se determină cu relația (16.49, c);

n — numărul de conductoare pe înălțimea bobinei respective;

m_s — numărul de conductoare pe grosimea bobinei respective;

ρ , se introduce în $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$, iar dimensiunile în cm.

— Densitățile de suprafață ale pierderilor din înfășurări sînt :

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$q_j = \frac{P_{ej}}{cS_{wj}} \quad [\text{W}/\text{m}^2]; \quad (16.41)$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$q_i = \frac{P_{ei}}{cS_{wi}} \quad [\text{W}/\text{m}^2], \quad (16.41, a)$$

unde S_{wj} și S_{wi} sînt ariile tuturor suprafețelor de răcire a înfășurărilor pe o coloană (c , este numărul de coloane), adică ale suprafețelor în contact cu agentul de răcire pentru fiecare din cele două înfășurări, în m^2 (din ariile canalelor de răcire se scad porțiunile ocupate de pene și distanțori — care ocupă cam 0,15—0,20 din ariile canalelor cilindrice). Ariile suprafețelor canalelor radiale (orizontale) se vor reduce la jumătate, eficiența lor fiind micșorată în cazul circulației naturale a agentului de răcire.

Valorile lui q nu trebuie să depășească 1 200 W/m^2 la transformatoarele cu circulație naturală a uleiului și 2 000 W/m^2 la cele cu circulație forțată a uleiului.

La transformatoarele uscate în clasa de izolație F limitele lui q sînt cuprinse între 300—700 W/m^2 (limitele superioare sînt pentru canale cu dimensiuni mai mari).

— Pierderile totale electrice sau pierderile la funcționarea în scurt-circuit la curenții nominali

$$P_{KN} = P_{e11} + P_{e12} \quad [\text{W}]. \quad (16.41, b)$$

Valoarea obținută pentru P_{KN} , trebuie să fie apropiată de cea impusă inițial prin datele de proiectare (v. par. 16.1). Dacă diferența este mare, se reconsideră situația, prin schimbarea secțiunii conductoarelor sau dimensiunilor înfășurărilor (abaterile admise sînt indicate în STAS 1703/1-80).

— Masele conductoarelor înfășurărilor primară 1 și secundară 2

$$G_{w1,2} = \gamma_{1,2} S_{w1,2} w_{1,2} l_{med1,2} \quad [\text{kg}], \quad (16.42)$$

în care :

$\gamma_{Cu1,2} = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{cm}^3$, este masa specifică a cuprului;

$\gamma_{Al1,2} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{cm}^3$, este masa specifică a aluminiului;

$S_{w1,2}$ — se introduce în cm^2 ;

$l_{med1,2}$ — se introduce în cm.

Pentru w_1 se consideră w_{1T} , dat de relația (16.10, b).

16.4.2. PIERDERILE ÎN FIER ȘI CURENTUL DE FUNCȚIONARE ÎN GOL

Masa netă a fierului tuturor coloanelor c și, respectiv, tuturor jugurilor j :

— pentru transformatorul monofazat cu două coloane (fig. 16.2, a, c și fig. 16.6, a, b)

$$\begin{aligned} G_{Fec} &= 2S_c L_c \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \\ G_{Fej} &= 2S_j L_j \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \end{aligned} \quad (16.43)$$

— pentru transformatorul monofazat, în manta (fig. 16.3 și fig. 16.6, c)

$$\begin{aligned} G_{Fec} &= S_c L_c \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \\ G_{Fej} &= 2S_j (L_c + L_j) \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \end{aligned} \quad (16.43, a)$$

— pentru transformatorul trifazat cu trei coloane (fig. 16.2, b)

$$\begin{aligned} G_{Fec} &= 3S_c L_c \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \\ G_{Fej} &= 2S_j L_j \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}], \end{aligned} \quad (16.43, b)$$

în care :

$\gamma_{Fe} = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{cm}^3$, este masa specifică a fierului tolelor;

L_c, L_j se introduc în cm;

S_c, S_j se introduc în cm^2 .

— Pierderile în fier, ale transformatorului care reprezintă și pierderile la funcționarea în gol se calculează cu relația

$$P_0 \approx P_{F0} = P_{Fec} + P_{Fej} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (B_c^2 G_{Fec} + B_j^2 G_{Fej}) \quad [\text{W}], \quad (16.44)$$

în care :

$k_p \approx 1,03 \dots 1,07$ — dacă secțiunea miezului este în trepte;

$k_p \approx 1,05 \dots 1,15$ — dacă secțiunea miezului este dreptunghiulară;

$p_{10/50}$ este cifra de pierderi specifice a materialului tolelor, din care este făcut miezul magnetic;

$p_{10/50} = 0,45 \text{ W}/\text{kg}$, dacă miezul se face din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate și grosime de 0,28—0,35 mm;

$p_{10/50} = 2,3 \text{ W}/\text{kg}$, dacă miezul se face din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate și grosime de 0,5 mm (este cazul miezurilor în manta și din profile E, U, L);

B_c, B_j (vezi relațiile 16.12) se introduc în T.

OBSERVAȚIE. În practica fabricației transformatoarelor s-a constatat că valorile coeficientului de majorare a pierderilor în fier, datorită prelucrărilor prin ștanțare k_p , sînt mult mai mari, ajungînd pînă la $k_p = 1,2 - 1,25$.

— Componenta activă a curentului de funcționare în gol, se obține cu relația

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{mU_{1f}} \quad [A] \quad (16.45)$$

— Componenta reactivă a curentului de funcționare în gol sau curentul de magnetizare (valoare eficace), se determină din legea circuitului magnetic aplicată pe un contur Γ , corespunzător liniei mediane a cîmpului magnetic util care parcurge atît coloanele și jugurile magnetice, cît și întrefierurile fictive de îmbinare dintre acestea.

Astfel, dacă n_8 este numărul întrefierurilor de îmbinare parcurse de conturul Γ , rezultă:

— pentru transformatorul monofazat cu două coloane

$$I_{0r} = I_{\mu} = \frac{2(H_c L_c + H_j L_j) + n_8 \frac{B_t}{\mu_0} \delta_i}{\sqrt{2} w_1} \quad [A] \quad (16.46)$$

cu:

$n_8 = 4$, dacă miezul este împachetat din tole simple (de profil I);

$n_8 = 2$, dacă miezul este împachetat din tole de profil L etc.;

— pentru transformatorul monofazat în manta

$$I_{0r} = I_{\mu} = \frac{H_c L_c + H_j(L_c + L_j) + n_8 \frac{B_t}{\mu_0} \delta_i}{\sqrt{2} w_1} \quad [A] \quad (16.46, a)$$

cu:

$n_8 = 4$, dacă miezul este împachetat din tole E și I (fig. 16.6, c);

$n_8 = 1$, dacă miezul este împachetat din tole ca în figura 16.3, b;

— pentru transformatorul trifazat cu trei coloane (pentru coloanele extreme)

$$I_{0r} = I_{\mu} = \frac{H_c L_c + H_j L_j + n_8 \frac{B_t}{\mu_0} \delta_i}{\sqrt{2} w_1} \quad [A] \quad (16.46, b)$$

(pentru coloana din mijloc nu se mai ia produsul $H_j L_j$),

cu $n_8 = 2$, pentru miezurile feromagnetice în construcție normală,

în care:

H_c, H_j sînt intensitățile cîmpului magnetic în coloană și, respectiv, în jugul miezului feromagnetic, în A/cm. Valorile lor se iau din curba de magnetizare $B = f(H)$ a tolelor din care este făcut miezul, pentru inducțiile magnetice respective B_c și B_j . Pentru tabla silicioasă laminată la rece cu cristale orientate de 0,28—0,35 mm grosime, această curbă este (sub formă de tabel) indicată în anexa 4, iar pentru tabla laminată la rece cu cristale neorientate de 0,5 mm grosime, în anexa 2;

L_c, L_j se introduc în cm;

δ_i este lungimea întrefierului fictiv a rostului de îmbinare dintre tolele coloanelor și jugurilor, în m. În cazul miezurilor din tole cu cristale orientate de 0,35 mm, la o îmbinare prin întrefesere și la valori obișnuite ale inducției magnetice maxime în coloană $B_c \leq 1,7$ T [25];

$\delta_i = (0,02 - 0,04) \cdot 10^{-3}$ m (valorile mai mici se iau la îmbinarea sub un unghi de 45°).

În cazul miezurilor din tole cu cristale neorientate de 0,5 mm grosime, la o îmbinare prin întrefesere sub un unghi drept și valori ale inducției maxime în coloană $B_c \leq 1,1$ T [25];

$\delta_i \leq 0,02 \cdot 10^{-3}$ m (valorile mai mici se iau în cazul utilizării tolelor profil E, U etc., pentru care numărul rosturilor de îmbinare dintre tole este mai mic);

B_t este amplitudinea inducției magnetice în întrefierul fictiv de îmbinare, în T, care se determină din condiția conservării fluxului magnetic, adică:

$$B_t = \frac{B_c S_c}{S_t} = B_c \cos \alpha,$$

deoarece secțiunea de îmbinare

$$S_t = \frac{S_c}{\cos \alpha}$$

unde, α este unghiul de îmbinare al tolelor față de orizontală (la îmbinarea sub unghi drept, $\alpha = 0$);

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m.}$$

OBSERVAȚIE. Dacă în locul caracteristicii de magnetizare, $B = f(H)$, firma furnizoare a tablei silicioase utilizată pentru miezul feromagnetic, indică puterea specifică de magnetizare q_0 , în VAR/kg, la diferite inducții magnetice și frecvențe, atunci I_{0r} se determină cu relația (16.45), dar în locul lui P_{Fe} se ia puterea reactivă necesară magnetizării miezului Q_0 , pentru întreaga masă a acestuia [4]

$$Q_0 = k_{0\mu} (q_{0c} G_{Fe c} + q_{0j} G_{Fe j}) \quad [\text{VAR}] \quad (16.46, c)$$

cu:

$k_{0\mu} = 1,05 - 1,12$, pentru îmbinările coloanelor cu jugurile sub un unghi drept;

$k_{0\mu} = 1,25 - 1,30$, pentru îmbinările sub unghiul $\alpha = 45^\circ \pm 15^\circ$.

— Curentul (total) la funcționarea în gol a transformatorului (valoare eficace)

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [A] \quad (16.47)$$

sau în procente din curentul nominal absorbit de transformator

$$I_{10} [\%] = \frac{I_{10}}{I_{1N}} 100 \quad [\%]. \quad (16.47, a)$$

Valoarea obținută se compară cu cea impusă inițial prin datele de proiectare, de care trebuie să fie apropiată. Dacă diferența este mare se poate acționa, în sensul apropiierii lor, asupra dimensiunilor miezului.

În mod normal, valorile lui I_{j0} [%] pentru miezul feromagnetic din tablă silicioasă cu cristale orientate este sub 1,5%, iar pentru cel din tablă silicioasă cu cristale neorientate sub 3%.

16.5. TENSIUNEA DE SCURTCIRCUIT

— Componenta activă a tensiunii de scurtcircuit se determină cu relația

$$u_{ka} = \frac{P_{kN}}{S_N} 100 \text{ [%]}. \quad (16.48)$$

— Componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit:
— pentru înfășurările cilindrice și concentrice

$$u_{kr} = \frac{2\pi\mu_0 f w_1 I_1 l_m \delta' k_R}{e_1 H_B} k_R 100 \text{ [%]}, \quad (16.49)$$

în care:

— lățimea echivalentă a canalului de scăpări este (fig. 16.8)

$$\delta' = a_{ji} + \frac{a_{ja} + a_{ia}}{4} + \frac{a_j + a_i}{3} \text{ [cm]} \quad (16.49, a)$$

a_{ja} și a_{ia} , fiind lățimile canalelor de răcire (fig. 16.10, c și fig. 16.27, c);

— lungimea medie echivalentă a spirelor celor două înfășurări

$$l_m = \pi \left[D_c + 2a_{mj} + a_{ji} + \frac{a_i + a_{ia} + 3(a_j + a_{ja})}{2} \right] \text{ [m]}. \quad (16.49, b)$$

Dacă una din înfășurări sau ambele înfășurări nu sînt prevăzute cu canale axiale de răcire, atunci în relațiile (16.49, a și b) termenii a_{ja} sau/și a_{ia} se iau egali cu zero;

— coeficientul lui Rogowski

$$k_R = 1 - \frac{a_j + a_i + a_{ji}}{\pi H_B}. \quad (16.49, c)$$

În cazul cînd cele două înfășurări ale transformatorului au solenațiile nesimetrice (fig. 16.40), atunci în relația (16.49) se introduce înălțimea H_B cu valoarea cea mai mare (în cm), care de regulă este pentru joasă tensiune, iar corectarea nesimetriilor se face cu factorul

$$k_q = 1 + \frac{x^2 H_B}{r \delta' k_R}, \quad (16.49, d)$$

unde:

$$x = \frac{H_x}{H_B} \text{ (v. fig. 16.40);}$$

$r = 3$ — pentru cazurile din figura 16.40, b și c;
 $r = 0,75$ — pentru cazul din figura 16.40, d.

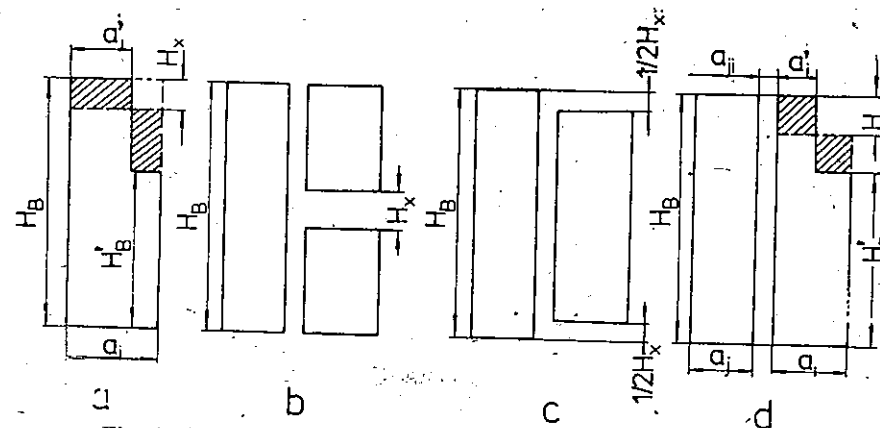


Fig. 16.40. Asimetrii posibile la înfășurările transformatoarelor.

De asemenea, pentru cazurile din figura 16.40, a și d

$$H_x = \frac{a_i - a_i'}{a_i} (H_B - H_B');$$

— pentru înfășurările alternate simetric (fig. 16.31)

$$u_{kr} = \frac{2\pi\mu_0 f w_1 I_1 l_{mea} \delta' k_R}{2 p b e_1} 100 \text{ [%]}, \quad (16.50)$$

unde (fig. 16.31)

$$\delta' = a_{ji} + \frac{h_j + h_i}{3} \text{ [cm]}; \quad (16.50, a)$$

$$k_R = 1 - \frac{2a_{ji} + h_j + h_i}{2\pi b}; \quad (16.50, b)$$

$l_{mea} = \pi D_m$ [m], este chiar lungimea medie a spirelor celor două înfășurări (a galeților);

b — grosimea radială a galeților (fig. 16.31), în cm;

p — numărul de perechi de galeți întregi ai înfășurărilor (1 pereche = 1 galeț de j.t. + 1 galeț de f.t.). De exemplu, în figura 16.31, a și b, rezultă $p = 2$.

— Tensiunea de scurtcircuit

$$u_k = \sqrt{u_{ka}^2 + u_{kr}^2} \text{ [%]}, \quad (16.50, c)$$

trebuie să fie pe cît posibil egală cu cea dată prin tema de proiectare, abaterea trebuind să se încadreze în valorile impuse de STAS 1703/1-80 (v. tab. 3.8).

Dacă valoarea calculată depășește abaterea admisă, se impun modificări în dimensionarea înfășurărilor, știut fiind faptul că ponderea cea mai mare o are componenta reactivă.

Se poate astfel acționa, după caz, fie asupra înălțimii bobinei, modificînd dimensiunile conductoarelor, a canalelor și a numărului de spire pe strat, fie prin schimbarea tipului de înfășurare, dacă acest lucru este în concordanță cu pierderile în înfășurări și densitatea de suprafață q a pierderilor.

16.6. CARACTERISTICILE DE FUNCȚIONARE

La un transformator, în special la cele de putere utilizate în rețelele de distribuție, este indicat a se predetermina prin calcul, caracteristicile de funcționare în sarcină, dintre care mai importante sînt caracteristicile externe și ale randamentului.

16.6.1. CARACTERISTICILE EXTERNE

Caracteristicile externe reprezintă variația tensiunii secundare U_2 , în funcție de variația curentului secundar I_2 , cînd tensiunea primară U_1 și factorul de putere al sarcinii $\cos \varphi_2$, sînt constanți.

Este important de observat aceste caracteristici pentru diferite valori ale lui $\cos \varphi_2$ în funcție de caracterul sarcinii.

Aceste caracteristici se pot determina atît în valori absolute, cît și în procente. Astfel, pornind de la relația care definește căderea de tensiune secundară în procente

$$\Delta u_2 [\%] = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100$$

se obține, în unități relative

$$\frac{U_2}{U_{20}} = 1 - \frac{\Delta u_2 [\%]}{100} = f(\beta), \text{ pentru } \dot{U}_1 = \text{constant și } \cos \varphi_2 = \text{constant}, \quad (16.51)$$

în care:

$\beta = I_2/I_{2N}$, este valoarea relativă a sarcinii secundare;

$\Delta u_2 [\%]$ — căderea de tensiune secundară, în procente, dată de relația

$$\Delta u_2 [\%] = \beta(u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kr} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{200} (u_{kr} \cos \varphi_2 - u_{ka} \sin \varphi_2)^2 [\%], \quad (16.51, a)$$

unde componentele tensiunii de scurtcircuit u_{ka} și u_{kr} , sînt în procente.

Dacă nu se indică prin temă factorul de putere al sarcinii secundare, atunci caracteristicile se determină pentru $\cos \varphi_2 = 1$, $\cos \varphi_2 = 0,7$ inductiv și $\cos \varphi_2 = 0,7$ capacitiv.

16.6.2. CARACTERISTICILE RANDAMENTULUI

Caracteristicile randamentului reprezintă valorile randamentului transformatorului, în funcție de valoarea relativă a sarcinii secundare, cînd tensiunea primară U_1 și factorul de putere al sarcinii $\cos \varphi_2$ sînt constante, adică

$$\eta = \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{KN} + P_0}, \text{ la } U_1 = \text{constant și } \cos \varphi_2 = \text{constant}, \quad (16.52)$$

unde, P_{KN} sînt pierderile electrice totale în înfășurări la sarcină nominală (v. rel. 16.41, b).

Capitolul 17. CALCULUL MECANIC AL TRANSFORMATORULUI

Din punct de vedere mecanic, elementele componente ale transformatorului sînt solicitate în primul rînd de forțele electrodinamice care apar în cazul scurtcircuitelor și în al doilea rînd atît de forțele necesare strîngerii miezului cît și de greutatea părții decuvabile (ansamblu miez bobinat + capacul cuvei cu toate accesoriile pe el).

17.1. VERIFICAREA ÎNFĂȘURĂRILOR LA ACȚIUNEA FORȚELOR ELECTRODINAMICE

În cazul scurtcircuitului, înfășurările transformatorului, reprezintă două sisteme de conductoare paralele parcurse de curenți în sensuri contrare (neglijînd curentul de funcționare în gol, cele două solenații — primară 1 și secundară 2 — sînt considerate egale în valoare absolută, dar de sensuri contrare. Acest lucru rezultă din ecuația solenațiilor transformatorului $w_1 i_{10} = w_2 i_{20}$). Deoarece prin înfășurări trec curenți de sens contrar, rezultă că între cele două înfășurări apar forțe de respingere (v. fig. 17.1). În schimb, elementele aceleiași înfășurări, fiind parcurse de un curent de același sens se atrag între ele formînd așa-zisele forțe interioare F_i , care tind să comprime înfășurările în direcție axială.

Forțele electrodinamice de respingere dintre înfășurări ($\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$), așa cum se indică și în figura 17.1, a, se pot descompune în două componente:

— forțele radiale F_r , care acționează astfel încît caută să întindă înfășurarea exterioară și s-o comprime pe cea interioară (fig. 17.1, b);

— forțe axiale F_a , care tind să deplaseze înfășurările în direcție axială, acționînd deci și asupra elementelor de consolidare axială a înfășurărilor.

Cum se observă din figura 17.1, a, forțele axiale dintre înfășurări apar numai în cazul cînd între solenațiile celor două înfășurări există nesimetria axială (adică înălțimile celor două solenații nu sînt egale). De aceea, pentru

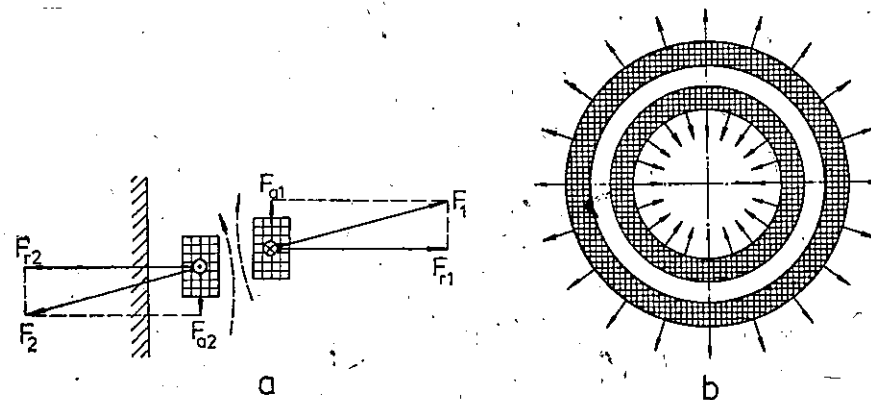


Fig. 17.1. Forțele electrodinamice care acționează asupra înfășurărilor transformatorului: a — cazul general și descompunerea forței în forțe radiale și axiale; b — acțiunea forțelor radiale asupra celor două înfășurări.

înlăturarea forțelor axiale sau reducerea lor, se caută ca în timpul funcționării transformatorului, aceste nesimetrii (introduse de cele mai multe ori de treptele de reglaj al tensiunii) să fie cât mai mici.

Forțele electrodinamice există și în cazurile de funcționare normală la sarcină nominală, dar ele sînt mici și de aceea nu sînt luate în considerare. La scurtcircuit însă aceste forțe sînt de sute și chiar mii de ori mai mari și pot produce avarii transformatorului (ele depind de valoarea maximă adică de amplitudinea curentului, nu de valoarea eficace).

Curentul de șoc, la scurtcircuit brusca la bornele secundare (adică cel mai mare vîrf al curentului sau cea mai mare amplitudine) este

$$I_{km} = k_A \frac{100\sqrt{2} I_{LN}}{u_k} \quad [\text{A}] \quad (17.1)$$

unde:

$k_A = 1 + e^{-\pi u_{ka}/u_{kr}}$ este coeficientul de mărire a curentului datorită componentei aperiodice. Valorile lui k_A pot fi aproximare și în limitele:

$k_A = 1,2-1,3$ pentru transformatoarele de putere mică;

$k_A = 1,5-1,7$ pentru transformatoarele de putere mare ($S_N > 10 \text{ kVA}$);

u_k — se introduce în procente [%].

Forța radială în cazul înfășurărilor concentrice este dată de relația [20]

$$F_r = \mu_0 \frac{(w_1 I_{km})^2 l_{med} k_R}{2H_B} \quad [\text{N}] \quad (17.2)$$

Forța interioară care acționează în direcție axială asupra fiecărei înfășurări este

$$F_i = -\frac{\delta'}{2H_B} F_r \quad [\text{N}], \quad (17.2, a)$$

deci în valoare absolută, forța F_0 din figura 17.2 este

$$F_0 = |F_i| = \frac{\delta'}{2H_B} F_r \quad [\text{N}], \quad (17.2, b)$$

δ' fiind dat de relațiile (16.49, a) sau (16.50, a).

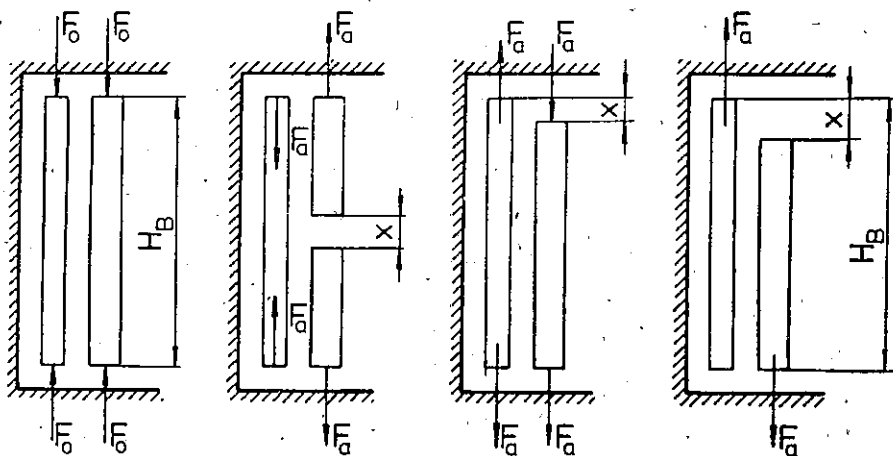


Fig. 17.2. Explicativă la forțele axiale care acționează asupra înfășurărilor transformatorului.

Forța axială, datorită nesimetriei înfășurărilor (dacă înălțimile celor două înfășurări concentrice parcurse de curenți nu sînt egale), se obține cu expresia aproximativă

$$F_a \approx \frac{x}{80} F_r \quad [\text{N}], \quad (17.3)$$

în care:

x este nesimetria relativă a înfășurărilor

$$x = \frac{X}{H_B} 100, \quad (17.3, a)$$

X , fiind nesimetria geometrică a înfășurărilor (v. fig. 17.2).

Efortul unitar la întindere în înfășurarea exterioară (de înaltă tensiune) este

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2\pi w_i s_{wi}} \quad [\text{MPa}] \quad (17.4)$$

cu s_{wi} în mm^2 ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$; $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$).

Această valoare a lui σ_r nu trebuie să depășească limitele admisibile

$\sigma_{adm} = 30-60 \text{ MPa}$ — pentru cupru;

$\sigma_{adm} = 22-30 \text{ MPa}$ — pentru aluminiu.

Înfășurarea interioară (de joasă tensiune), este supusă la comprimare; efortul unitar se determină tot cu relația (17.4), în care produsul $w_i s_{wi}$ se înlocuiește cu produsul $w_j s_{wj}$. Pentru ca solicitarea înfășurării interioare să fie de compresie pură, adică să nu apară solicitarea la încovoiere pe distanța dintre două pene consecutive, trebuie ca numărul de penă Z_p , de consolidare a înfășurării interioare de miezul feromagnetic (pe circumferința acestuia) să îndeplinească condiția

$$Z_p \geq 2 \sqrt{1 + \frac{1,75 F_r}{E w_j s_{wj}} \left(\frac{D_{jm}}{2a} \right)^2} \quad (17.5)$$

în care:

D_{jm} este diametrul mediu al înfășurării de joasă tensiune (ΦD_{m2} , în figura 16.8), în mm;

a — dimensiunea radială a conductorului de secțiune s_{wj} , exprimate în mm, respectiv în mm^2 ;

E — modulul de elasticitate al materialului conductor,

$$E_{Cu} = 1,15 \cdot 10^5 \text{ MPa} \text{ și } E_{Al} = 0,99 \cdot 10^5 \text{ MPa}.$$

Eforturile unitare la compresie datorate forțelor axiale, îndreptate către juguri sau la înfășurările de tip în galeți îndreptate către mijlocul înfășurării, se determină cu relația

$$\sigma_a = \frac{F_a}{a_{1,2} b_a Z_a} \quad [\text{MPa}] \quad (17.6)$$

în care:

$a_{1,2}$ — grosimea înfășurării 1 sau 2 (pentru care se face verificarea), în mm;

b_a — lățimea distanțorilor din direcția axială (cei din canalele transversale sau cei frontali) a înfășurărilor, în mm;

Z_a — numărul distanțorilor din direcția axială.

În cazul înfășurărilor de tip cilindric sau stratificat, se determină și efortul unitar de compresiune din cadrul înfășurării (dintre conductoare) cu relația

$$\sigma_a = \frac{F_a}{l_{med1,2} a_{1,2}} \text{ [MPa]}, \quad (17.7)$$

cu $l_{med1,2}$ și $a_{1,2}$ în mm.

Valorile determinate pentru σ_a nu trebuie să depășească limitele admisibile și anume:

$\sigma_{adm} \approx 20$ MPa, pentru transformatoarele cu puteri pînă la 6 000 kVA;

$\sigma_{adm} = 35-40$ MPa, pentru transformatoarele mai mari.

În transformatoarele cu înfășurări alternate, forța cea mai importantă care acționează asupra înfășurărilor (galeților) este cea axială, pentru care se obține expresia [20]:

$$F_0 = \mu_0 \frac{(w_1 I_{km})^2 l_{med} k_R}{2pb} \text{ [N]}, \quad (17.8)$$

în care semnificația termenilor este aceeași ca în relația (16.50) și figura 16.31.

Această forță axială solicită galeții (în special cei de capăt, sau cei din zona de reglaj a tensiunii) la compresiune, iar pe lungimea dintre două distanțoare izolante vecine și la încovoiere.

Astfel, dacă pe lungimea dintre cele două distanțoare vecine, galetul se consideră ca o grindă încastrată la capete (în dreptul distanțorilor) și încărcată uniform pe toată lungimea, atunci momentul maxim de încovoiere este [15]

$$M = \frac{F_0 l^2}{12 l_{med}} \text{ [N mm]}, \quad (17.8, a)$$

unde lungimea dintre două distanțoare vecine este (v. și rel. (17.6))

$$l = \frac{l_{med}}{Z_a} - b_a \text{ [mm]}.$$

Efortul unitar la încovoiere este

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ [MPa]}, \quad (17.8, b)$$

unde W este modulul de rezistență al galetului, în mm^3 (de exemplu pentru un galet din conductor profilat $W = w_g \frac{ab^2}{6}$ [mm^3]).

Efortul unitar la încovoiere nu trebuie să depășească 70 MPa pentru cupru și 15-20 MPa pentru aluminiu.

17.2. CALCULUL MECANIC AL SCHELEI METALICE

a) Consolele de presare a jugurilor, executate din oțel profilat (cel mai frecvent profilul U) se calculează la încovoiere datorită forței de presare a jugurilor și tot la încovoiere, însă în direcție axială, datorită forțelor electro-dinamice axiale de scurtcircuit.

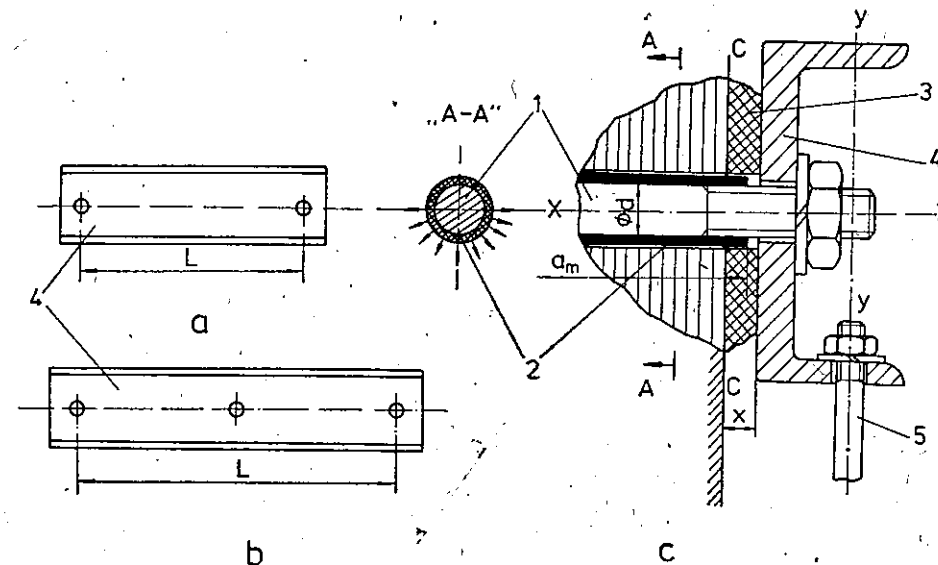


Fig. 17.3. Explicativă la calculul mecanic al schelei metalice:

a — pentru transformatorul monofazat; b — pentru transformatorul trifazat; c — detaliu cu secțiune prin bulonul de strângere; 1 — bulon de strângere; 2 — manșon (tub) izolant; 3 — izolație; 4 — consolă de presare; 5 — tirant (se montează în spațiul dintre înfășurări).

— **Momentul încovoiator**, corespunzător forței de presare a jugurilor este (v. fig. 17.3):

— pentru transformatorul monofazat

$$M_y = \frac{F_s L}{8} \text{ [N mm]}, \quad (17.9)$$

— pentru transformatorul trifazat

$$M_y = \frac{F_s L}{32} \text{ [N mm]} \quad (17.9, a)$$

unde, forța de presare a jugului este

$$F_s = p_s h_j L \text{ [N]}$$

în care:

$p_s = 0,2-0,6$ MPa, este presiunea necesară strîngerii tolelor jugului.

Valorile mai mari se iau pentru cazuri cînd strîngerea se face cu buloane care trec și prin miez (evident izolate).

În cazul strîngerii numai cu buloane marginale (neizolate) se iau limitele inferioare;

h_j — înălțimea jugului, în mm;

L — distanța dintre buloanele extreme, în mm (fig. 17.3).

— Efortul unitar la încovoiere datorită presării

$$\sigma_y = \frac{M_y}{W_y} \leq 100 \text{ MPa}, \quad (17.11)$$

unde W_y este modulul de rezistență al profilului după axa $y-y$, în mm^3 .

Verificarea consolelor de presare la încovoiere, datorită forțelor axiale de scurtcircuit se face cu relația [3]:

$$\sigma_x = \frac{F_0 L}{12 W_x} \leq 200 \text{ MPa}, \quad (17.11, a)$$

unde W_x este modulul de rezistență al profilului după axa $x-x$, în mm^3 .

b) **Buloanele de strângere** a consolelor de presare se calculează la întindere datorită forței de presare a jugului și la încovoiere datorită ridicării părții decuvabile (partea care se introduce în cuvă, compusă din ansamblu miez feromagnetic + ansamblu înfășurări + schela metalică); ele trebuie însă verificate și la încovoiere datorită forțelor electrodinamice axiale de scurtcircuit.

— **Efortul unitar** în bulon, datorită forței de presare și greutateii părții decuvabile, trebuie să satisfacă relațiile:

— pentru transformatorul monofazat

$$\sigma = 0,5 \frac{F_s}{S_b} + 2,5 \frac{Gx}{d^3} \leq 100 \text{ MPa}; \quad (17.12)$$

— pentru transformatorul trifazat

$$\sigma = 0,187 \frac{F_s}{S_b} + 2,5 \frac{Gx}{d^3} \leq 100 \text{ MPa}, \quad (17.12, a)$$

unde (v. și fig. 17.3):

G este greutatea părții decuvabile, în N ;

F_s — forța de presare, dată de relația (17.10);

d — diametrul bulonului, în mm ;

S_b — aria secțiunii bulonului (la baza filetelui) în mm^2 ;

x — distanța de la jug la consolă (grosimea izolației — poz. 3), în mm ; de obicei $x = 3 \div 5 \text{ mm}$.

Verificarea buloanelor la forța axială de scurtcircuit [20]:

— pentru transformatorul monofazat

$$\sigma = \frac{4,2 F_0 x}{d^3} \leq 200 \text{ MPa}; \quad (17.13)$$

— pentru transformatorul trifazat

$$\sigma = \frac{4,6 F_0 x}{d^3} \leq 200 \text{ MPa}. \quad (17.13, a)$$

c) **Verificarea la strivire a tubului izolant al bulonului** (numai în cazul când buloanele — izolate — trec prin miez):

— la ridicare, datorită greutateii părții decuvabile

$$\sigma_{st} = 0,25 \frac{G}{da_m} \leq 20 \text{ MPa}; \quad (17.14)$$

unde a_m este lungimea manșonului izolant, în mm (fig. 17.3);

— la scurtcircuit, datorită forțelor axiale:

— pentru transformatorul monofazat

$$\sigma_{st(ax)} = \frac{0,42 F_0}{da_m} \leq 40 \text{ MPa}; \quad (17.15)$$

— pentru transformatorul trifazat

$$\sigma_{st(ax)} = \frac{0,46 F_0}{da_m} \leq 40 \text{ MPa} \quad (17.15, a)$$

OBSERVAȚIE. Pentru transformatoarele cu nesimetrii axiale ale înfășurărilor, în relațiile (17.13) și (17.15) în locul lui F_0 se va lua forța F_a , determinată cu relația (17.3).

Capitolul 18. CALCULUL TERMIC AL TRANSFORMATORULUI

Calculul termic al transformatorului se face în funcție de modul de răcire: *cu ulei sau cu aer* (uscate).

Simbolizarea sistemelor uzuale de răcire a transformatoarelor în ulei (cele mai folosite) este făcută în funcție de circulația uleiului și a agentului de răcire care preia căldura de la ulei și o cedează mediului ambiant și anume:

NL — circulația naturală a uleiului (N) și mișcare liberă (L) a aerului care răcește cuva;

NS — circulație naturală a uleiului (N) și cuva ventilată prin suflare (S) cu aer;

FL — circulația forțată a uleiului (F) și mișcare liberă (L) a aerului care răcește cuva;

FS — circulație forțată a uleiului (F) și cuva ventilată prin suflare (S) cu aer;

FA — circulație forțată a uleiului (F) și răcirea cu apă (A) a uleiului.

18.1. CALCULUL TERMIC AL ÎNFĂȘURĂRILOR RĂCITE CU ULEI

Creșterea maximă admisă a temperaturii unei înfășurări în raport cu mediul ambiant este determinată de clasa de izolație a transformatorului. La o clasă de izolație dată, căderea de temperatură de la înfășurare la temperatura standard a mediului ambiant este constantă. Această cădere de temperatură poate fi, într-o singură treaptă cum este cazul transformatoarelor uscate în aer, sau în mai multe trepte, cum este cazul transformatoarelor în ulei (fig. 18.1)

ATENȚIE. În lucrare se notează cu ϑ temperatura și cu θ , căderea de temperatură ($\vartheta_2 - \vartheta_1$) denumită și *încălzire sau supratemperatură*.

Reprezentarea din figura 18.1 a repartiției temperaturilor și căderilor de temperatură, într-un transformator cu ulei, clarifică și mai mult sensul valorilor din tabelul 18.1.

Valorile medii ale căderilor de temperatură
 θ_{mbu} și θ_{mua} în °C

Mod de răcire	θ_{mbu}	θ_{mua}
NL	22-24	48-46
NS	24-26	46-44
FS și FA	28-30	42-40

Pentru transformatoarele în ulei, izolate în clasa A, la care căderea medie de temperatură între înfășurare și mediul ambiant este de 70°C, se dă în tabelul 18.1 o repartiție orientativă a acestei căderi de temperatură în două trepte: înfășurare-ulei ($\theta_{mbu} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$) și ulei-mediul ambiant ($\theta_{mua} = \theta_{uc} + \theta_{ca}$), notațiile fiind în concordanță cu cele din figura 18.1.

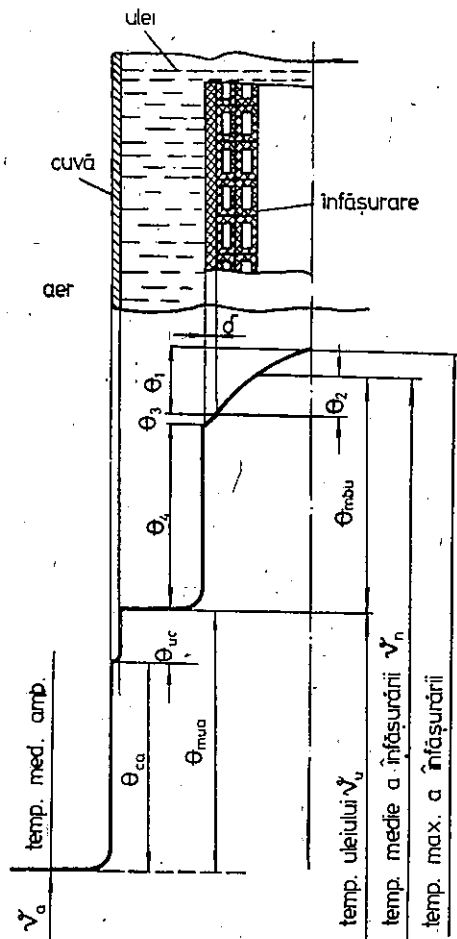


Fig. 18.1. Repartiția căderilor de temperatură de la înfășurare la mediul ambiant, în cazul transformatoarelor în ulei.

A. Căderile de temperatură în înfășurări

Acestea depind de forma bobinelor și a conductoarelor precum și de grosimea și natura materialelor utilizate la izolarea conductoarelor și izolarea straturilor [15].

Calculul se face pentru căderile de temperatură maxime din bobine θ_1 , dar în practică se utilizează căderile medii de temperatură θ_2 ; între aceste căderi de temperatură este relația

$$\theta_2 = \frac{2}{3} \theta_1 \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.1)$$

a) În cazul înfășurărilor cilindrice (fig. 16.10) la care fiecare conductor este în contact cu uleiul cel puțin o parte, se poate considera că temperatura medie a bobinei este egală cu cea maximă (fig. 18.1) și deci căderile de temperatură, maximă (θ_1) și medie (θ_2), din interiorul bobinei, sînt nule, adică $\theta_1 = \theta_2 = 0$; căderea de temperatură a bobinei este, în acest caz, egală numai cu căderea de temperatură în izolarea conductorului de pe partea care vine în contact cu agentul de răcire și se determină cu relația

$$\theta_3 = q \frac{\delta}{\lambda_{tz}} \cdot 10^{-4} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.2)$$

în care:

- δ este grosimea izolației conductorului, pe o parte, în cm;
- λ_{tz} — conductibilitatea termică a materialului izolat, în W/cm °C, care se ia din tabelul 18.2;
- q — densitatea de suprafață a pierderilor în bobina considerată, în W/m². Valoarea lui q se determină pentru fiecare bobină în parte (v. relațiile 16.41), însă în relația (18.2) se introduce valoarea cea mai mare. Pierderile în bobină P_b de la numărul relațiilor (16.41) sînt:
 - pentru cazurile din figura 16.10, a și b

$$P_b = P_{cij};$$

- pentru cazul din figura 16.10, c

$$P_b = 0,5 P_{cij},$$

notațiile fiind cele de la paragraful 16.4.1 (v. rel. 16.40).

Tabelul 18.2

Conductibilitatea termică a principalelor materiale izolante folosite la transformatoarele în ulei

Material	λ [W/cm°C]
Bandă de bumbac lăcuită	0,0027
Bandă de pînză bachelizată	0,0027
Țesătură lăcuită	0,0025
Hîrtie uscată	0,0012
Hîrtie impregnată în ulei	0,0014
Hîrtie impregnată în lac	0,0017
Prespan	0,0017
Carton impregnat în lac	0,0014

Aria suprafețelor de cedare a căldurii pentru bobina considerată, se determină, scăzînd din aria suprafețelor cilindrice, aria suprafețelor acoperite de pene, cu luarea în considerare a lățimii c_1 a penelor pentru fiecare parte. Astfel, pentru o parte a bobinei, aria ocupată de pene va fi

$$S_{p1} = Z_p H_B c_1 \text{ [m}^2\text{]}. \quad (18.3)$$

b) În cazul bobinelor stratificate (fig. 16.27) de grosime a_b , a_i sau a_j , și a celor secționare fără canale radiale (fig. 16.25), valoarea maximă a temperaturii bobinei este la 0,5 a_b cînd răcirea se face pe ambele părți. În acest caz, căderea maximă de temperatură în bobină se determină cu relația

$$\theta_1 = \frac{p a_b^2}{8 \lambda_m} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.4)$$

(pentru galeți prin a_b se înțelege grosimea galețului a_g (fig. 16.25).

În cazul cînd bobinele stratificate sînt bobinate direct pe cilindrul izolant și au numai o singură suprafață de răcire, atunci valoarea maximă a temperaturii se află la $0,75 a_b$ față de canalul de răcire, iar căderea maximă de temperatură în bobină este dată de relația

$$\theta_1 = 0,28 \frac{pa_b^2}{\lambda_m} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.4, a)$$

În relațiile (18.4) și (18.4, a), a_b se ia în cm, iar ceilalți termeni sînt:
 p — pierderile specifice produse într-un cm^3 de material activ din înfășurări, în W/cm^3 , care se determină cu relațiile:
 — pentru conductor rotund

$$p = k_0 \frac{J^2 a^2}{(d' + \delta_s) d'} \cdot 10^{-2} \text{ [W/cm}^3\text{]}; \quad (18.5)$$

— pentru conductor profilat

$$p = k_p \frac{J^2 a b}{(a' + \delta_s) b'} \cdot 10^{-2} \text{ [W/cm}^3\text{]}, \quad (18.5, a)$$

în care dimensiunile a, a', b, b' și d, d' ale conductoarelor se iau în cm;

δ_s — grosimea izolației dintre straturi, în cm;

J — densitatea de curent, în A/mm^2 . Constantele de material au pentru cupru valorile $k_0 = 1,68$ și $k_p = 2,14$ iar pentru aluminiu, $k_0 = 2,71$ și $k_p = 3,44$;

λ_m — conductibilitatea termică medie, în $\text{W/cm}^\circ\text{C}$ a înfășurărilor care se determină cu relațiile [15]:

— pentru conductor rotund

$$\lambda_m = \lambda_i \left(\frac{d}{2\delta + \delta_s} + \frac{2\delta + \delta_s}{d' + \delta_s} \right) \text{ [W/cm}^\circ\text{C]}; \quad (18.6)$$

— pentru conductor profilat

$$\lambda_m \approx \lambda_i \frac{(a' + \delta_s) b}{(2\delta + \delta_s) b'} \text{ [W/cm}^\circ\text{C]}, \quad (18.6, a)$$

în care:

$$\lambda_i = \frac{\lambda_s (2\delta + \delta_s)}{\lambda_s 2\delta + \lambda_s \delta_s} \text{ [W/cm}^\circ\text{C]}, \quad (18.6, b)$$

este conductibilitatea termică echivalentă a izolației;

λ — conductibilitatea termică a izolației conductorului, în $\text{W/cm}^\circ\text{C}$;

λ_s — conductibilitatea termică a materialului izolant dintre straturi, în $\text{W/cm}^\circ\text{C}$;

d', a' și b' sînt dimensiunile conductoarelor izolate, în cm;

d, a și b — dimensiunile conductoarelor neizolate, în cm;

$2\delta = d' - d$, respectiv $2\delta = a' - a = b' - b$, în cm, este grosimea bilaterală a izolației conductorului.

În cazul cînd izolația dintre straturi δ_s nu se consideră, în relațiile (18.6), (18.6, a) și (18.6, b) se ia $\delta_s = 0$.

Conductibilitățile termice ale materialelor izolante utilizate, λ și λ_s , se iau din tabelul 18.2.

c) În cazul înfășurărilor spiralate și a celor de tipul în galeți, cu canale radiale (fig. 16.15, 16.20 și 16.26), la care elementul de bază — spira sau ga-

letul — cedează căldură atît prin suprafețele verticale, cît și prin cele orizontale, căderea maximă de temperatură se calculează cu relația

$$\theta_1 = \frac{pa_b^2}{8 \left(\lambda_{mx} + \lambda_{my} \frac{a_b^2}{h_b^2} \right)} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (18.7)$$

în care, în afara notațiilor cunoscute, h_b este înălțimea galețului în cm.

Conductibilitatea termică medie în direcția radială λ_{mx} , se determină cu relația (18.6), pentru conductoarele rotunde și cu relația (18.6, a), pentru conductoarele profilate.

Conductibilitatea termică medie în direcția axială λ_{my} se determină cu aceleași relații, însă în care se schimbă b cu a , a' cu b' și b' cu a' .

B. Căderile medii de temperatură între suprafața bobinelor și mediul de răcire

Acestea se determină pe baza unor relații semiempirice, reieșite din practică.

a) În cazul înfășurărilor cilindrice sau stratificate răcite cu ulei și realizate din conductoare profilate sau rotunde, căderea medie de temperatură între suprafața bobinei și ulei se determină cu relația

$$\theta_4 = 0,285 q^{0,6} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.8)$$

în care q este densitatea de suprafață a pierderilor din bobina considerată, în W/m^2 .

Relația (18.8) este valabilă numai dacă lățimile canalelor verticale nu au valorile mai mici decît cele indicate în paragraful 16.3.3 punctul B.

b) În cazul înfășurărilor spiralate și a celor de tipul în galeți cu canale orizontale, răcite cu ulei și realizate din conductoare profilate sau rotunde, căderea medie de temperatură între suprafața bobinei și ulei, se determină cu relația semiempirică

$$\theta_4 = 0,35 k_1 k_2 k_3 q^{0,6} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.9)$$

în care:

— factorul k_1 depinde de sistemul de răcire al transformatorului și are valorile: $k_1 = 1,0$ pentru sistemul NL , $k_1 = 0,9$ pentru NS și $k_1 = 0,7$ pentru FS (vezi simbolizările la începutul cap. 18);

— factorul k_2 ține seama de posibilitățile de circulație verticală a uleiului și are valoarea $k_2 = 1,0$ pentru suprafețele exterioare de la înalta tensiune și $k_2 = 1,1$ pentru înfășurările interioare ale joasei tensiuni;

— factorul k_3 ține seama de posibilitățile de circulație ale uleiului în canalele orizontale și se dă în tabelul 18.3 funcție de raportul dintre înălțimea bobinei (galețului) și grosimea radială a bobinei.

Tabelul 18.3

Valoarea factorului k_3 din relația (18.9) în funcție de raportul dintre înălțimea bobinei (galețului) h_b și grosimea ei radială a_b (pentru galeț a_g)

h_b/a_b	0,07—0,08	0,08—0,09	0,1	0,11—0,12	0,13—0,14	0,15—0,19	2
k_3	1,1	1,05	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8

c) În toate cazurile studiate, căderile medii de temperatură dintre înfășurare și ulei, date de relația

$$\theta_{mbu} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.10)$$

nu trebuie să se abată mult de la valorile indicate în tabelul 18.1. Creșterea căderii de temperatură θ_{mbu} peste limitele din tabel și scăderea corespunzătoare a căderii de temperatură ulei-mediul ambiant atrage după sine o diminuare a posibilității de supraîncărcare a transformatorului și, totodată, o creștere a suprafețelor de cedare a căldurii către mediul ambiant; o valoare mai mică a lui θ_{mbu} are efecte contrare, dar necesită o dimensionare mai largă a înfășurărilor.

18.2. CALCULUL TERMIC AL MIEZULUI RĂCIT CU ULEI

Calculul termic al miezului feromagnetic se limitează la estimarea căderii maxime de temperatură dintre miez și ulei, θ_{maxfu} care are influență asupra îmbătrînirii uleiului și a izolației dintre tole. Această cădere de temperatură se estimează cu relația semiempirică [15]

$$\theta_{maxfu} = \theta' \frac{\theta_4' + 1,5\theta_1''}{\theta' + \theta_4'' + 1,5\theta_1''} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.11)$$

în care :

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta_1' + \theta_4' \text{ [}^\circ\text{C]}; \\ \theta_1' &= \frac{pa^2}{8\lambda_l} \text{ [}^\circ\text{C]}; \\ \theta_4' &= \frac{pa}{2\alpha_{conv}} \text{ [}^\circ\text{C]}; \\ \theta_1'' &= \frac{pb^2}{8\lambda_t} \text{ [}^\circ\text{C]}; \\ \theta_4'' &= \theta_4' \frac{b}{a} \text{ [}^\circ\text{C]}, \end{aligned} \quad (18.11, a)$$

sînt temperaturi fictive de calcul, unde :

- dimensiunile echivalente a și b ale secțiunii miezului feromagnetic (fig. 18.2) se iau în cm;
- coeficientul de transmisie prin convecție a căldurii $\alpha_{conv} \approx 100 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} = 0,01 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- conductibilitatea termică longitudinală a pachetului λ_l și cea transversală față de tole λ_t , în $\text{W/cm}^\circ\text{C}$, se iau din tabelul 18.4;

Tabelul 18.4

Valorile conductibilităților termice λ_l și λ_t

Material	λ_l [W/cm °C]	λ_t [W/cm °C]
Tablă laminată la rece izolată cu carlit	0,19—0,21	0,26+0,03
Tablă laminată la cald (3—4% Si) și izolată cu lac(20μm)	0,20	0,028
Tablă laminată la cald (1,8—2,3% Si)	0,26—0,3	—
— izolată cu lac		0,043
— izolată cu hirtie		0,025

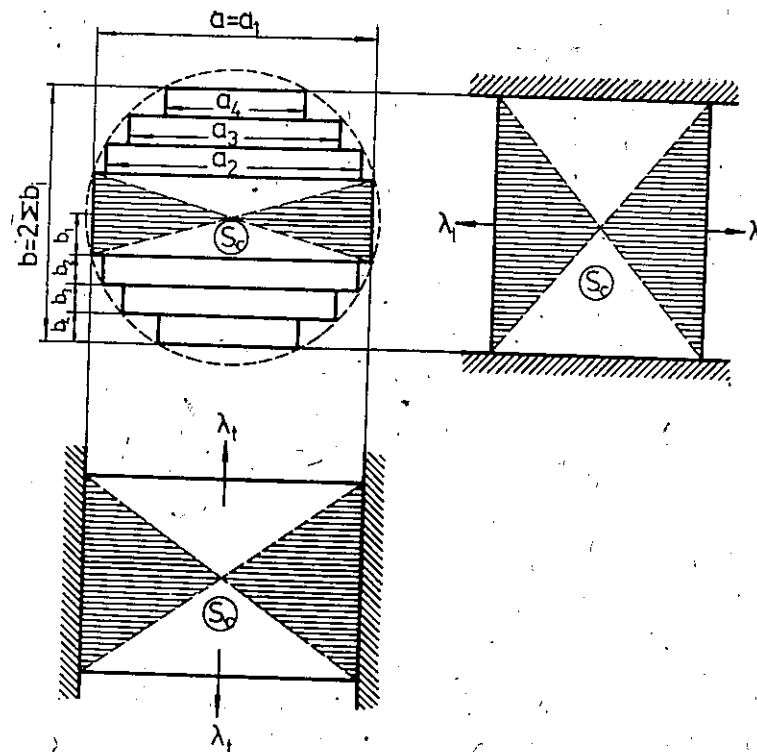


Fig. 18.2. Dimensiunile echivalente ale coloanei (cu secțiunea netă de fier S_c), care păstrează și aceleași arii de cedare a căldurii prin suprafețele longitudinale și transversale, față de tole.

— pierderile pe unitatea de volum se determină cu relația

$$P = P_{Fe} \gamma_{Fe} k_{Fe} \text{ [W/cm}^3\text{]}, \quad (18.12)$$

în care :

P_{Fe} sînt pierderile specifice, în W/kg , corespunzătoare inducției magnetice din miez, date de relația (vezi și rel. 16.44)

$$P_{Fe} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} B_c^2 \text{ [W/kg]}; \quad (18.12, a)$$

$$\gamma_{Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3 = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3,$$

iar k_{Fe} are valoarea din relația (16.4).

Căderea de temperatură θ_{maxfu} nu este limitată prin norme, dar pentru a nu conduce la îmbătrînirea uleiului în timp, se recomandă să nu depășească 30—35°C.

18.3. CALCULUL CĂDERII DE TEMPERATURĂ DINTRE PERETELE CUVEI CU ULEI ȘI AERUL DIN EXTERIOR

Pentru calculul căderii de temperatură dintre peretele cuvei și aer θ_{ca} sînt necesare stabilirea suprafețelor de cedare a căldurii prin convecție și prin radiație. Determinarea acestora nu se poate face decît prin iterație, pornind

de la unele date considerate a fi cât mai apropiate de realitate. Apoi, avînd pe θ_{ca} , aria suprafeței de radiație S_r și aria suprafeței de convecție S_{co} , se pot scrie relațiile de verificare a evacuirii pierderilor din transformator :

$$\begin{aligned} P_r &= \alpha_r \theta_{ca} S_r \text{ [W]}; \\ P_{co} &= \alpha_{co} \theta_{ca} S_{co} \text{ [W]}; \\ P_r + P_{co} &= 1,05 (P_k + P_o) \text{ [W]}. \end{aligned} \quad (18.13)$$

A. Estimarea căderii de temperatură dintre cuvă și aer θ_{ca}

Se determină într-o primă aproximație cu relația

$$\theta_{ca} \leq \vartheta_N - \vartheta_a - \theta_{uc} - \theta_{mbu} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.14)$$

în care :

- temperatura nominală a înfășurării ϑ_N este stabilită de clasa de izolație a transformatorului și pentru clasa A, $\vartheta_N = 105^\circ\text{C}$;
- căderea de temperatură θ_{mbu} este dată de relația (18.10), pe baza elementelor calculate ;
- căderea de temperatură θ_{uc} variază între 5°C și 6°C .

Pentru valorile menționate în cazul clasei de izolație A și temperatura mediului ambiant $\vartheta_a = 35^\circ\text{C}$, relația (18.14) devine

$$\theta_{ca} \leq 65^\circ\text{C} - \theta_{mbu} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.14, a)$$

Dacă se ține seama de variația temperaturii uleiului și a bobinelor pe verticală, pentru a nu se depăși temperatura de lucru corespunzătoare clasei A de izolație, se constată că temperatura maximă a uleiului depășește cu cel puțin 10°C temperatura medie, și relația (18.14, a) trebuie scrisă sub forma

$$\theta_{ca} \leq 55^\circ\text{C} - \theta_{mbu} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.14, b)$$

B. Aria suprafeței de radiație a transformatorului

Este definită de figura 18.3 și se poate aprecia luînd ca bază dimensiunile cuvei și anume (fig. 18.4) :

— pentru cuvele dreptunghiulare

$$S_r = k S_{cv} = 2(A + B) H_{cv} k \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}; \quad (18.15)$$

— pentru cuvele ovale

$$S_r = k S_{cv} = [2(A - B) + \pi B] H_{cv} k \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (18.15, a)$$

în care dimensiunile A , B și H_{cv} (fig. 18.4) sînt în cm, iar factorul k are valorile : $k = 1$ pentru cuvele netede ; $k = 1,2 - 1,5$ pentru cuvele cu pereți ondulați sau cu țevi și $k = 1,5 - 2$ pentru cuvele cu radiatoare (S_{cv} este aria suprafeței cuvei propriu-zise).

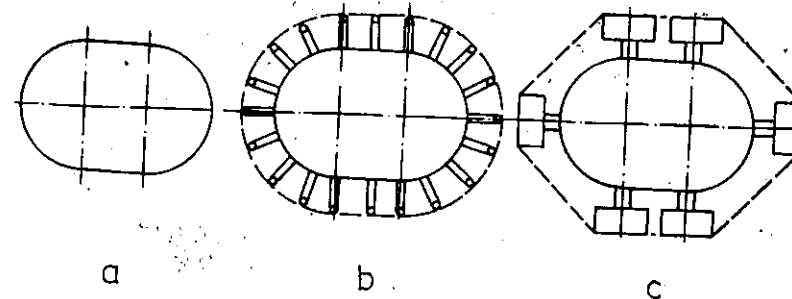


Fig. 18.3. Suprafețele echivalente de radiație ale cuvelor : a — cuvă cu pereți netezi ($S_{cv} = S_r$) ; b — cuvă cu țevi ; c — cuvă cu radiatoare. Suprafețele de radiație sunt indicate cu linie întreruptă.

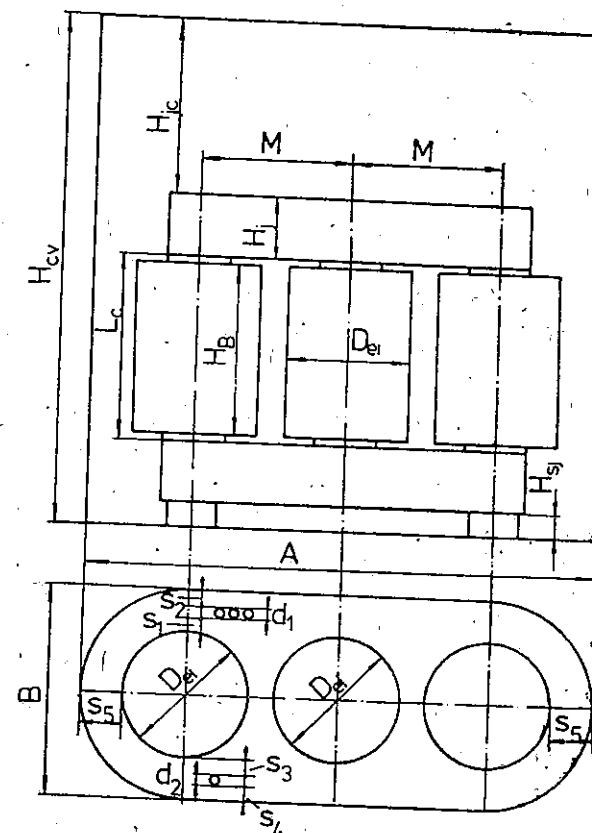


Fig. 18.4. Dimensiunile cuvei transformatorului în ulei.

Dimensiunile cuvei, pentru transformatoarele în ulei, cu tensiunile nominale ale înfășurării de înaltă tensiune pînă la 60 kV, se determină, conform figurii 18.4 cu relațiile:

$$\begin{aligned} A &= 2M + D_{et} + 2s_5 \text{ [mm]}; \\ B &= D_{et} + s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2 \text{ [mm]}; \\ H_{cv} &= L_c + 2H_j + H_{jc} + H_{sj} \text{ [mm]}, \end{aligned} \quad (18.16)$$

unde:

— valorile distanțelor de izolație s_1, s_2, \dots, s_5 (cu semnificațiile din fig. 18.4) se aleg din tabelul 18.5 (d_1, d_2 sînt dimensiunile conductoarelor de legătură); cel mai frecvent $s_5 = s_3 + s_2 + s_4$;

Tabelul 18.5

Distanțele minime de izolație pentru conductoarele de legătură ale transformatoarelor în ulei

U_N [kV]	Dimensiuni, în mm			
	Δi	d	s	s_k
6	0	$\triangleleft 6$	15	20
	0	$\triangleright 6$	12	17
	2	$\triangleright 6$	10	15
10	0	$\triangleleft 6$	23	25
	0	$\triangleright 6$	18	22
	2	$\triangleright 6$	10	17
15	0	$\triangleleft 6$	32	33
	0	$\triangleright 6$	27	30
	2	$\triangleright 6$	15	23
20	0	$\triangleleft 6$	40	38
	0	$\triangleright 6$	35	37
	2	$\triangleright 6$	22	30
35	2	≥ 10	40	50
	4		30	42
	6		25	40
60	5	≥ 12	40	55
110	20		75	170

Notă: Δi este grosimea izolației conductorului de legătură, pe o parte; d — dimensiunea conductorului pe direcția înfășurare-cuvă; s — distanța de la conductorul neizolat la cuvă sau la înfășurarea proprie; s_k — distanța de la conductorul neizolat la grinzile de stringere sau alte piese legate la pămînt, care prezintă muchii.

— distanța H_{jc} de la jug la capacul cuvei se ia în funcție de valoarea tensiunii nominale a înfășurării de înaltă tensiune din tabelul 18.6;
— D_{et} este diametrul exterior al înfășurării de înaltă tensiune.

Tabelul 18.6

Distanțele minime de la jug la capacul cuvei H_{jc}

U [kV]	6	10	20	35*	110**
H_{jc} [mm]	270	300	300	470*	500**

* Pentru transformatoarele trifazate cu $S_N \geq 1600$ kVA și comutatorul de reglaj prins la capacul cuvei, se ia $H_{jc} = 850$ mm.

** La tensiunea de 110 kV, bornele de intrare pentru înaltă tensiune sînt dispuse între jug și peretele cuvei, iar H_{jc} s-a ales numai în funcție de posibilitatea unei bune evacuări a pierderilor din transformator.

C. Aria suprafeței de convecție

Aria suprafeței de convecție se aproximează cu relația

$$S_{co} = \frac{1,05(P_k + P_0)}{2,5\theta_{ca}^{0,25}} - 1,12S_r \text{ [m}^2\text{]}. \quad (18.17)$$

Aria preliminară a elementelor de răcire S_{er} , atașate cuvei propriu-zise de arie S_{cv} din relațiile (18.15) și (18.15, a), va fi

$$S_{er} = S_{co} - S_{cv} \text{ [m}^2\text{]}. \quad (18.18)$$

Dacă se alege tipul de cuvă cu țevi sau cu lire atunci se determină lungimea totală a țevilor și suprafețele lor utilizînd datele țevilor folosite.

Dacă se utilizează tipurile de radiatoare din figura 15.25 și figura 15.26, atunci se face uz de tabelele 15.3 și 15.4.

În cazul transformatoarelor mari, bateriile sînt tipizate, avînd în vedere puterea care poate fi evacuată.

Avînd ariile S_{cv} , S_{er} și S_{co} se așază într-o primă variantă elementele de răcire aferente cuvei, apoi se determină pentru acest caz S_r și S_{co} .

D. Căderea de temperatură între cuvă și aer

Cu ariile S_r și S_{co} determinate mai sus, căderea de temperatură între cuvă și aer va fi

$$\theta_{ca} = \left[\frac{1,05(P_k + P_0)}{2,8S_r + 2,5S_{co}} \right]^{0,8} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.19)$$

Dacă valoarea θ_{ca} a ieșit prea mare sau prea mică față de valoarea care rezultă din relația (18.14, b), atunci se acționează asupra ariei S_{er} , mărind-o sau micșorînd-o recalculînd după aceea pe S_r , S_{co} și θ_{ca} .

18.4. DETERMINAREA SUPRATERATURILOR ÎNFĂȘURĂRILOR ȘI ULEIULUI, FAȚĂ DE TEMPERATURA MEDIULUI AMBIANT, PENTRU TRANSFORMATOARELE ÎN ULEI

A. Căderea de temperatură între ulei și cuvă se determină în final cu o precizie mai mare utilizînd relația

$$\theta_{uc} = 0,165k_1 \left[\frac{1,05(P_k + P_0)}{S_{co}} \right]^{0,6} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (18.20)$$

în care $k_1 = 1$ pentru răcirea naturală și $k_1 = 0,9$ pentru răcirea forțată cu aer.

B. Supratemperatura straturilor superioare ale uleiului față de aer care se consideră cu 20% mai mare decît valoarea medie

$$\theta_{mua} = 1,2\theta_{mua} = 1,2(\theta_{uc} + \theta_{ca}) \leq 60^\circ\text{C}. \quad (18.21)$$

C. *Supratemperaturile bobinelor înfășurărilor față de mediul ambiant* (aer) vor fi (v. fig. 18.1)

$$\theta_{ba} = \theta_{mbu} + \theta_{uc} + \theta_{ca} \leq \vartheta_N - \vartheta_a \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.22)$$

unde $\vartheta_N = 105^\circ\text{C}$ pentru clasa de izolație A.

Dacă relațiile (18.21) și (18.22) nu sînt îndeplinite, se revine, de asemenea, la modificarea valorilor lui S_r și S_{co} .

18.5. ESTIMAREA ÎNCĂLZIRII TRANSFORMATORULUI USCAT (IN AER)

Depășirea temperaturii înfășurărilor și miezului transformatorului peste temperatura mediului ambiant (în special pentru transformatoarele mici, în aer) poate fi determinată aproximativ cu relația

$$\theta_{ba} \approx \frac{P_k + P_o}{\alpha_0(S_t + S_{Fe})} + \Delta\theta \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.23)$$

în care:

$\alpha_0 = (10 - 12) \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2\text{C}$, este coeficientul mediu de transmitere a căldurii de pe suprafețele deschise ale înfășurărilor și miezului transformatorului;

S_t, S_{Fe} — suprafețele deschise (libere) ale înfășurărilor și miezului transformatorului, în cm^2 ;

$\Delta\theta \approx (10 - 15)^\circ\text{C}$ — căderea de temperatură de la straturile interioare ale înfășurării la cele exterioare.

Pentru o funcționare corespunzătoare, trebuie satisfăcută condiția

$$\theta_{ba} \leq \theta_{adm}, \quad (18.23, a)$$

unde $\theta_{adm} = 100^\circ\text{C}$, pentru izolație de clasă F, este supratemperatura admisă.

Pentru transformatoarele uscate de puteri mai mari se va lua $\alpha_0 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2\text{C}$, iar q nu trebuie să depășească limitele indicate la paragraful 16.4.1 (v. relațiile (16.41) și (16.41, a)).

18.6. ÎNCĂRCAREA TRANSFORMATOARELOR, LA TEMPERATURI SCĂZUTE ALE MEDIULUI AMBIANT

Transformatoarele dimensionate pentru o temperatură a mediului ambiant $\vartheta_a > 20^\circ\text{C}$, dar care funcționează la o temperatură mai mică, se pot încărca cu o putere mai mare, cu 1% pentru fiecare grad, sub 20°C . În aceleași condiții, la răcirea cu radiatoarele ventilate, puterea crește cu 0,75% pentru fiecare grad.

Transformatoarele care au tipul de răcire NL și sînt suflate cu aer, deci devin răcite NS, se pot încărca cu 25% pînă la 35% din puterea lor nominală.

Cînd se urmărește calculul unui transformator cu modul de răcire NS, se ține seama că valoarea coeficientului de transmisie a căldurii prin convecție crește de 1,7 pînă la 1,8 ori, lucru care echivalează cu scăderea ariei suprafețelor răcite prin convecție în același raport față de tipul NL.

18.7. INFLUENȚA FACTORILOR EXTERNI ASUPRA ÎNCĂLZIRII TRANSFORMATOARELOR

Factorii externi, cum sînt altitudinea locului de montare, vîntul, precipitațiile atmosferice și razele solare, influențează temperatura de lucru a transformatoarelor cu răcire naturală. Dar, dintre acești factori, singurul care are o influență permanentă este altitudinea locului de montare.

● Pentru ca un transformator cu răcire naturală destinat să funcționeze la o altitudine h , să-și poată păstra aceeași temperatură de lucru, va trebui ca pierderile evacuate ($P_k + P_o$) să fie luate, în calcule, mai mari, cu valoarea (în procente) [15]

$$p = \frac{1,25\Delta\theta}{1 - \frac{\Delta\theta}{100}} \text{ [%]}, \quad (18.24)$$

în care:

$$\Delta\theta = 4,4 \frac{h}{1 + \frac{S_r}{S_{co}}} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (18.24, a)$$

unde altitudinea h se ia în km.

În cazul utilizării unui transformator normal la altitudinea h , rezultă că, la sarcina nominală, el va avea o temperatură de lucru mai mare cu valoarea dată de relația (18.24, a).

● Vîntul, ca și precipitațiile atmosferice de orice natură, au o influență favorabilă asupra răcirii transformatoarelor montate în aer liber. În schimb, razele solare pot conduce la o creștere suplimentară a temperaturii transformatorului cu $5 - 10^\circ\text{C}$ și chiar mai mult, la transformatoarele mici.

Capitolul 19. EXEMPLE DE CALCUL AL TRANSFORMATOARELOR

Exemplele de calcul indică succesiunea reală a etapelor dimensionării transformatoarelor electrice, făcîndu-se trimiteri corespunzătoare la părți ale textului, la relații, tabele, și figuri. Totodată, exemplele de calcul au scopul de a verifica relațiile de calcul cu unitățile de măsură indicate în text și de a arăta cum se acționează pentru obținerea parametrilor ceruți și cum se rotonjesc datele obținute.

Exemplele de calcul sînt variante care se încadrează în datele temei de proiectare. Optimizarea construcției unui transformator, la mărimile date, se poate face sub diferite aspecte, cum ar fi greutatea minimă, cost minim al materialelor active și izolante, cost total minim incluzînd și costurile de fabricație sau pe cele de exploatare pentru o perioadă de timp stabilită prin temă etc. Indicațiile cuprinse în lucrare, la alegerea diferiților factori înlesnesc acest lucru.

Algoritmul folosit în exemplele de calcul se poate utiliza și la proiectarea transformatoarelor utilizând calculatoarele electronice.

Trebuie menționat că chiar pentru un proiectant cu experiență, găsirea unei soluții bune, nu optime, necesită compararea mai multor variante de calcul pentru aceleași mărimi impuse; acest lucru se poate realiza ușor cu ajutorul calculatoarelor electronice.

19.1. EXEMPLU DE CALCUL AL UNUI TRANSFORMATOR MONOFAZAT DE MICĂ PUTERE, RĂCIT CU AER (USCAT)

Temă. Să se proiecteze un transformator monofazat, de mică putere cu următoarele date:

- $S_N = 100$ VA;
- $U_{1N}/U_{2N} = 220/16$ V;
- $f = 50$ Hz;
- $\cos \varphi_2 = 1$;
- tipul constructiv: în manta;
- sistemul de răcire: în aer.

Transformatorul va avea în secundar, începând de la 12 V, prize din 2 în 2 V, adică: 12, 14 și 16 V.

A. Calculul circuitului magnetic

— Secțiunea coloanei conform relației (16.1)

$$S_c = C_t \sqrt{\frac{S_1}{f}} = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{100}{50}} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 7,07 \text{ cm}^2. \quad (19.1)$$

— Dimensiunile miezului coloanei de formă dreptunghiulară, considerând $b/l_g \approx 1,25$ rezultă, conform relației (16.3)

$$S_c = k_{Fe} b l_g = 1,25 k_{Fe} l_g^2,$$

de unde se obține lungimea pachetului de tole

$$l_g = \sqrt{\frac{S_c}{1,25 k_{Fe}}} = \sqrt{\frac{7,07}{1,25 \cdot 0,95}} = 2,45 \text{ cm};$$

— lățimea coloanei

$$b \approx 1,25 l_g = 1,25 \cdot 2,45 = 3,05 \text{ cm}.$$

Prin rotunjire, se stabilesc următoarele dimensiuni ale coloanei:

$$\begin{aligned} b &= 3 \text{ cm}; \\ l_g &= 2,5 \text{ cm}, \end{aligned} \quad (19.2)$$

pentru care rezultă secțiunea coloanei

$$S_c = k_{Fe} b l_g = 0,95 \cdot 3 \cdot 2,5 = 7,12 \text{ cm}^2. \quad (19.2, a)$$

— Secțiunea jugului, considerînd miezul în manta, conform relației (16.6)

$$S_j = \frac{1}{2} S_c = \frac{1}{2} \cdot 7,12 = 3,56 \text{ cm}^2. \quad (19.3)$$

Fiind un transformator mic, lățimea T a ferestrei (fig. 16.6, c) se va determina după dimensionarea înfășurătorilor; în prealabil însă se va stabili înălțimea coloanei și deci a bobinei.

— Înălțimea coloanei, conform relației (16.8)

$$L_c = \frac{S_1}{100 A e_1} = \frac{100}{100 \cdot 80 \cdot 0,158} = 7,9 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 7,9 \text{ cm},$$

în care:

$A = 80$ A/cm — din tabelul 16.2;

e_1 — conform relației (16.8, b) este

$$e_1 = 4,44 f S_c B_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 7,12 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 0,158 \text{ V}, \quad (19.4)$$

unde, din tabelul 16.2 se impune $B_c = 1$ T, deoarece miezul fiind în manta din tole profil E și I , se utilizează tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate groasă de 0,5 mm.

Prin rotunjire se alege $L_c = 8$ cm.

B. Calculul înfășurătorilor

— T.e.m. din primar și din secundar, conform relațiilor (16.11)

$$E_1 = U_1 - \frac{\Delta u [\%] U_1}{200} = 220 - \frac{10 \cdot 220}{200} = 209 \text{ V};$$

$$E_2 = U_2 + \frac{\Delta u [\%] U_2}{200} = 16 + \frac{10 \cdot 16}{200} = 16,8 \text{ V},$$

în care, din figura 16.5 s-a luat $\Delta u [\%] = 10\%$.

— Numărul de spire al înfășurătorilor, conform relațiilor (16.10) și (16.10, c):

$$w_1 = \frac{E_1}{e_1} = \frac{209}{0,158} = 1320 \text{ spire};$$

$$w_2 = \frac{E_2}{e_1} = \frac{16,8}{0,158} = 106 \text{ spire}.$$

Pentru celelalte prize de tensiune, corespund următoarele numere de spire în secundar:

— pentru 14 V

$$w_2' = w_2 \frac{14}{16} = 106 \frac{14}{16} \approx 93 \text{ spire};$$

— pentru 12 V

$$w_2'' = w_2 \frac{12}{16} = 106 \frac{12}{16} \approx 80 \text{ spire}.$$

- Valorile definitive ale fluxului magnetic și inducțiilor magnetice :
- fluxul magnetic util, conform relației (16.12)

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44fw_1} = \frac{209}{4,44 \cdot 50 \cdot 1320} = 0,712 \cdot 10^{-3} \text{ Wb};$$

- inducția magnetică în coloană, conform relației (16.12, a)

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{0,712 \cdot 10^{-3}}{7,12 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ T};$$

- inducția magnetică în jug, conform relației (16.12, c)

$$B_j = \frac{\Phi}{2S_j} = \frac{0,712 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,56 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ T}.$$

- Curenții nominali ai transformatorului, conform relațiilor (16.13) :

$$I_1 = \frac{S_N \cos \varphi_2}{mU_1 \eta \cos \varphi_1} = \frac{100 \cdot 1}{1 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,9} = 0,595 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{S_N}{mU_2} = \frac{100}{1 \cdot 16} = 6,25 \text{ A},$$

unde s-a considerat $\cos \varphi_1 \approx 0,9$, iar $\eta = 0,85$ din figura 16.5.

- Secțiunile orientative ale conductoarelor, conform relațiilor (16.14)

$$s_{w1} = \frac{I_1}{J_1} = \frac{0,595}{2,6} = 0,23 \text{ mm}^2;$$

$$s_{w2} = \frac{I_2}{J_2} = \frac{6,25}{2,6} = 2,4 \text{ mm}^2,$$

unde, din tabelul 16.2 s-a luat $J_1 = J_2 = 2,6 \text{ A/mm}^2$, pentru ambele înfășurări, utilizându-se conductoare din cupru.

- Dimensiunile conductoarelor se aleg din STAS 685-74 (anexa 5, tabelul 5-1) astfel :

- pentru înfășurarea primară, conductor rotund izolat cu un strat de email tereftalic (ET)

$$d_1 = \Phi 0,56 \text{ ET} \Rightarrow s_{w1} = 0,246 \text{ mm}^2,$$

iar din anexa 9, s-a luat $d'_1 - d_1 = 0,1 \text{ mm}$ (pentru a lucra cu acoperire) rezultând deci

$$d'_1 = 0,66 \text{ mm};$$

- pentru înfășurarea secundară, conductor rotund izolat tot cu un strat de email tereftalic (ET)

$$d_2 = \Phi 1,8 \text{ ET} \Rightarrow s_{w2} = 2,545 \text{ mm}^2$$

și de asemenea din anexa 9, $d'_2 - d_2 = 0,1 \text{ mm}$ rezultând

$$d'_2 = 1,9 \text{ mm}.$$

- Valorile definitive (recalculate) ale densităților de curent, conform relațiilor (16.14, c) :

$$J_1 = \frac{I_1}{s_{w1}} = \frac{0,595}{0,246} = 2,42 \text{ A/mm}^2;$$

$$J_2 = \frac{I_2}{s_{w2}} = \frac{6,25}{2,545} = 2,45 \text{ A/mm}^2.$$

- Dimensiunile înfășurărilor :

- înălțimea bobinelor, conform relației (16.15)

$$H_b = L_c - 5 \text{ mm} = 80 - 5 = 75 \text{ mm} = 7,5 \text{ cm};$$

- numărul de spire pe un strat conform relațiilor (16.16) :

- pentru primar

$$w_{s1} = \frac{H_b}{d'_1} = \frac{75}{0,66} = 113 \text{ spire};$$

- pentru secundar

$$w_{s2} = \frac{H_b}{d'_2} = \frac{75}{1,9} = 39 \text{ spire};$$

- numărul de straturi, conform relațiilor (16.17) :

- pentru primar

$$n_{s1} = \frac{w_1}{w_{s1}} = \frac{1320}{113} = 11,7 \text{ — adică 12 straturi};$$

- pentru secundar

$$n_{s2} = \frac{w_2}{w_{s2}} = \frac{106}{39} = 2,72 \text{ — adică 3 straturi};$$

- grosimile bobinelor, conform relațiilor (16.18) :

- pentru primar

$$a_1 = n_{s1} d'_1 = 12 \cdot 0,66 = 7,9 \text{ mm} \approx 8 \text{ mm};$$

- pentru secundar

$$a_2 = n_{s2} d'_2 = 3 \cdot 1,9 = 5,7 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm}.$$

- Lățimea ferestrei transformatorului (fig. 16.6, c), conform relației (16.19) rezultă

$$T = 1 + 2 + a_1 + a_2 + 3 = 1 + 2 + 8 + 6 + 3 = 20 \text{ mm}.$$

C. Calculul pierderilor și curentului de funcționare în gol

- Rezistențele înfășurărilor, conform relației (16.38) având conductoare din cupru și clasa de izolație F :

- pentru înfășurarea primară

$$R_1 = \rho_{115^\circ} \frac{w_1 l_{med1}}{s_{w1}} = 0,0246 \frac{1320 \cdot 0,152}{0,246} = 20 \Omega;$$

— pentru înfășurarea secundară

$$R_2 = \rho_{115} \frac{w_2 l_{med2}}{s_{w2}} = 0,0246 \frac{1060 \cdot 0,208}{2,545} = 0,213 \Omega,$$

unde conform relațiilor (16.39) lungimile medii sînt :

$$l_{med1} \approx 2(0,5 + b + l_g + 2a_1) = 2(0,5 + 3 + 2,5 + 2 \cdot 0,8) = 15,2 \text{ cm} = 0,152 \text{ m};$$

$$l_{med2} \approx 2(0,5 + b + l_g + 4a_1 + 2a_2) = 2(0,5 + 3 + 2,5 + 4 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,6) = 20,8 \text{ cm} = 0,208 \text{ m}.$$

— Pierderile în înfășurări, conform relației (16.40), considerînd $k_{r1} \approx k_{r2} \approx 1$:

— pentru înfășurarea primară.

$$P_{e11} = m_1 R_1 I_1^2 = 1 \cdot 20 \cdot 0,595^2 = 7,1 \text{ W};$$

— pentru înfășurarea secundară

$$P_{e12} = m_2 R_2 I_2^2 = 1 \cdot 0,213 \cdot 6,25^2 = 8,3 \text{ W};$$

— pierderile totale în înfășurări

$$P_k = P_{e11} + P_{e12} = 7,1 + 8,3 = 15,4 \text{ W}.$$

— Masa conductoarelor, înfășurărilor, conform relației (16.42)

$$G_{w1} = \gamma_{Cu} s_{w1} w_1 l_{med1} = 8,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,246 \cdot 10^{-2} \cdot 1320 \cdot 15,2 = 0,44 \text{ kg};$$

$$G_{w2} = \gamma_{Cu} s_{w2} w_2 l_{med2} = 8,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,545 \cdot 10^{-2} \cdot 106 \cdot 20,8 = 0,5 \text{ kg}.$$

— Masa netă a fierului, conform relațiilor (16.43, a) :

$$G_{Fec} = S_c L_c \gamma_{Fe} = 7,12 \cdot 8 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 0,436 \text{ kg};$$

$$G_{Fej} = 2S_j(L_c + L_j) \gamma_{Fe} = 2 \cdot 3,56(8 + 10) \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 0,98 \text{ kg}.$$

unde conform relației (16.9, e) și figurii 16.6, c

$$L_j = 2(b + T) = 2(3 + 2) = 10 \text{ cm}.$$

— Pierderile totale în fier, conform relației (16.44)

$$P_o \approx P_{Fe} = P_{Fec} + P_{Fej} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} (B_c^2 G_{Fec} + B_j^2 G_{Fej}) = 1,03 \cdot 2,3 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} (1^2 \cdot 0,436 + 1^2 \cdot 0,98) = 3,35 \text{ W},$$

unde $p_{10/50} = 2,3 \text{ W/kg}$, considerînd miezul din tole de tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate și cu grosimea de 0,5 mm.

— Curentul de funcționare în gol :

— componenta activă, conform relației (16.45)

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{mU_{1f}} = \frac{3,35}{1 \cdot 220} = 0,0152 \text{ A};$$

— componenta reactivă sau curentul de magnetizare, conform relației (16.46, a)

$$I_{0r} = I_{\mu} = \frac{H_c L_c + H_j(L_c + L_j) + n \frac{B_i}{\mu_0} \delta_i}{\sqrt{2} w_1} = \frac{5,02 \cdot 8 + 5,02(8 + 10) + 4 \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,015 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 1320} = 0,096 \text{ A},$$

în care, din anexa 2, s-au determinat :

pentru $B_c = 1 \text{ T} \Rightarrow H_c = 5,02 \text{ A/cm}$;

pentru $B_j = 1 \text{ T} \Rightarrow H_j = 5,02 \text{ A/cm}$;

$n_g = 4$, fiind un miez de formă indicată în figura 16.6, c ;

$B_i = B_c = 1 \text{ T}$, îmbinările făcîndu-se sub un unghi drept ;

$\delta_i \approx 0,015 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, deoarece utilizînd tole este numărul rosturilor de îmbinare dintre tole este mai mic ;

— curentul total, la funcționarea în gol, conform relației (16.47)

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} = \sqrt{0,0152^2 + 0,096^2} = 0,0975 \text{ A},$$

sau în procente din I_{1N} , conform relației (16.47, a)

$I_{10}[\%] = \frac{I_{10}}{I_{1N}} 100 = \frac{0,0975}{0,595} 100 = 16,5\%$, valoarea cam mare însă obișnuită la transformatoarele mici și cu miezul feromagnetic din tablă silicioasă cu cristale neorientate.

— Randamentul transformatorului, conform relației (16.52) la sarcină nominală ($\beta = 1$), în procente

$$\eta = \frac{S_N \cos \varphi_2}{S_N \cos \varphi_2 + P_k + P_{Fe}} 100 = \frac{100 \cdot 1}{100 \cdot 1 + 15,4 + 3,35} \cdot 100 = 84,5\%$$

aproxiat de valoarea considerată din figura 16.5 (85%).

D. Calculul termic

— Estimarea încălzirii transformatorului, conform relației (18.23)

$$\theta_{oa} \approx \frac{P_k + P_{Fe}}{a_0(S_i + S_{Fe})} + \Delta \theta = \frac{15,4 + 3,35}{10 \cdot 10^{-4}(136 + 152)} + 15 = 70,2^\circ\text{C},$$

unde :

— suprafața liberă a bobinei este

$$S_i \approx [2(0,5 + b + l_g + 4a_1 + 4a_2) - 2l_g] H_B = [2(0,5 + 3 + 2,5 + 4 \cdot 0,8 + 4 \cdot 0,6) - 2 \cdot 2,5] \cdot 7,5 = 136 \text{ cm}^2$$

și reprezintă suprafața laterală exterioară a bobinei mai puțin partea din dreptul ferestrei transformatorului (a coloanelor laterale);

— suprafața liberă a miezului (suprafața laterală + frontală, fără cea inferioară)

$$S_{Fc} \approx 4(L_1 + L_c) + l_g \left(L_1 + 2L_c + 4 \frac{b}{2} \right) = 4(10 + 8) + 2,5(10 + 2 \cdot 8 + 4 \cdot 1,5) = 152 \text{ cm}^2.$$

Se observă că este satisfăcută relația (18.23, a), adică

$$\theta_{ba} = 70,2^\circ\text{C} < \theta_{adm} = 100^\circ\text{C},$$

pentru clasa de izolație F, ceea ce înseamnă că transformatorul este bine dimensionat.

19.2. EXEMPLU DE CALCUL AL UNUI TRANSFORMATOR TRIFAZAT DE PUTERE MEDIE, ÎN ULEI

Temă: Să se proiecteze un transformator trifazat de putere medie, în ulei cu înfășurări din cupru și cu miez feromagnetic din tole de tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate (cifra de pierderi $p_{10/50} = 0,45 \text{ W/kg}$) cu următoarele date:

$$S_N = 250 \text{ kVA};$$

$$U_{iN} = 10 \text{ kV};$$

$$U_{jN} = 0,4 \text{ kV};$$

$$m = 3;$$

$$f = 50 \text{ Hz};$$

$$\text{conexiunea } Dy_n - 5;$$

$$u_K = 6\%;$$

$$\text{reglaj de tensiune } \pm 5\%;$$

$$P_0 = 550 \text{ W};$$

$$P_k = 3\,200 \text{ W}.$$

Reglajul tensiunii se face fără sarcină, pe înfășurarea de înaltă tensiune.

A. Calculul circuitului magnetic

— Secțiunea coloanei, conform relației (16.1)

$$S_c = C_t \sqrt{\frac{S_1}{f}} = (4 \div 6) \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{83,5 \cdot 10^3}{50}} = (16,3 \div 24,5) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 163 \div 245 \text{ cm}^2, \quad (19.5)$$

unde, puterea aparentă pe o coloană, avînd în vedere că transformatorul va avea trei coloane și înfășurările concentrice, este

$$S_1 = \frac{S_N}{3} = \frac{250}{3} = 83,5 \text{ kVA} = 83,5 \cdot 10^3 \text{ VA}.$$

— Diametrul coloanei, considerînd secțiunea coloanei în trepte, rezultă conform relației (16.2, a)

$$D_c = \sqrt{\frac{4S_c}{\pi k_m}} = \sqrt{\frac{4(163 \div 245) \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,875}} = (15,4 \div 18,8) \cdot 10^{-2} \text{ m} = 15,4 \div 18,8 \text{ cm}, \quad (19.5, a)$$

unde,

$$k_m = k_{Fe} k_g = 0,95 \cdot 0,92 = 0,875, \text{ iar}$$

$k_g = 0,92$, din tabelul 16.1, a, pentru un diametru al coloanei D_c estimat orientativ între 10 și 18 cm, valoare obținută mai sus cu relația (19.5, a).

De asemenea, din același tabel, rezultă orientativ un număr de trepte pentru coloană $n_{tr} = 6$; strîngerea miezului coloanei pentru asemenea diametre se face, în mod obișnuit, prin lipire cu lac.

Îmbinarea dintre tolele coloanelor și jugurilor se face prin *întrețesere*, sub un unghi de 45° .

Lățimile treptelor coloanei a_1, a_2, \dots, a_{n_t} , calculate conform indicațiilor din figura 16.1 sau stabilite de proiectant după alte norme de fabricație, se recomandă să se rotunjească fie din 5 în 5 mm, fie la alte valori, astfel încît cantitatea de deșeuri rezultată din tăierea tablei să fie minimă, iar tehnologia miezului corespunzătoare.

În cazul de față se stabilește

$$D_c = 160 \text{ mm} = 16 \text{ cm}, \quad (19.6)$$

cu următoarele lățimi ale treptelor (v. fig. 16.1, f):

$$a_1 \approx 0,96 \cdot 16 = 15,35 \text{ cm}, \text{ rotunjit } a_1 = 15,5 \text{ cm};$$

$$a_2 \approx 0,885 \cdot 16 = 14,15 \text{ cm}, \rightarrow a_2 = 14 \text{ cm};$$

$$a_3 \approx 0,775 \cdot 16 = 12,4 \text{ cm}, \rightarrow a_3 = 12,5 \text{ cm};$$

$$a_4 \approx 0,631 \cdot 16 = 10,1 \text{ cm}, \rightarrow a_4 = 10 \text{ cm};$$

$$a_5 \approx 0,465 \cdot 16 = 7,45 \text{ cm}, \rightarrow a_5 = 7,5 \text{ cm};$$

$$a_6 \approx 0,28 \cdot 16 = 4,48 \text{ cm}, \rightarrow a_6 = 4,5 \text{ cm}.$$

Din construcția grafică, la scară, a secțiunii coloanei rezultă următoarele grosimi ale treptelor (fig. 19.1):

$$b_1 = 18 \text{ mm} = 1,8 \text{ cm};$$

$$b_2 = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm};$$

$$b_3 = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm};$$

$$b_4 = 13 \text{ mm} = 1,3 \text{ cm};$$

$$b_5 = 9 \text{ mm} = 0,9 \text{ cm};$$

$$b_6 = 6 \text{ mm} = 0,6 \text{ cm};$$

$$b = 2 \sum_{i=1}^{n_{tr}} b_i = 15,2 \text{ cm}.$$

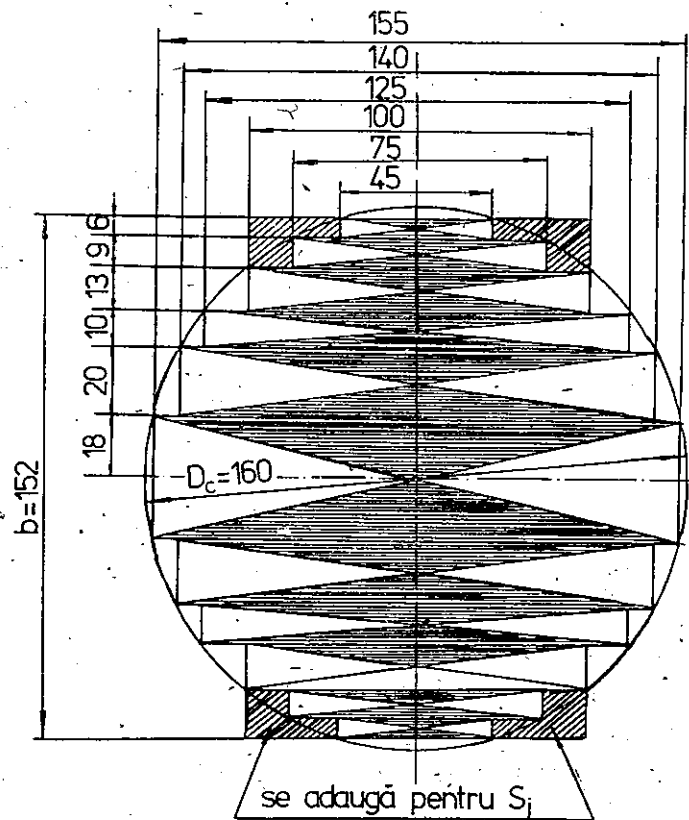


Fig. 19.1. Construcția la scară a secțiunii coloanei. Partea hașurată (din cele 4 colțuri) se adaugă la S_c , pentru a rezulta $S_j > S_c$.

Secțiunea netă de fier a coloanei, rezultă cu relația (16.4, a)

$$S_c = 2k_{Fe} \sum_{i=1}^{n_{tr}} a_i b_i = 2 \cdot 0,95(15,5 \cdot 1,8 + 14 \cdot 2 + 12,5 \cdot 1 + 10 \cdot 1,3 + 7,5 \cdot 0,9 + 4,5 \cdot 0,6) \approx 173 \text{ cm}^2. \quad (19.7)$$

— Secțiunea jugului, se determină considerînd că jugul va avea cu două trepte mai puțin decît coloana. Astfel, dacă la secțiunea coloanei se mai adaugă cele patru suprafețe hașurate (v. fig. 19.1 și fig. 16.1) se obține

$$S_j = 2k_{Fe}[a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 + a_4(b_4 + b_5 + b_6)] = 2 \cdot 0,95[15,5 \cdot 1,8 + 14 \cdot 2 + 12,5 \cdot 1 + 10(1,3 + 0,9 + 0,6)] = 183 \text{ cm}^2, \quad (19.8)$$

ceea ce înseamnă că

$$\beta_j = \frac{S_j}{S_c} = \frac{183}{173} = 1,057$$

sete în limitele indicate de relația (16.7).

— Înălțimea coloanei, conform relației (16.8)

$$L_c = \frac{S_1}{100 A e_1} = \frac{83,5 \cdot 10^3}{100 \cdot 350 \cdot 6,5} = 0,366 \text{ m} \approx 36,5 \text{ cm}, \quad (19.9)$$

unde, din tabelul 16.2 s-au ales

$$A = 350 \text{ A/cm};$$

$$B_c = 1,7 \text{ T},$$

iar t.e.m. pe spiră conform relației (16.8, b) este

$$e_1 = 4,44 f S_c B_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 173 \cdot 10^{-4} \cdot 1,7 = 6,5 \text{ V}.$$

— Lățimea ferestrei (valoare orientativă) se determină cu relația (16.9, b)

$$T = M - D_c = 32 - 16 = 16 \text{ cm}, \quad (19.9, a)$$

în care, distanța dintre coloane, conform relației (16.9, a)

$$M = \alpha D_c = 2 \cdot 16 = 32 \text{ cm},$$

unde s-a considerat $\alpha \approx 2$.

Se menționează că valorile definitive vor fi confirmate după așezarea înfășurărilor și după calculul caracteristicilor transformatorului (P_k , u_k și P_0).

— Lungimea medie a jugului magnetic, pentru fazele marginale, conform relației (16.9, d)

$$L_j \approx 2M + 0,9 D_c = 2 \cdot 32 + 0,9 \cdot 16 = 78,4 \text{ cm}. \quad (19.9, b)$$

Verificarea prealabilă (pentru aceste dimensiuni orientative ale miezului) a pierderilor la funcționarea în gol, conform relației (16.44)

$$P_0 \approx P_{Fe} = k_p P_{10/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (B_c^2 G_{Fec} + B_j^2 G_{Fej}) = 1,07 \cdot 0,45 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} (1,7^2 \cdot 145 + 1,61^2 \cdot 219) = 475 \text{ W}, \quad (19.10)$$

unde:

— inducția magnetică în jug

$$B_j = \frac{\Phi}{S_j} = \frac{B_c S_c}{S_j} = \frac{B_c}{\beta_j} = \frac{1,7}{1,057} = 1,61 \text{ T};$$

— masa netă a fierului, conform relațiilor (16.43, b):

— pentru coloane

$$G_{Fec} = 3 S_c L_c \gamma_{Fe} = 3 \cdot 173 \cdot 36,5 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 145 \text{ kg};$$

— pentru juguri

$$G_{Fej} = 2 S_j L_j \gamma_{Fe} = 2 \cdot 183 \cdot 78,4 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 219 \text{ kg}.$$

Dacă pentru k_p se ia valoarea rezultată din practica de fabricație observația de la relația (16.44), atunci (considerînd $k_p = 1,25$) rezultă

$$P_0 = 475 \cdot \frac{1,25}{1,07} = 556 \text{ W}, \quad (19.10, a)$$

adică apropiate de valoare impusă prin temă, ceea ce înseamnă că dimensionarea miezului, pînă în această etapă, este bine făcută.

B. Calculul înfășurărilor

— T.e.m. din înfășurarea primară și secundară, conform relațiilor (16.11, a):

$$E_i \approx U_{1f} = U_{iN} = 10\,000 \text{ V, înfășurare avînd conexiunea } D;$$

$$E_j \approx U_{2f} = \frac{U_{jN}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V, înfășurare avînd conexiunea } y.$$

— Numărul de spire al înfășurărilor:

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune, conform relației (16.10), pentru t.e.m. nominală

$$w_i = \frac{E_i}{e_1} = \frac{10\,000}{6,5} \approx 1\,538 \text{ spire};$$

— numărul de spire corespunzător treptei maxime de reglaj a tensiunii, conform relației (16.10, a)

$$\Delta w_i = \frac{k' \Delta u \%}{100} w_i = \frac{5}{100} \cdot 1\,538 \approx 77 \text{ spire};$$

— numărul total de spire al înfășurării primare (de înaltă tensiune), conform relației (16.10, b)

$$w_{iT} = w_i + \Delta w_i = 1\,538 + 77 = 1\,615 \text{ spire}; \quad (19.11)$$

— pentru înfășurarea de joasă tensiune, conform relației (16.10, c)

$$w_j = \frac{E_j}{e_1} = \frac{231}{6,5} = 35,53 \text{ spire.}$$

Se rotunjește w_j la numărul întreg apropiat

$$w_j = 36 \text{ spire.} \quad (19.12)$$

Pentru a nu modifica raportul de transformare se recalculează numărul de spire al înfășurării primare, din condiția menținerii raportului de transformare, impus prin datele nominale

$$k = \frac{E_i}{E_j} = \frac{w_i}{w_j}$$

Se obțin astfel, pentru înfășurarea de înaltă tensiune, conform relației (16.11, e)

$$w_i = k w_j = \frac{E_i}{E_j} w_j = \frac{10\,000}{231} \cdot 36 \approx 1\,558 \text{ spire};$$

$$\Delta w_i = \frac{k' \Delta u \%}{100} w_i = \frac{5}{100} \cdot 1\,558 \approx 78 \text{ spire,}$$

și numărul total

$$w_{iT} = w_i + \Delta w_i = 1\,558 + 78 = 1\,636 \text{ spire.} \quad (19.12, a)$$

— Valorile definitive ale fluxului magnetic și inducțiilor magnetice:
— fluxul magnetic util (maxim), conform relației (16.12)

$$\Phi = \frac{E_i}{4,44 f w_i} = \frac{10\,000}{4,44 \cdot 50 \cdot 1\,558} \approx 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}; \quad (19.13)$$

— inducția magnetică în coloană, conform relației (16.12, a)

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{2,9 \cdot 10^{-2}}{173 \cdot 10^{-4}} = 1,676 \text{ T,} \quad (19.13, a)$$

— inducția magnetică în jug, conform relației (16.12, b)

$$B_j = \frac{\Phi}{S_j} = \frac{2,9 \cdot 10^{-2}}{183 \cdot 10^{-4}} = 1,584 \text{ T,} \quad (19.13, b)$$

valori care se încadrează în limitele normale;

— t.e.m. într-o spirală, conform relației (16.12, d)

$$e_1 = \frac{E_i}{w_i} = \frac{10\,000}{1\,558} \approx 6,42 \text{ V/spiră.}$$

— Curenții nominali ai transformatorului, conform relațiilor (16.13, a), sînt:

— în înfășurarea de înaltă tensiune

$$I_i \approx \frac{S_N}{m_i U_{1f}} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 10\,000} = 8,33 \text{ A}; \quad (19.14)$$

— în înfășurarea de joasă tensiune

$$I_j = \frac{S_N}{m_j U_{2f}} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 231} = 360,75 \text{ A,} \quad (19.14, a)$$

unde, pentru ambele înfășurări numărul de faze este același, adică $m_i = m_j = m = 3$.

— Secțiunile orientative ale conductoarelor, conform relațiilor (16.14):

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$s_{wi} = \frac{I_i}{J_i} = \frac{8,33}{2,4} = 3,47 \text{ mm}^2;$$

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$s_{wj} = \frac{I_j}{J_j} = \frac{360,75}{2,75} = 131,2 \text{ mm}^2,$$

unde, s-a considerat că înfășurările nu au aceleași condiții de răcire, deoarece înfășurarea de joasă tensiune fiind mai subțire se răcește mai bine, iar cea de înaltă tensiune fiind mai groasă și cu izolații între straturi (se ia înfășurare stratificată), se răcește mai greu.

De aceea, în conformitate și cu indicațiile din tabelul 16.2 s-a ales

$$J_i = 2,4 \text{ A/mm}^2 \text{ și } J_j = 2,75 \text{ A/mm}^2.$$

— Dimensiunile conductoarelor. După cum se impune prin temă, conductoarele ambelor înfășurări sînt din cupru și izolate cu hîrtie. Se aleg conductoare profilate deoarece, pentru înfășurarea de joasă tensiune, a rezultat o secțiune mare, iar pentru cea de înaltă tensiune, deși secțiunea este mică, se obține o așezare și o umplere mai bună a bobinei.

Din STAS 2873/1-86 (anexa 7, tabelul 7-I) se stabilesc:

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$\text{Sîrmă } O-1,8 \times 2,12 \text{ STAS 2873/1-86 (gros. izol. } 0,3 \text{ mm)} = 3,45 \text{ mm}^2; \quad (19.15)$$

— pentru înfășurarea de joasă tensiune se vor utiliza 4 fire în paralel, dimensiunile conductorului (firului) fiind corelate cu înălțimea H_B a bobinei și cu numărul de straturi (v. relațiile (19.19) și (19.19, a)). Se alege astfel

$$\text{Sîrmă } O-4(4,25 \times 8) \text{ STAS 2873/1-86 (gros. izol. } 0,36 \text{ mm)} = 4 \cdot 33,1 = 132,4 \text{ mm}^2. \quad (19.15, a)$$

OBSERVAȚIE. Sîrmă O, înseamnă conductor de cupru, în stare de ecruisare „moale” (vezi paragraful 2.2).

Grosimea bilaterală a izolației de hîrtie a conductorului (0,3 mm pentru i.t. și 0,36 mm pentru j.t.) s-a stabilit conform STAS 6163-76 (anexa 9, tabelul 9-III).

Rezultă astfel următoarele dimensiuni ale conductoarelor izolate:

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$a' \times b' = 2,1 \times 2,42 \text{ mm}^2; \quad (19.16)$$

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$a' \times b' = 4,61 \times 8,36 \text{ mm}^2. \quad (19.16, a)$$

— Valorile definitive (reecalculate) ale densităților de curent, conform relațiilor (16.14, c)

$$J_t = \frac{I_t}{s_{wt}} = \frac{8,33}{3,45} = 2,41 \text{ A/mm}^2; \quad (19.17)$$

$$J_j = \frac{I_j}{s_{wj}} = \frac{360,75}{132,4} = 2,72 \text{ A/mm}^2.$$

— Tipul și dimensiunile înfășurărilor. În conformitate cu indicațiile menționate în paragraful 16.3.3 B și tabelul 16.7 pentru puterea și tensiunile impuse prin temă și pentru curenții calculați, în funcție de care au rezultat forma și dimensiunile conductoarelor, se stabilesc următoarele tipuri de înfășurări:

— înfășurarea de joasă tensiune, va fi de tip cilindrică, cele 4 conductoare în paralel așezîndu-se două alăturate (suprapuse axial) și două suprapuse radial. Bobina va avea (v. relațiile 19.12 și 19.19, a) două straturi (a câte două conductoare suprapuse radial), între care se prevede un canal de răcire $a_{ja} = 3 \text{ mm}$ (figura 16.10, c, în care însă fiecare strat are câte două conductoare suprapuse axial — ca în figura 16.11 și câte două conductoare suprapuse radial, ca în figura 16.12, a).

Nivelarea înălțimii bobinei se face cu ajutorul a două pene (segmente) circulare, din carton electrotehnic, de tipul celor indicate în figura 16.14.

— înfășurarea de înaltă tensiune, va fi de tip stratificat, ca în figura 16.27, însă cu conductor profilat. Bobina va avea un canal axial de răcire în partea interioară (la o distanță cuprinsă între $1/3$ și $2/5$ din numărul total de straturi) cu lățimea $a_{ia} = 5 \text{ mm}$.

Bobina de înaltă tensiune se deapănă direct peste cea de joasă tensiune, rezultînd o înfășurare monolit.

— Înălțimea bobinelor (orientativă), conform relației (16.20) și figurii 16.8

$$H_B = L_c - 2s_{im} = 36,5 - 2 \cdot 2,5 = 31,5 \text{ cm}, \quad (19.18)$$

unde, din tabelul 16.3 pentru $U_{jN} = 0,4 \text{ kV}$ și $U_{iN} = 10 \text{ kV}$, s-au stabilit (v. fig. 16.8):

$$\begin{aligned} s_{im} &= 2,5 \text{ cm}; \\ a_{mj} &= 0,4 \text{ cm}; \\ a_{jt} &= 0,8 \text{ cm}; \\ a_{it} &= 0,8 \text{ cm}. \end{aligned} \quad (19.18, a)$$

Modul de așezare al înfășurărilor și izolațiilor folosite este arătat detaliat în figura 19.2 (v. mai departe, punctul E).

— Numărul de spire pe un strat:

— pentru înfășurarea de joasă tensiune, rezultă din relația (16.21)

$$w_{sj} = \frac{H_B - n_t h_s}{h_s k_e} - 1 = \frac{31,5}{1,672 \cdot 1,01} - 1 = 17,65 \text{ spire} \quad (19.19)$$

în care:

$$h_s = 2b' = 2 \cdot 8,36 = 16,72 \text{ mm} = 1,672 \text{ cm (v. fig. 16.11);}$$

$$k_e = 1,01;$$

$n_t = 0$, deoarece fiind numai două conductoare (fire) suprapuse radial, se face o singură transpoziție, după primul strat; fiind și două conductoare (fire) suprapuse axial, transpunerea se face fără pierderi din înălțimea bobinei (adică fără spațiu suplimentar) prin trecerea (permutarea) conductoarelor dintr-un strat suprapus axial în celălalt.

Cum s-a menționat mai sus la stabilirea dimensiunilor conductoarelor, pentru ca bobina să aibă două straturi se stabilește

$$w_{sj} = 18 \text{ spire/strat} \quad (19.19, a)$$

Înălțimea bobinei de joasă tensiune, rezultă astfel, cu relația (16.21)

$$H_{Bj} = (w_{sj} + 1)h_s k_e + n_t h_s = (18 + 1) \cdot 1,672 \cdot 1,01 \approx 32 \text{ cm}, \quad (19.20)$$

ceea ce înseamnă că pentru înfășurarea de joasă tensiune, distanța de izolație pînă la jugul feromagnetic rezultă (v. fig. 16.8)

$$s_{jm} = \frac{L_c - H_{Bj}}{2} = \frac{36,5 - 32}{2} = 2,25 \text{ cm}, \quad (19.20, a)$$

ceea ce este suficient (din tabelul 16.3 pentru $U_{jN} \leq 1 \text{ kV}$, rezultă că se poate lua $s_{jm} = 2 \text{ cm}$);

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune, numărul de spire pe un strat rezultă din relația (16.34), în care se consideră însă dimensiunile conductorului profilat

$$w_{st} = \frac{H_B}{b'} - 1 = \frac{31,5}{0,242} - 1 = 129 \text{ spire/strat}. \quad (19.21)$$

Numărul de straturi

$$n_{st} = \frac{w_{st}}{w_{st}} = \frac{1 \cdot 636}{129} = 12,68 \text{ straturi,}$$

ceea ce înseamnă că înfășurarea de înaltă tensiune va avea 13 straturi din care 12 straturi cu 129 spire și ultimul strat cu 88 spire.

Tensiunea între straturi, conform relației (16.33)

$$U_s = 2w_{st}e_1 = 2 \cdot 129 \cdot 6,42 \approx 1 \ 656 \text{ V,} \quad (19.22)$$

pentru care din tabelul 16.6 rezultă o grosime a izolației dintre straturi

$$\delta_s = 3 \times 0,12 = 0,36 \text{ mm,} \quad (19.22, a)$$

izolația depășind capetele bobinei cu 1,6 mm în fiecare parte.

— **Grosimea înfășurărilor** rezultă :

— pentru înfășurarea de joasă tensiune, conform relației (16.21, a)

$$a_j = n_{sj}a_s + n_a a_{ja} + (n_s - n_a - 1)\delta_{iz} = 2 \cdot 9,22 + 1 \cdot 3 + (2 - 1 - 1)\delta_{iz} \approx 21,5 \text{ mm} = 2,15 \text{ cm,} \quad (19.23)$$

unde :

$$a_s = 2a' = 2 \cdot 4,61 = 9,22 \text{ mm, este grosimea stratului;}$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune, conform relației (16.35, a) folosind grosimea a' a conductorului, în locul lui d'

$$a_i = n_{si}a' + a_{ia} + (n_s - 2)\delta_s = 13 \cdot 2,1 + 5 + (13 - 2) \cdot 0,36 = 36,26 \text{ mm} \approx 36,5 \text{ mm} = 3,65 \text{ cm.} \quad (19.23, a)$$

— **Lățimea ferestrei transformatorului**, conform relației (16.37), rezultă

$$T = 2(a_{mj} + a_j + a_{ji} + a_i) + a_{ij} = 2(0,4 + 2,15 + 0,8 + 3,65) + 0,8 = 14,8 \text{ cm} \approx 15 \text{ cm,} \quad (19.24)$$

față de 16 cm cât fusese estimată cu relația (19.9, a).

C. Calculul pierderilor și curentului de funcționare în gol

— **Rezistențele înfășurărilor**, pe fază, conform relației (16.38) având conductoare din cupru și clasă de izolație A (transformator în ulei) :

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$R_j = \rho_{Cu75^\circ} \frac{w_j l_{med j}}{s_{wj}} = 0,022 \cdot \frac{36 \cdot 0,597}{132,4} = 3,57 \cdot 10^{-3} \ \Omega, \quad (19.25)$$

în care :

$$\rho_{Cu75^\circ} = 0,022 \ \Omega \text{mm}^2/\text{m};$$

$$l_{med j} = \pi D_{m2} = \pi \cdot 19 = 59,7 \text{ cm} = 0,597 \text{ m,} \quad (19.25, a)$$

unde, diametrul mediu, conform figurii 16.8 și relației (16.39, c)

$$D_{m2} = D_c + 2a_{mj} + a_j = 16 + 2 \cdot 0,4 + 2,15 = 18,95 \text{ cm} \approx 19 \text{ cm};$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$R_i = \rho_{Cu75^\circ} \frac{w_i l_{med i}}{s_{wi}} = 0,022 \cdot \frac{1 \ 558 \cdot 0,83}{3,45} \approx 8,25 \ \Omega, \quad (19.26)$$

în care, conform relației (16.39, b)

$$l_{med i} = \pi D_{m1} = \pi \cdot 26,35 = 82,78 \text{ cm} \approx 0,83 \text{ m,} \quad (19.26, a)$$

unde, diametrul mediu, conform figurii 16.8 și relației (16.39, c)

$$D_{m1} = D_c + 2(a_{mj} + a_j + a_{ji}) + a_i = 16 + 2(0,4 + 2,15 + 0,8) + 3,65 = 26,35 \text{ cm.}$$

— **Pierderile în înfășurări**, conform relației (16.40) :

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$P_{e1j} = mk_{rj} R_j I_j^2 = 3 \cdot 1,032 \cdot 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot 360,75^2 = 1 \ 438,4 \text{ W,} \quad (19.27)$$

unde, factorul de majorare a pierderilor în curent alternativ, conform relației (16.40, b)

$$k_{rj} = 1 + 1,73 \alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (m_s^2 - 0,2) = 1 + 1,73 \cdot 0,84^2 \left(\frac{50}{0,022 \cdot 10^4} \right)^2 \cdot 0,425^4 (4^2 - 0,2) = 1,032 \quad (19.27, a)$$

în care :

$a = 0,425 \text{ cm}; b = 0,8 \text{ cm}$, sînt dimensiunile conductorului de joasă tensiune ;

$$\rho = \rho_{Cu75^\circ} = 0,022 \ \Omega \text{mm}^2/\text{m};$$

$$\alpha_p = k_R \frac{bn}{H_{Bj}} = 0,934 \cdot \frac{0,8 \cdot 36}{32} = 0,84 \text{ conform relației (16.40, c);}$$

coeficientul lui Rogowski, conform relației (16.49, c) fiind,

$$k_R = 1 - \frac{a_j + a_i + a_{ji}}{\pi H_{Bj}} = 1 - \frac{2,15 + 3,65 + 0,8}{\pi \cdot 32} = 0,934;$$

(19.27, b)

$n = 2w_{sj} = 2 \cdot 18 = 36$ conductoare pe înălțimea bobinei, deoarece conductoarele în paralel sînt cîte două suprapuse axial ;

$m_s = 4$ deoarece, la cele două straturi ale bobinei, conductoarele în paralel sînt și cîte două suprapuse radial ;

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$P_{e1i} = mk_{ri} R_i I_i^2 = 3 \cdot 1,01 \cdot 8,25 \cdot 8,33^2 = 1 \ 734,5 \text{ W,} \quad (19.28)$$

unde, factorul de majorare a pierderilor în curent alternativ, conform relației (16.40, b)

$$k_{ri} = 1 + 1,73 \alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (m_s^2 - 0,2) = 1 + 1,73 \cdot 0,81^2 \left(\frac{50}{0,022 \cdot 10^4} \right)^2 \cdot 0,18^4 \cdot (13^2 - 0,2) = 1,01, \quad (19.28, a)$$

în care :

$a = 0,18$ cm ; $b = 0,212$ cm, sînt dimensiunile conductorului de înaltă tensiune ;

$$\rho = \rho_{Cu75} = 0,022 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m} ;$$

$$\alpha_p = k_R \frac{bn}{H_{Bt}} = 0,933 \frac{0,212 \cdot 129}{31,5} = 0,81 ; \quad (19.28, b)$$

coeficientul lui Rogowski, pentru $H_{Bt} = 31,5$ cm rezultă

$k_R = 0,933$, adică practic identic cu cel anterior (pentru joasă tensiune) ;

$n = w_{st} = 129$ conductoare pe înălțimea bobinei ;

$m_s = n_{st} = 13$ conductoare pe grosimea bobinei.

— Densitățile de suprafață ale pierderilor în înfășurări :

— pentru înfășurarea de joasă tensiune, conform relației (16.41)

$$q_j = \frac{P_{ej}}{cS_{wj}} = \frac{1438,4}{3 \cdot 0,61} = 786 \text{ W/m}^2, \quad (19.29)$$

unde :

$c = m = 3$ coloane ;

$$S_{wj} = 0,8 \cdot \pi (D_{ij} + 2D_{m2} + D_{ej}) H_{Bj} = 0,8 \cdot \pi (16,8 + 2 \cdot 19 + 21,1) \cdot 32 = 6104 \text{ cm}^2 \approx 0,61 \text{ m}^2, \quad (19.29, a)$$

în care (fig. 16.8) :

$0,8$ ține cont de reducerea suprafeței de răcire de către distanțori ;

$D_{ij} = D_c + 2a_{mj} = 16 + 2 \cdot 0,4 = 16,8$ cm este diametrul interior al înfășurării de joasă tensiune ;

$D_{ej} = D_{ij} + 2a_j = 16,8 + 2 \cdot 2,15 = 21,1$ cm este diametrul exterior al înfășurării de joasă tensiune ;

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune, conform relației (16.41, a)

$$q_t = \frac{P_{et}}{cS_{wt}} = \frac{1734,5}{3 \cdot 0,8772} = 659 \text{ W/m}^2, \quad (19.30)$$

unde :

$$S_{wt} = \pi [0,8(D_{it} + 2D'_{m1}) + D_{et}] H_{Bt} = \pi [0,8(22,7 + 2 \cdot 25,3) + 30] 31,5 = 8772 \text{ cm}^2 = 0,8772 \text{ m}^2, \quad (19.30, a)$$

în care (fig. 16.8) :

$D_{it} = D_{m1} - a_t = 26,35 - 3,65 = 22,7$ cm, este diametrul interior al înfășurării de înaltă tensiune ;

$$D'_{m1} = D_{it} + 2n'_s a' + a_{ta} = 22,7 + 2 \cdot 5 \cdot 0,21 + 0,5 = 25,3 \text{ cm},$$

este diametrul mediu al canalului de răcire, care se prevede spre interiorul grosimii înfășurării de înaltă tensiune la cca. $1/3$ din a_t , adică după $n'_s = 5$ straturi din cele 13 straturi câte are înfășurarea ;

$D_{et} = D_{m1} + a_t = 26,35 + 3,65 = 30$ cm, este diametrul exterior al înfășurării de înaltă tensiune ; această suprafață este spălată în întregime de uleiul de răcire.

Atît q_j cît și q_t se încadrează în limitele normale (v. paragraful 16.4.1).

— Pierderile electrice totale, sau pierderile la funcționarea în scurtcircuit la curenții nominali, conform relației (16.41, b)

$$P_{kN} = P_{ej} + P_{et} = 1438,4 + 1734,5 \approx 3173 \text{ W}, \quad (19.31)$$

valoare, care se încadrează în limitele admise conform STAS 1703/7-80, abaterea trebuind să fie de $+10\%$ din P_{kN} , impuse prin temă (v. tabelul 3.8).

OBSERVAȚIE. Înainte de determinarea maselor înfășurărilor, a pierderilor și curenților la funcționarea în gol, este recomandabil a se proceda la verificarea încadrării în limitele admisibile a tensiunii de scurtcircuit, adică a verifica dacă dimensiunile stabilite pînă acum sînt bune sau nu.

— Componenta activă a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (16.48)

$$u_{ka} = \frac{P_{kN}}{S_N} 100 = \frac{3173}{250 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,269\%. \quad (19.32)$$

— Componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (16.49)

$$u_{kr} = \frac{2\pi\mu_0 f w_s I_{Lm} \delta' k_a}{c_1 H_{Bj}} k_R 100 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1558 \cdot 8,33 \cdot 0,7335 \cdot 2,93 \cdot 1}{6,42 \cdot 32} \cdot 0,934 \cdot 100 = 5\%, \quad (19.32, a)$$

unde :

conform relației (16.49, a).

$$\delta' = a_{ji} + \frac{a_{ja} + a_{ia}}{4} + \frac{a_j + a_t}{3} = 0,8 + \frac{0,3 + 0,5}{4} + \frac{2,15 + 3,65}{3} = 2,93 \text{ cm} ;$$

conform relației (16.49, b)

$$l_m = \pi \left[D_c + 2a_{mj} + a_{ji} + \frac{a_t + a_{ia} + 3(a_j + a_{ja})}{2} \right] = \pi \left[16 + 2 \cdot 0,4 + 0,8 + \frac{3,65 + 0,5 + 3(2,15 + 0,3)}{2} \right] = 73,35 \text{ cm} = 0,7335 \text{ m} ;$$

$$k_R = 0,934 \text{ (v. rel. 19.27, b)} ;$$

conform relației (16.49, d)

$$k_a = 1 + \frac{x^2 H_B}{r \delta' k_R} = 1 + \frac{0,0156^2 \cdot 32}{3 \cdot 2,93 \cdot 0,934} \approx 1,$$

în care, conform figurii 16.40, c

$$x = \frac{H_x}{H_B} = \frac{0,5}{32} = 0,0156$$

cu

$$H_x = H_{Bj} - H_{Bt} = 32 - 31,5 = 0,5 \text{ cm} ;$$

$r = 3$.

— Tensiunea de scurtcircuit, conform relației (16.50, c)

$$u_k = \sqrt{u_{ka}^2 + u_{kr}^2} = \sqrt{1,269^2 + 5^2} = 5,15\%. \quad (19.33)$$

Deoarece valoarea obținută nu se încadrează în abaterile limită admise de STAS 1703/1 - 80, (v. tabelul 3.8) care sînt de $\pm 10\%$ din $u_{KN} = 6\%$ impus prin temă (valoarea calculată trebuie să fie cuprinsă între limitele $5,4 \div 6,6\%$) se vor schimba dimensiunile conductoarelor, astfel, încît ferestra transformatorului (deci și bobinele) să rezulte cu o înălțime mai mică și o lățime mai mare.

Se reiau deci din nou etapele de calcul, de la relațiile (19.15), toate considerațiile și explicațiile anterioare rămînd valabile.

— **Dimensiunile conductoarelor :**

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune se menține același conductor ca anterior (v. rel. 19.15)

Sîrmă O-1,8 \times 2,12 STAS 2873/1-86 (gros. izol. 0,3 mm) = 3,45 mm²;

$$a' \times b' = 2,1 \times 2,42 \text{ mm}^2; \quad (19.34)$$

— pentru înfășurarea de joasă tensiune (tot cu 4 fire în paralel)

Sîrmă O-4(4,75 \times 7,1 STAS 2873/1-86) (gros. izol. 0,36 mm) = 4 \cdot 32,9 = 131,6 mm²;

$$a' \times b' = 5,11 \times 7,46 \text{ mm}^2.$$

— **Valorile definitive ale densităților de curent :**

$$J_i = \frac{I_i}{s_{wi}} = \frac{8,33}{3,45} = 2,41 \text{ A/mm}^2; \quad (19.34, b)$$

$$J_j = \frac{I_j}{s_{wj}} = \frac{360,75}{131,6} = 2,74 \text{ A/mm}^2.$$

— **Tipul și dimensiunile înfășurărilor** se stabilesc identic ca și în varianta anterioară.

Înălțimea bobinei de joasă tensiune (v. rel. 19.20), va fi

$$H_{Bj} = (w_{sj} + 1)h_s k_e + n_i h_s = (18 + 1) \cdot 1,492 \cdot 1,01 = 28,63 \text{ cm} \approx 29 \text{ cm}, \quad (19.35)$$

unde noul h_s (v. rel. 19.19) este

$$h_s = 2b' = 2 \cdot 7,46 = 14,92 \text{ mm} = 1,492 \text{ cm}.$$

— **Înălțimea ferestrei**, pentru aceleași distanțe de izolație ca în relațiile (19.18, a), rezultă din relația (19.18)

$$L_c = H_B + 2s_{im} = 29 + 2 \cdot 2,5 = 34 \text{ cm}, \quad (19.35, a)$$

unde s-a' considerat $s_{jm} = s_{im} = 2,5$ cm, pentru a rezulta bobinele cu aceeași înălțime, deși se putea lua s_{jm} mai mic (v. rel. 19.20, a).

— **Numărul de spire pe un strat :**

— pentru înfășurarea de joasă tensiune, rămîne același număr dat de relația (19.19, a), adică

$$w_{sj} = 18 \text{ spire/strat}. \quad (19.36)$$

Pentru cele $w_j = 36$ spire, rezultă că bobina va avea tot două straturi cu un canal axial $a_{ja} = 3$ mm, între straturi;

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune (v. rel. 19.21)

$$w_{st} = \frac{H_B}{b'} - 1 = \frac{29}{0,242} - 1 = 118,83 \text{ spire/strat}.$$

Se stabilesc

$$w_{st} = 118 \text{ spire/strat}. \quad (19.36, a)$$

Numărul de straturi

$$n_{st} = \frac{w_{st}}{w_{st}} = \frac{1636}{118} = 13,86, \text{ straturi},$$

ceea ce înseamnă că înfășurarea de înaltă tensiune va avea

$$n_{st} = 14 \text{ straturi}, \quad (19.36, b)$$

din care 13 straturi cu 118 spire și ultimul strat cu 102 spire.

Tensiunea între straturi (v. rel. 19.22) rezultă

$$U_s = 2w_{st}e_1 = 2 \cdot 118 \cdot 6,42 \approx 1515 \text{ V}, \quad (19.36, c)$$

rezultînd aceeași grosime a izolației dintre straturi, $\delta_s = 0,36$ mm cu cea din relația (19.22, a) și aceeași depășire a capetelor bobinei cu 1,6 mm în fiecare parte.

— **Grosimea înfășurărilor** rezultă :

— pentru înfășurarea de joasă tensiune (v. rel. 19.23)

$$a_j = n_{sj}a_s + n_a a_{ja} + (n_s - n_a - 1)\delta_{iz} = 2 \cdot 10,22 + 1 \cdot 3 + (2 - 1 - 1)\delta_{iz} = 23,44 \text{ mm} \approx 2,35 \text{ cm}, \quad (19.37)$$

unde :

$a_s = 2a' = 2 \cdot 5,11 = 10,22$ mm, este noua grosime a stratului;

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune (v. rel. 19.23, a)

$$a_i = n_{si}a' + a_{ia} + (n_{st} - 2)\delta_s =$$

$$= 14 \cdot 2,1 + 5 + (14 - 2) \cdot 0,36 = 38,72 \text{ mm} \approx 3,9 \text{ cm}. \quad (19.37, a)$$

— **Lățimea ferestrei transformatorului** (v. rel. 19.24)

$$T = 2(a_{mj} + a_j + a_{ji} + a_i) + a_{ii} =$$

$$= 2(0,4 + 2,35 + 0,8 + 3,9) + 0,8 = 15,7 \text{ cm} \approx 16 \text{ cm}, \quad (19.38)$$

adică valoarea care fusese estimată cu relația (19.9, a).

D. Recalcularea pierderilor în înfășurări și în fier

și a curentului de funcționare în gol

— **Rezistențele înfășurărilor pe fază :**

— pentru înfășurarea de joasă tensiune (v. rel. 19.25)

$$R_j = \rho_{Cu75^\circ} \frac{w_j l_{meaj}}{s_{wj}} = 0,022 \frac{36 \cdot 0,601}{131,6} = 3,61 \cdot 10^{-3} \Omega, \quad (10.39)$$

unde :

$$l_{meaj} = \pi D_{m2} = \pi \cdot 19,15 = 60,1 \text{ cm} = 0,601 \text{ m},$$

cu

$$D_{m2} = D_c + 2a_{mj} + a_j = 16 + 2 \cdot 0,4 + 2,35 = 19,15 \text{ cm};$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune (v. rel. 19.26)

$$R_i = \rho_{Cu} \frac{w_i l_{mea i}}{s_{wt}} = 0,022 \frac{1558 \cdot 0,848}{3,45} = 8,42 \text{ } \Omega, \quad (10.39, a)$$

unde:

$$l_{mea i} = \pi D_{m1} = \pi \cdot 27 = 84,8 \text{ cm} = 0,848 \text{ m},$$

cu

$$D_{m1} = D_c + 2(a_{m1} + a_j + a_{ji}) + a_i = 16 + 2(0,4 + 2,35 + 0,8) + 3,9 = 27 \text{ cm}.$$

— Pierderile în înfășurări:

— în înfășurarea de joasă tensiune (v. rel. 19.27)

$$P_{e1j} = mk_{rj} R_j I_j^2 = 3 \cdot 1,047 \cdot 3,61 \cdot 10^{-3} \cdot 360,75^2 = 1475,6 \text{ W} \quad (19.40)$$

unde, pe baza relațiilor (19.27, a și b):

$$k_{rj} = 1 + 1,73 \alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (m_s^2 - 0,2) = 1 + 1,73 \cdot 0,812^2 \left(\frac{50}{0,022 \cdot 10^4} \right)^2 \cdot 0,475^4 (4^2 - 0,2) = 1,047 \quad (19.40, a)$$

și în care:

$$a = 0,475 \text{ cm}; \quad b = 0,71 \text{ cm};$$

$$k_R = 1 - \frac{a_j + a_i + a_{ji}}{\pi H_B} = 1 - \frac{2,35 + 3,9 + 0,8}{\pi \cdot 29} = 0,922; \quad (19.40, b)$$

$$\alpha_p = k_R \frac{bn}{H_B} = 0,922 \cdot \frac{0,71 \cdot 36}{29} = 0,812;$$

— în înfășurarea de înaltă tensiune (v. rel. 19.28)

$$P_{e1i} = mk_{ri} R_i I_i^2 = 3 \cdot 1,01 \cdot 8,42 \cdot 8,33^2 = 1770,3 \text{ W}, \quad (19.41)$$

unde, pe baza relațiilor (19.28, a și b):

$$k_{ri} = 1 + 1,73 \alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (m_s^2 - 0,2) = 1 + 1,73 \cdot 0,795^2 \left(\frac{50}{0,022 \cdot 10^4} \right)^2 \cdot 0,18^4 (14^2 - 0,2) \approx 1,01,$$

în care:

$$a = 0,18 \text{ cm}; \quad b = 0,212 \text{ cm};$$

$$n = w_{st} = 118 \text{ conductoare/înălțimea bobinei};$$

$$\alpha_p = k_R \frac{bn}{H_B} = 0,922 \frac{0,212 \cdot 118}{29} = 0,795;$$

$$m_s = n_{st} = 14 \text{ conductoare pe grosimea bobinei}.$$

— Pierderile electrice totale sau pierderile la funcționarea în scurt-circuit la curenții nominali (v. rel. 19.31)

$$Pk_N = P_{e1j} + P_{e1i} = 1475,6 + 1770,3 \approx 3246 \text{ W}, \quad (19.42)$$

valoarea care se încadrează în limitele admise de STAS 1703/7-80 (v. tabelul 3.8).

— Densitățile de suprafață ale pierderilor din înfășurări:

— pentru înfășurarea de joasă tensiune (v. rel. 19.29)

$$q_j = \frac{P_{e1j}}{cS_{wj}} = \frac{1475,6}{3 \cdot 0,5583} = 881 \text{ W/m}^2, \quad (19.43)$$

unde (v. rel. 19.29, a)

$$S_{wj} = 0,8 \cdot \pi (D_{1j} + 2D_{m2} + D_{e1}) H_B = 0,8 \cdot \pi (16,8 + 2 \cdot 19,15 + 21,5) \cdot 29 = 5583 \text{ cm}^2 = 0,5583 \text{ m}^2, \quad (19.43, a)$$

cu

$$D_{e1} = D_{1j} + 2a_j = 16,8 + 2 \cdot 2,35 = 21,5 \text{ cm};$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune (v. rel. 19.30).

$$q_i = \frac{P_{e1i}}{cS_{wi}} = \frac{1770,3}{3 \cdot 0,8245} = 715 \text{ W/m}^2, \quad (19.44)$$

unde (v. rel. 19.30, a):

$$S_{wi} = \pi [0,8 (D_{1i} + 2D'_{m1}) + D_{e1}] H_B = \pi [0,8 (23,1 + 2 \cdot 25,7) + 30,9] \cdot 29 = 8245 \text{ cm}^2 = 0,8245 \text{ m}^2,$$

în care:

$$D_{1i} = D_{m1} - a_i = 27 - 3,9 = 23,1 \text{ cm};$$

$$D'_{m1} = D_{1i} + 2n'_j a' + a_{in} = 23,1 + 2 \cdot 5 \cdot 0,21 + 0,5 = 25,7 \text{ cm},$$

considerînd, ca și anterior, canalul de răcire la cca. 1/3 din a_i (spre interior), adică după $n'_s = 5$ straturi din cele 14 straturi câte are înfășurarea de înaltă tensiune;

$$D_{e1} = D_{m1} + a_i = 27 + 3,9 = 30,9 \text{ cm}.$$

Cum se observă, atât q_j cât și q_i se încadrează în limitele normale indicate la paragraful 16.4.1 (v. relațiile 16.41 și 16.41, a).

— Masele conductoarelor înfășurărilor se determină cu relația (16.42):

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$G_{wj} = \gamma_{Cu} S_{wj} w_j l_{mea j} = 8,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1,316 \cdot 36 \cdot 60,1 = 25,4 \text{ kg};$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$G_{wi} = \gamma_{Cu} S_{wi} w_i l_{mea i} = 8,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0345 \cdot 1636 \cdot 84,8 = 42,6 \text{ kg}. \quad (19.45, a)$$

— Dimensiunile definitive ale miezului feromagnetic sînt deci (v. fig. 16.2):

$D_c = 16 \text{ cm}$ (v. rel. 19.6), cu dimensiunile treptelor conform figurii 19.1, pentru care au rezultat:

$$S_c = 173 \text{ cm}^2 \text{ (v. rel. 19.7);}$$

$$S_j = 183 \text{ cm}^2 \text{ (v. rel. 19.8);}$$

$$L_c = 34 \text{ cm} \text{ (v. rel. 19.35, a);}$$

$$T = 16 \text{ cm} \text{ (v. rel. 19.38);}$$

$$M = T + D_c = 16 + 16 = 32 \text{ cm};$$

$$L_j = 2M + 0,9D_c = 78,4 \text{ cm} \text{ (v. rel. 19.9, b)}.$$

— Masa netă a fierului, conform relațiilor (16.43, b):

— pentru coloane

$$G_{Fe c} = 3 S_c L_c \gamma_{Fe} = 3 \cdot 173 \cdot 34 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 135 \text{ kg}; \quad (19.46)$$

— pentru juguri

$$G_{Fe j} = 2 S_j L_j \gamma_{Fe} = 2 \cdot 183 \cdot 78,4 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 219 \text{ kg}. \quad (19.46, a)$$

— Pierderile în fier, care reprezintă și pierderile la funcționarea în gol, conform relației (16.44) — a se vedea și relația (19.10)

$$P_0 \approx P_{Fe} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (B_c^2 G_{Fe c} + B_j^2 G_{Fe j}) = \\ = 1,07 \cdot 0,45 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} (1,676^2 \cdot 135 + 1,584^2 \cdot 219) = 447 \text{ W}. \quad (19.47)$$

Dacă pentru k_p se folosește valoarea din practica de fabricație a transformatoarelor (v. observația de la relația 16.44), atunci (considerind $k_p = 1,25$) rezultă

$$P_0 = 447 \frac{1,25}{1,07} \approx 522 \text{ W}, \quad (19.47, a)$$

valoare care se încadrează în toleranțele impuse de STAS 1703/1-80 (v. tabelul 3.8).

— Componenta activă a curentului de funcționare în gol, conform relației (16.45)

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{m U_{1f}} = \frac{522}{3 \cdot 10 \cdot 000} = 0,0174 \text{ A}. \quad (19.48)$$

— Componenta reactivă a curentului de funcționare în gol, conform relației (16.46, b)

$$I_{0r} = I_{\mu} = \frac{H_c L_c + H_j L_j + n_8 \frac{B_i}{\mu_0} \delta_i}{\sqrt{2} w_t} = \\ = \frac{2,5 \cdot 34 + 1 \cdot 78,4 + 2 \frac{1,18}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,025 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 558} = 0,096 \text{ A}, \quad (19.48, a)$$

în care $\eta_8 = 2$, iar din anexa 4 rezultă:

— pentru $B_c = 1,676 \text{ T} \Rightarrow H_c = 2,5 \text{ A/cm}$;

— pentru $B_j = 1,584 \text{ T} \Rightarrow H_j = 1 \text{ A/cm}$;

— pentru unghiul de îmbinare dintre tolele coloanelor și jugurilor $\alpha = 45^\circ$ rezultă:

$$\delta_i \approx 0,025 \cdot 10^{-3} \text{ m};$$

$$B_i = B_c \cos \alpha = 1,676 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 1,18 \text{ T}.$$

— Curentul (total), la funcționarea în gol a transformatorului (valoare eficace), conform relației (16.47)

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,0174^2 + 0,096^2} = 0,0975 \text{ A} \quad (19.48, b)$$

sau în %, conform relației (16.47, a)

$$I_{10} [\%] = \frac{I_{10}}{I_t} 100 = \frac{0,0975}{8,33} 100 \approx 1,17 \%. \quad (19.48, c)$$

E. Tensiunea de scurtcircuit

— Componenta activă a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (16.48) — v. și relația (19.32)

$$u_{ka} = \frac{P_{kN}}{S_N} 100 = \frac{3 \cdot 246}{250 \cdot 10^3} 100 = 1,298 \%. \quad (19.49)$$

— Componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (16.49) — v. și relația (19.32, a)

$$u_{kr} = \frac{2 \pi \mu_0 f w_t I_1 I_m \delta^2 k_a}{e_t H_L} k_R 100 = \\ = \frac{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1 \cdot 558 \cdot 8,33 \cdot 0,747 \cdot 3,08 \cdot 1}{6,42 \cdot 29} 0,922 \cdot 100 = 5,83 \%, \quad (19.49, a)$$

unde:

— conform relației (16.49, a)

$$\delta' = a_{jt} + \frac{a_{ja} + a_{ta}}{4} + \frac{a_j + a_t}{3} = 0,8 + \frac{0,3 + 0,5}{4} + \frac{2,35 + 3,9}{3} = 3,08 \text{ cm};$$

— conform relației (16.49, b)

$$l_m = \pi \left[D_c + 2a_{mj} + a_{jt} + \frac{a_t + a_{ta} + 3(a_j + a_{ja})}{2} \right] = \\ = \pi \left[16 + 2 \cdot 0,4 + 0,8 + \frac{3,9 + 0,5 + 3(2,35 + 0,3)}{2} \right] = 74,7 \text{ cm} = 0,747 \text{ m};$$

$$k_R = 0,922 \text{ (v. rel. 19.40, b)};$$

$k_a \approx 1$, deoarece înălțimile bobinelor de joasă și înaltă tensiune sînt aproximativ egale.

— Tensiunea de scurtcircuit, conform relației (16.50, c) — v. și relația (19.33)

$$u_k = \sqrt{u_{ka}^2 + u_{kr}^2} = \sqrt{1,298^2 + 5,83^2} = 5,97 \% \quad (19.49, b)$$

valoare, care se încadrează în abaterile admise de STAS 1703/1-80 (v. tabelul 3.8), care sînt de $\pm 10\%$ din u_{kN} .

Rezultă deci că pentru noile dimensiuni ale conductorului înfășurării de joasă tensiune, pentru care au rezultat și alte dimensiuni ale înfășurărilor și ferestrei transformatorului, tensiunea de scurtcircuit s-a încadrat în limitele admise. Aceste dimensiuni se consideră deci ca fiind definitive, bineînțeles dacă ele vor corespunde și la verificările mecanice și termice.

În figura 19.2 este reprezentată, la scară, secțiunea transversală prin înfășurările transformatorului, din exemplul considerat, din care reese atît modul concret de realizare a izolațiilor pentru distanțele prevăzute, cît și forma constructivă cu dimensiunile reale ale înfășurărilor.

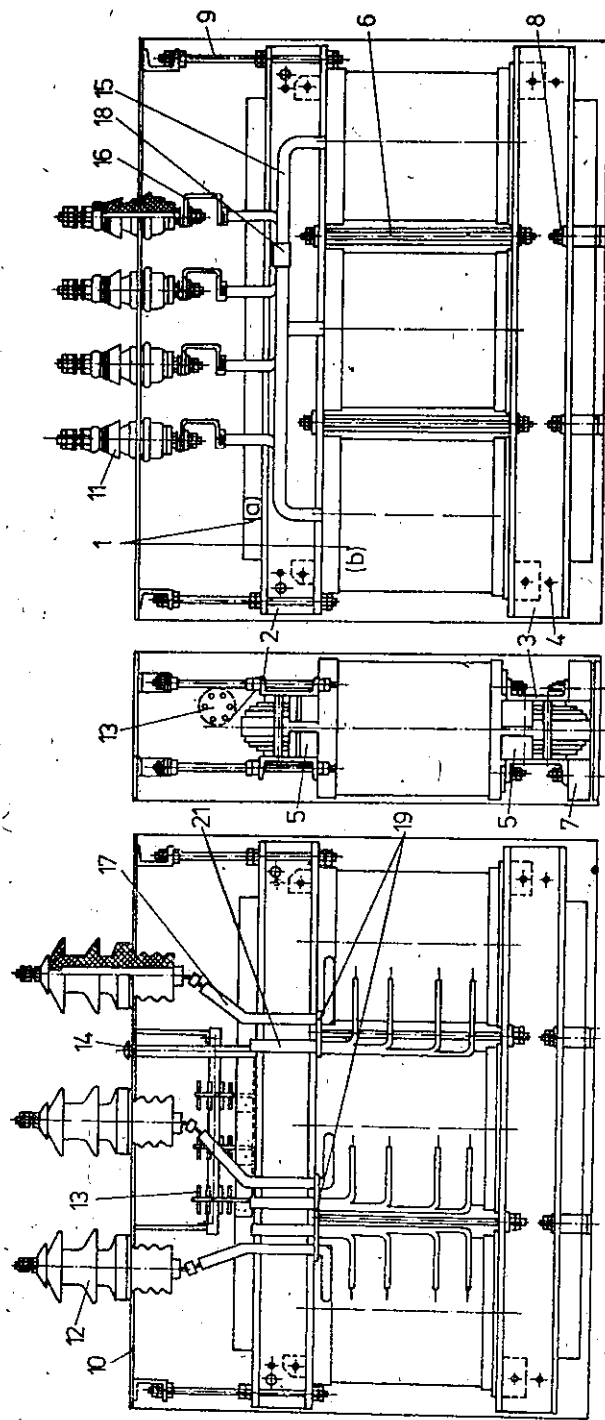


Fig. 19.4. Ansamblu miez feromagnetic bobinat, cu capacul cuvei și izolatoarele de trecere ale transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV: 1 — ansamblu miez feromagnetic bobinat (a — miez; b — înfășurări); 2 — consolă de presare, jug superior; 3 — consolă de presare jug inferior; 4 — buloane de strângere a consolelor; 5 — piese izolante pentru presare bobine; 6 — tiranți; 7 — tăpi izolante susținere; 8 — șuruburi cu piulițe pentru fixare tăpi; 9 — tiranți suspenși capac cuvd; 10 — capac cuvd; 11 — izolatoare j.t.; 12 — izolatoare t.t.; 13 — comutator de reglaj; 14 — dispozitiv acționare comutator; 15 — conexiuni j.t.; 16 — legături flexibile j.t.; 17 — conexiuni t.t.; 18 — mufe fixare legături j.t.; 19 — plăci de conexiuni t.t.

În cazul transformatoarelor la care tensiunile nominale ale înfășurărilor sînt egale sau mai mari ca 20 kV, atunci pentru creșterea rigidității dielectrice a distanțelor de izolație indicate în tabelul 16.3, se prevăd la acea înfășurare (sau la ambele înfășurări dacă ambele tensiuni ≥ 20 kV), măsuri constructive suplimentare.

Astfel, în figura 19.3, sînt prevăzuți la înfășurarea de înaltă tensiune, care are $U_{iN} = 30$ kV, atît *cilindrul izolant moale* (poz. 7) cu grosimea de 2 mm, realizat din mai multe straturi de hirtie de 0,06 mm răsfrînt parțial peste partea frontală a înfășurării, cît și *șaiiba electroizolantă răsfrîntă* (poz. 8) cu grosimea de 2 mm răsfrîntă pe toată partea frontală a înfășurării și confecționată separat din carton electrotehnic.

Se observă, de asemenea, că pentru o mai rațională utilizare a izolației conductorului, înfășurarea de înaltă tensiune care este de tip stratificată, este secționată în 2 găleți (notați cu secțiunea I și a II-a) și de înălțimea H_s fiecare, cît și faptul că distanțele de izolare față de juguri sînt diferite ($s_{jm} = 2,25$ cm și $s_{im} = 4,8$ cm), ceea ce a condus și la înălțimi diferite ale celor două înfășurări ($H_{Bj} > H_{Bi}$).

Acest lucru prezintă unele dezavantaje sub aspectul solicitărilor la forțele electrodinamice axiale, compensate însă de avantajul important al unei mai bune umpleri a ferestrei și deci la dimensiuni mai mici ale transformatorului.

În figura 19.4 este reprezentat ansamblul miez bobinat al transformatorului cu schela metalică, capacul cuvei și izolatoarele de j.t. și t.t., montate pe capac. Sînt evidențiate, de asemenea, conexiunile între înfășurări, la comutatorul de reglaj al tensiunii și la izolatoare, atît pe partea de înaltă tensiune cît și pe cea de joasă tensiune.

În figura 19.5 este reprezentat ansamblul general al transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV, cu secțiune longitudinală și transversală.

F. Caracteristicile de funcționare

Caracteristicile externe se determină cu relația (16.51, a) în condițiile menționate de relația (16.51), iar *caracteristica randamentului* cu relația (16.52), pentru diferite valori ale lui $\beta = I_2/I_{2N}$ și pentru $U_1 = \text{constant}$ și $\cos \varphi_2 = \text{constant}$. Rezultatele calculului sînt trecute în tabelul 19.1 cu aju-

Tabelul 19.1

Caracteristicile de funcționare ale transformatorului de 250 kVA; 10/0,4 kV

$\beta = I_2/I_{2N}$		0	0,05	0,15	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
$\frac{U_2}{U_{20}}$	$\cos \varphi_2 = 1$	1			0,996	0,993	0,99	0,986	0,983
	$\cos \varphi_2 = 0,7 \text{ ind}$	1			0,987	0,974	0,961	0,949	0,936
	$\cos \varphi_2 = 0,7 \text{ cap}$	1			1,008	1,016	1,024	1,032	1,04
η	$\cos \varphi_2 = 1$	0	0,959	0,984	0,988	0,989	0,987	0,985	0,982
	$\cos \varphi_2 = 0,7$	0	0,942	0,977	0,983	0,984	0,982	0,970	0,975

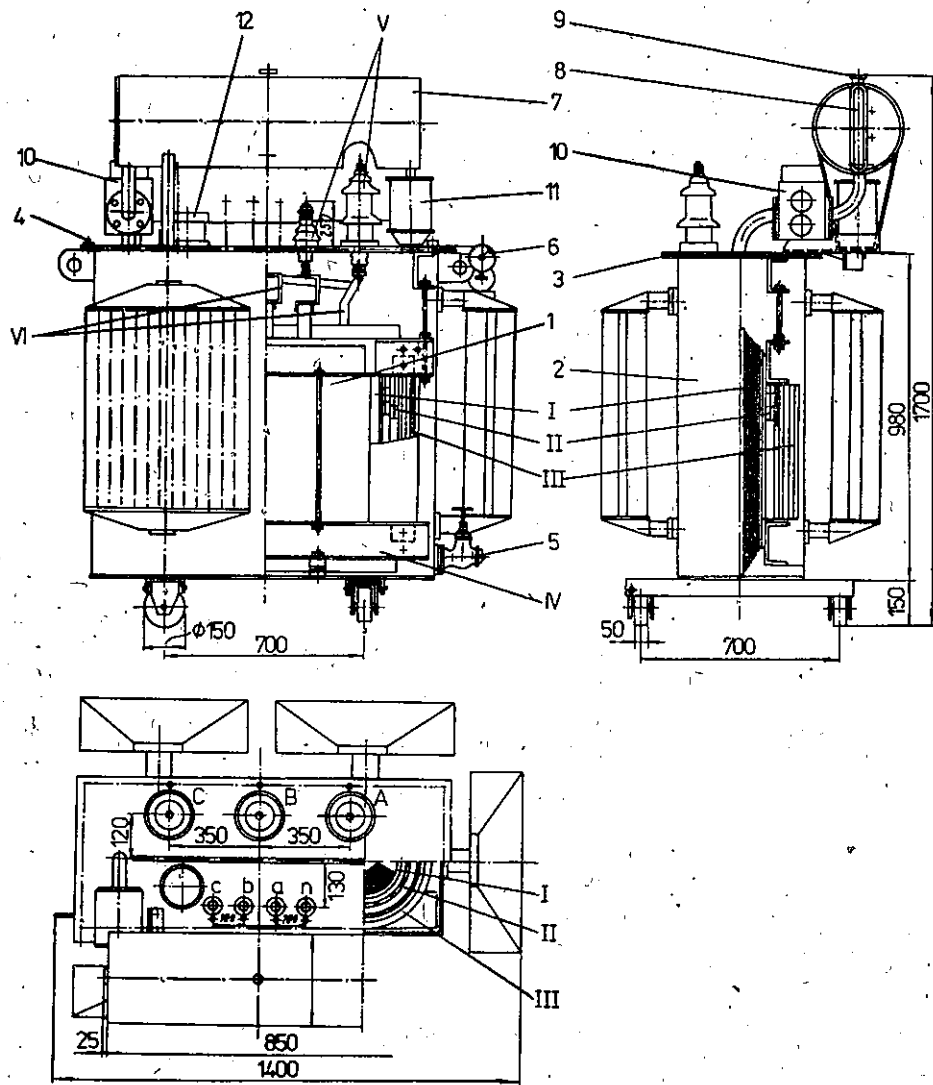


Fig. 19.5. Ansamblu general al transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV :

1 — ansamblu parte decuvabilă; I — miez feromagnetic; II — înfășurare de j.t.; III — înfășurare de î.t.; IV — ansamblu șelă, metalică; V — izolatoare; VI — conexiuni; 2 — cuvă cu radiatoare; 3 — garnitură capac; 4 — șurub fixare capac cuvă; 5 — robinet de golire; 6 — termometru cu cadran; 7 — conservator; 8 — nivelă de ulei; 9 — bușon de umplere cu ulei; 10 — releu de gaze (Buchholz); 11 — filtru de aer cu silicagel; 12 — supapă de siguranță.

torul cărora s-au trasat caracteristicile de funcționare reprezentate în figura 19.6. În expresia randamentului s-a luat pentru P_0 , valoarea dată de relația (19.47, a). Din această expresie, se observă că atât pentru $\cos \varphi_2$ inductiv, cât și capacitiv, caracteristica randamentului este aceeași, depinzând doar de valoarea lui $\cos \varphi_2$, nu și de caracterul sarcinii (inductiv sau capacitiv).

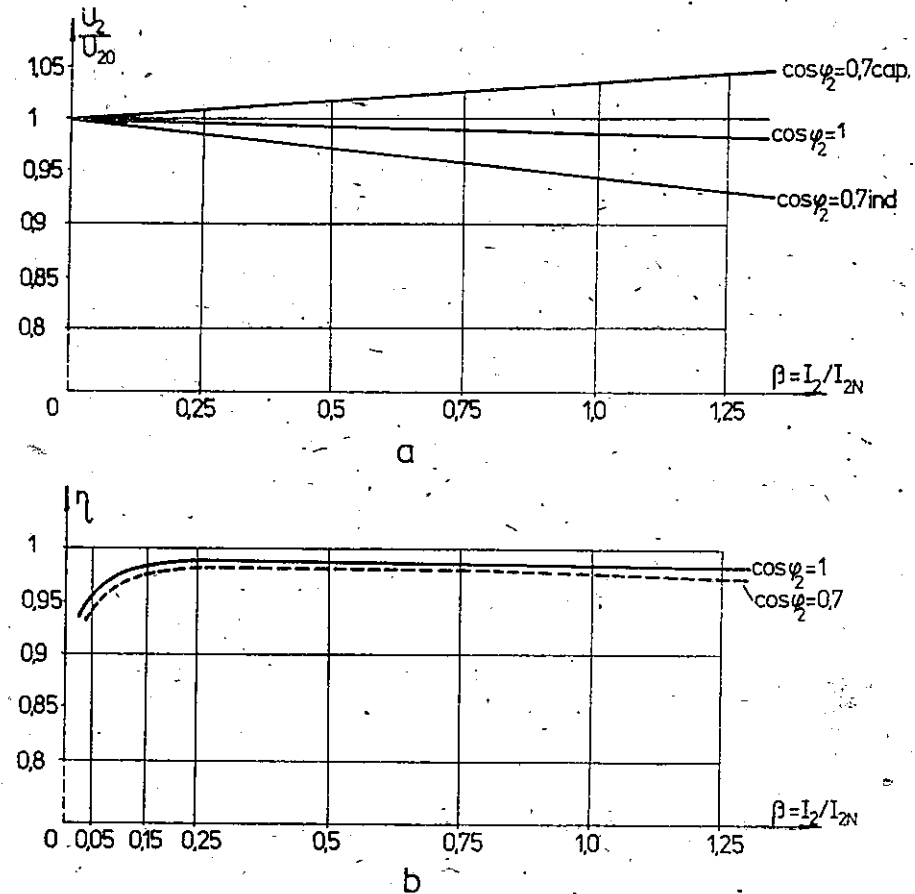


Fig. 19.6. Caracteristicile de funcționare ale transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV :
a — caracteristicile externe; b — caracteristicile randamentului.

G. Verificarea solicitărilor mecanice

I. Verificarea înfășurărilor la acțiunea forțelor electrodinamice

Deoarece cele două înfășurări de j.t. și î.t. au aceleași înălțimi ($H_{B1} \approx H_{B2}$), iar spirele de reglaj al tensiunii sînt repartizate pe întreaga înălțime a înfășurării de î.t. (gama de reglaj de $\pm 5\%$, cuprinde un număr de $2 \cdot 78 = 156$ spire, care corespund ultimului strat de 102 spire și încă 54 spire din penultimul strat), rezultă că în funcționarea transformatorului nu apar nesimetrii axiale importante ale solenațiilor, care să conducă la forțe electrodinamice axiale periculoase.

De aceea înfășurările se vor verifica numai la acțiunea forțelor electrodinamice radiale. Se face de asemenea și o verificare la acțiunea forței interioare F_0 (fig. 17.2, a).

— Curentul de șoc, conform relației (17.1)

$$I_{km} = k_A \frac{100\sqrt{2}I_{St}}{\psi_k} = 1,7 \cdot \frac{100 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,33}{5,97} = 335,5 \text{ A.} \quad (19.50)$$

— Forța radială, conform relației (17.2)

$$F_r = \mu_0 \frac{(w_l I_{km})^2 l_{medi} k_n}{2 H_B} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(1 \cdot 558 \cdot 335,5)^2 \cdot 0,848 \cdot 0,922}{2 \cdot 0,29} = 463 \cdot 10^3 \text{ N.} \quad (19.51)$$

— Forța interioară, care acționează în direcția axială asupra fiecărei înfășurări, conform relației (17.2; b).

$$F_0 = \frac{\delta'}{2H_B} F_r = \frac{3,08}{2 \cdot 29} 463 \cdot 10^3 \approx 25 \cdot 10^3 \text{ N.} \quad (19.51, a)$$

Efortul unitar la întindere în înfășurarea exterioară (i.t.), conform relației (17.4)

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2\pi w_l s_{tot}} = \frac{463 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 558 \cdot 3,45} = 13,7 \text{ MPa,} \quad (19.52)$$

valoare care este mai mică decât limitele admisibile ($\sigma_{adm} = 30-60 \text{ MPa}$ — pentru înfășurare din cupru).

— Eforturile unitare de compresiune dintre conductoarele înfășurărilor (datorită forței interioare F_0), conform relației (17.7):

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$\sigma_{aj} = \frac{F_0}{l_{medi} a'_j} = \frac{25 \cdot 10^3}{601 \cdot 20,5} = 2,03 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 20 \text{ MPa,} \quad (19.53)$$

unde:

$a'_j = a_j - a_{ja} = 23,5 - 3 = 20,5 \text{ mm}$, este grosimea netă a înfășurării de j.t.;

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune:

$$\sigma_{ai} = \frac{F_0}{l_{medi} a'_i} = \frac{25 \cdot 10^3}{848 \cdot 34} = 0,867 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 20 \text{ MPa,} \quad (19.53, a)$$

unde:

$a'_i = a_i - a_{ia} = 39 - 5 = 34 \text{ mm}$, este grosimea netă a înfășurării de i.t.

Pentru ca înfășurarea interioară (de joasă tensiune) să fie supusă la solicitarea de compresiune pură, se verifică mai întâi condițiile impuse de relația (17.5). Astfel, numărul minim de distanțoare cu care trebuie consolidată înfășurarea de j.t. pe coloană este

$$Z_{pmin} = 2 \sqrt{1 + \frac{1,75 F_r (D_{jm})^2}{E w_l s_{rj} (2a)}} = 2 \sqrt{1 + \frac{1,75 \cdot 463 \cdot 10^3}{1,15 \cdot 10^5 \cdot 36 \cdot 131,6} \left(\frac{191,5}{2 \cdot 4,75}\right)^2} = 2,53 \text{ distanțoare.}$$

În realitate însă, deoarece diferența dintre diametrul coloanei D_c și diametrul interior al cilindrului izolat interior (poziția 1, fig. 19.2) este doar de 1 mm, rezultă că înfășurarea de j.t. se sprijină (prin intermediul cilindrului izolat) pe fiecare muchie a treptelor miezului feromagnetic al coloanei, ceea ce este echivalent cu un număr de pene de consolidare $Z_p \gg Z_{pmin}$.

Aceasta înseamnă că înfășurarea de j.t. este supusă numai la solicitarea de comprimare pură.

— Efortul unitar la comprimare se determină tot cu relația (17.4) în care se introduc mărimile corespunzătoare înfășurării de j.t., adică

$$\sigma_c = \frac{F_r}{2\pi w_l s_{rj}} = \frac{463 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 36 \cdot 131,6} = 15,5 \text{ MPa,} \quad (19.53, b)$$

valoare care se încadrează în limitele admisibile ($\sigma_{c adm} = \sigma_{adm} = 30-60 \text{ MPa}$, pentru înfășurare din cupru).

2. Calculul mecanic al schelei metalice

a) Consolele de presare a jugurilor se execută din profil U10 (STAS 564-80), cu dimensiunile indicate în figura 19.7, pentru care modulele de rezistență la încovoiere se pot lua din STAS 564-80 sau se pot calcula cu relațiile [15]:

— după axa $x-x$

$$W_x = \frac{1}{6H} (BH^3 - bh^3) \text{ [mm}^3\text{]}; \quad (19.54)$$

— după axa $y-y$

$$W_y = \frac{1}{3e_2} (He_2^3 - ha^3 + 2he_2^3) \text{ [mm}^3\text{]}, \quad (19.54, a)$$

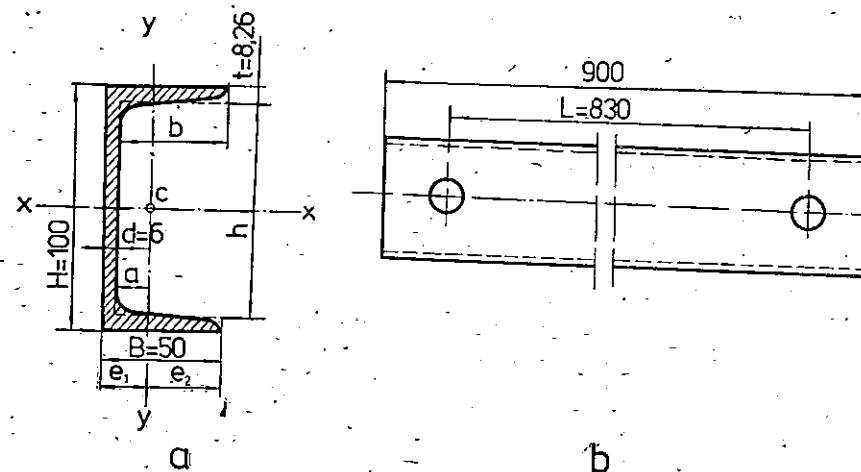


Fig. 19.7. Dimensiunile consolelor de presare a jugurilor: a — profilul; b — lungimea.

unde, poziția centrului de masă C (fig. 19.7) se determină cu relațiile :

$$\begin{aligned} e_1 &= 0,5 \frac{2B^2 + ht}{2B + h} \text{ [mm]}; \\ a &= e_1 - d \text{ [mm]}; \\ e_2 &= B - e_1 \text{ [mm]}. \end{aligned} \quad (19.54, b)$$

Pentru profilul U10 stabilit, rezultă :

$$W_x = \frac{1}{6H} (BH^3 - bh^3) = \frac{1}{6 \cdot 100} (50 \cdot 100^3 - 44 \cdot 83,5^3) = 4,06 \cdot 10^4 \text{ mm}^3, \quad (19.55)$$

unde :

$$\begin{aligned} b &= B - d = 50 - 6 = 44 \text{ mm}; \\ h &= H - 2t = 100 - 2 \cdot 8,26 \approx 83,5 \text{ mm}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_y &= \frac{1}{3e_2} (He_1^3 - ha^3 + 2te_2^3) = \\ &= \frac{1}{3 \cdot 34,5} (100 \cdot 15,5^3 - 83,5 \cdot 9,5^3 + 2 \cdot 8,26 \cdot 34,5^3) = 0,946 \cdot 10^4 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (19.55, a)$$

unde :

$$\begin{aligned} e_1 &= 0,5 \frac{2B^2 + ht}{2B + h} = 0,5 \frac{2 \cdot 50^2 + 83,5 \cdot 8,26}{2 \cdot 50 + 83,5} = 15,5 \text{ mm}; \\ a &= e_1 - d = 15,5 - 6 = 9,5 \text{ mm}; \\ e_2 &= B - e_1 = 50 - 15,5 = 34,5 \text{ mm}. \end{aligned}$$

— **Momentul încovoietor**, corespunzător forței de presare a jugurilor, conform relației (17.9, a)

$$M_y = \frac{F_s L}{32} = \frac{3,21 \cdot 10^4 \cdot 830}{32} = 83,2 \cdot 10^4 \text{ Nmm}, \quad (19.56)$$

în care :

$$F_s = p_s h_j L = 0,25 \cdot 155 \cdot 830 = 3,21 \cdot 10^4 \text{ N},$$

unde :

$p_s = 0,25 \text{ MPa}$, deoarece strângerea jugului se face cu cîte două buloane marginale, neizolate care nu trec prin tolele jugului ;

$$h_j = 155 \text{ mm} \quad (h_j = a_1 \text{ din rel. 19.8});$$

$$L = 830 \text{ mm} \text{ (fig. 19.7, b)}.$$

— **Efortul unitar** la încovoiere datorită presării jugului, conform relației (17.11)

$$\sigma_y = \frac{M_y}{W_y} = \frac{83,2 \cdot 10^4}{0,946 \cdot 10^4} = 87,9 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}. \quad (19.56, a)$$

— **Efortul unitar la încovoiere** după axa $x-x$, datorită forțelor electrodinamice de presare axială, conform relației (17.11, a)

$$\sigma_x = \frac{F_0 L}{12 W_x} = \frac{25 \cdot 10^3 \cdot 830}{12 \cdot 4,06 \cdot 10^4} = 42,6 \text{ MPa} < 200 \text{ MPa}. \quad (19.56, b)$$

b) **Buloanele de strângere** a consolelor de presare, se execută din oțel rotund de $\varnothing 20 \text{ mm}$, filetate la capete cu M 20.

— **Efortul unitar în bulon**, datorită forței de presare și greutateii părții decuvabile, conform relației (17.12, a)

$$\begin{aligned} \sigma &= 0,187 \frac{F_s}{S_b} + 2,5 \frac{Gx}{d^3} = 0,187 \frac{3,21 \cdot 10^4}{220,3} + \\ &+ 2,5 \frac{5 \cdot 000 \cdot 3}{20^3} = 31,9 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}, \end{aligned} \quad (19.57)$$

unde :

$$S_b = \frac{\pi \cdot 16,75^2}{4} = 220,3 \text{ mm}^2 \text{ (pentru M20, diametrul minim la baza filetelui este de 16,75 mm);}$$

$$x = 3 \text{ mm};$$

$$\begin{aligned} G &= (G_{schelă} + G_{miez} + G_w)g = (G_{schelă} + G_{rec} + G_{rej} + G_{wf} + \\ &+ G_{wi})g = (40 + 135 + 219 + 25,4 + 42,6) \cdot 9,81 = 4 \cdot 532 \text{ N}. \end{aligned}$$

Ținînd cont și de alte elemente asamblate pe partea decuvabilă, se consideră că greutatea totală este

$$G \approx 1,1 \cdot 4 \cdot 532 \text{ N} \approx 5 \cdot 000 \text{ N}.$$

— Verificarea buloanelor la forța axială de scurtcircuit (de presare a înfășurărilor F_0), conform relației (17.13, a)

$$\sigma = \frac{4,6 F_0 x}{d^3} = \frac{4,6 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 3}{20^3} = 43,1 \text{ MPa} < 200 \text{ MPa}. \quad (19.57, a)$$

Verificarea la strivire a izolației bulonului nu se face, deoarece buloanele de strângere sînt în afara miezului și nu este nevoie să fie izolate.

H. Calculul termic al transformatorului

1. Căderea de temperatură dintre înfășurare și ulei

a) *La înfășurarea de joasă tensiune*, de tip cilindric, temperatura medie a bobinei se poate considera egală cu cea maximă, și deci

$$\theta_1 = \theta_2 = 0.$$

Căderea de temperatură în izolația conductoarelor, în baza relației 18.2) este (v. și fig. 18.1)

$$\theta_3 = q_j \frac{\delta}{\lambda_{iz}} \cdot 10^{-4} = 881 \cdot \frac{0,018}{0,0014} \cdot 10^{-4} \approx 1,13^\circ\text{C}, \quad (19.58)$$

unde:

$\delta = 0,018$ cm, este grosimea unilaterală a izolației de hirtie a conductorului de j.t. (pe o parte);

$\lambda_{iz} = 0,0014$ W/cm°C, din tabelul 18.2, pentru hirtie impregnată în ulei.

b) La înfășurarea de înaltă tensiune, de tip stratificat, $\theta_1 \neq \theta_2$ și, pentru partea bobinei exterioară a canalului axial, mai groasă, căderea maximă de temperatură, conform relației (18.4) este (v. fig. 18.1)

$$\theta_1 = \frac{pa_1^2}{8\lambda_m} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \cdot 2,17^2}{8 \cdot 5,06 \cdot 10^{-3}} = 9,3^\circ\text{C}, \quad (19.58, a)$$

în care:

— pe baza relației (18.5, a)

$$p = k_p \frac{J^2 ab}{(a' + \delta_s) b'} \cdot 10^{-3} = 2,14 \frac{1,41^2 \cdot 0,18 \cdot 0,212}{(0,21 + 0,036) \cdot 0,242} \cdot 10^{-3} \approx 8 \cdot 10^{-2} \text{ W/cm}^3;$$

— pe baza relației (18.6, a)

$$\lambda_m \approx \lambda_i \frac{(a' + \delta_s) b}{(2\delta + \delta_s) b'} = 1,55 \cdot 10^{-3} \frac{(0,21 + 0,036) \cdot 0,212}{(0,03 + 0,036) \cdot 0,242} = 5,06 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^\circ\text{C},$$

cu conductibilitatea termică echivalentă dată de relația (18.6, b)

$$\lambda_i = \frac{\lambda_s(2\delta + \delta_s)}{\lambda_s 2\delta + \lambda_s \delta_s} = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} (0,03 + 0,036)}{1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,03 + 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,036} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^\circ\text{C},$$

unde, din tabelul 18.2 rezultă:

$\lambda = 1,4 \cdot 10^{-3}$ W/cm°C — pentru izolația de hirtie impregnată în ulei, a conductorului;

$\lambda_s = 1,7 \cdot 10^{-3}$ W/cm°C — pentru izolația dintre straturi, din hirtie lăcuită (impregnată în lac),

iar $2\delta = a' - a = b' - b = 0,3$ mm = 0,03 cm este grosimea bilaterală a izolației de hirtie a conductorului de i.t.;

— grosimea părții exterioare a bobinei de i.t. care are $n_s'' = 9$ straturi, este

$$a_b = n_s'' a' + (n_s'' - 1) \delta_s = 9 \cdot 0,21 + (9 - 1) \cdot 0,036 = 2,17 \text{ cm}.$$

Căderea medie de temperatură, conform relației (18.1) este

$$\theta_2 = \frac{2}{3} \theta_1 = \frac{2}{3} \cdot 9,3 = 6,2^\circ\text{C}. \quad (19.58, b)$$

c) Căderea de temperatură între suprafața bobinei și ulei, conform relației (18.8) este:

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$\theta_{4j} = 0,285 q_j^{0,6} = 0,285 \cdot 881^{0,6} = 16,6^\circ\text{C}; \quad (19.59)$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$\theta_{4t} = 0,285 q_t^{0,6} = 0,285 \cdot 715^{0,6} = 14,7^\circ\text{C}. \quad (19.59, a)$$

d) Căderea medie de temperatură dintre înfășurare și ulei (v. fig. 18.1) pentru înfășurarea de înaltă tensiune, a cărei valoare este mai mare decât a înfășurării de joasă tensiune, rezultă cu relația (18.10)

$$\theta_{mbu} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_{4t} = 6,2 + 1,13 + 14,7 = 22^\circ\text{C}. \quad (19.60)$$

Cum se observă, această valoare este apropiată de limitele indicate în tabelul 18.1, pentru modul de răcire de tip NL considerat (v. cap. 18 — simbolizarea sistemelor de răcire).

2. Căderea maximă de temperatură medie între miez și ulei, conform relației (18.11)

$$\theta_{maxfu} = \theta' \frac{\theta_1' + 1,5\theta_1'}{\theta' + \theta_1' + 1,5\theta_1'} = 10,62 \frac{8,75 + 1,5 \cdot 11}{10,62 + 8,75 + 1,5 \cdot 11} = 7,47^\circ\text{C}, \quad (19.61)$$

în care, conform relațiilor (18.11, a):

$$\theta_1' = \frac{pa^2}{8\lambda_i} = \frac{11,5 \cdot 10^{-3} \cdot 15,5^2}{8 \cdot 0,2} = 1,72^\circ\text{C}, \quad (19.61, a)$$

unde:

— conform relațiilor (18.12) și (18.12, a)

$$p = p_{Fe} \gamma_{Fe} k_{Fe} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B_c^2 \gamma_{Fe} k_{Fe} =$$

$$= 1,25 \cdot 0,45 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,676^2 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \approx 11,5 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^3;$$

— conform figurii 18.2 și figurii 19.1

$a = a_1 = 15,5$ cm (v. rel. 19.6, a);

$b = 2\sum b_i = 15,2$ cm (v. rel. 19.6, b);

— din tabelul 18.4

$\lambda_i = 0,2$ W/cm°C;

$\lambda_t = 0,03$ W/cm°C;

$$\theta_4' = \frac{pa}{2\alpha_{conv}} = \frac{11,5 \cdot 10^{-3} \cdot 15,5}{2 \cdot 0,01} = 8,9^\circ\text{C}, \quad (19.61, b)$$

unde, $\alpha_{conv} \approx 100$ W/m²°C = 0,01 W/cm²°C;

$$\theta' = \theta_1' + \theta_4' = 1,72 + 8,9 = 10,62^\circ\text{C};$$

$$\theta_1'' = \frac{pb^2}{8\lambda_t} = \frac{11,5 \cdot 10^{-3} \cdot 15,2^2}{8 \cdot 0,03} = 11^\circ\text{C}; \quad (19.61, c)$$

$$\theta_4'' = \theta_4' \frac{b}{a} = 8,9 \frac{15,2}{15,5} = 8,75^\circ\text{C}. \quad (19.61, d)$$

— Se observă că θ_{maxfu} are o valoare destul de mică, deoarece și pierderile în fier au o valoare mică în comparație cu pierderile în înfășurări.

3. Dimensiunile interioare ale cuvei și suprafețele de cedare a căldurii.

a) Considerînd cuva dreptunghiulară, dimensiunile cuvei, date de relațiile (18.16) sînt (v. și fig. 18.4):

$$A = 2M + D_{ei} + 2s_s = 2 \cdot 32 + 30,9 + 2 \cdot 3 = 100,9 \text{ cm} \approx 100 \text{ cm}; \quad (19.62)$$

$$B = D_{ei} + s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2 = 30,9 + 2,5 + 2,5 +$$

$$+ 0,3 + 2 + 2 + 1 = 41,2 \text{ cm} \approx 41 \text{ cm};$$

$$H_{cv} = L_c + 2H_j + H_{jc} + H_{sj} = 34 + 2 \cdot 15,5 + 30 + 3 = 98 \text{ cm},$$

unde, distanțele de izolație, conform tabelului 18.5 sînt :

$$s_1 = s_2 = 2,5 \text{ cm};$$

$$s_3 = s_4 = 2 \text{ cm};$$

$$s_5 = 3 \text{ cm};$$

$$d_1 = 3 \text{ mm} = 0,3 \text{ cm (din motive mecanice)};$$

$$d_2 = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm};$$

— din tabelul 18.6, pentru $U_{iN} = 10 \text{ kV}$ rezultă

$$H_{jc} = 30 \text{ cm};$$

— constructiv se ia

$$H_{sj} = 3 \text{ cm}.$$

Căderea de temperatură de la cuvă la aer se estimează cu relația (18.14, b)

$$\theta_{ca} \leq 55 - \theta_{mbu} = 55 - 22 = 33^\circ\text{C}. \quad (19.63)$$

b) Aria suprafeței verticale a cuvei, conform relației (18.15)

$$S_{cv} = 2(A + B)H_{cv} = 2(100 + 41) \cdot 98 = 2,76 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 2,76 \text{ m}^2. \quad (19.64)$$

c) Aria suprafeței de radiație, considerînd-o cu 50% mai mare decît a cuvei ($k = 1,5$), rezultă conform relației (18.15)

$$S_r = kS_{cv} = 1,5 \cdot 2,76 = 4,14 \text{ m}^2. \quad (19.64, a)$$

d) Aria suprafeței de convecție, se aproximează cu relația (18.17)

$$S_{co} = \frac{1,05(P_k + P_0)}{2,50^{1,25}} = 1,12 \quad S_r = \frac{1,05(3 \cdot 246 + 522)}{2,5 \cdot 33^{1,25}} = 20 - 1,12 \cdot 4,14 = 15,37 \text{ m}^2. \quad (19.64, b)$$

e) Aria elementelor de răcire, atașate cuvei de arie $S_{cv} = 2,76 \text{ m}^2$, este conform relației (18.18)

$$S_{er} = S_{co} - S_{cv} = 15,37 - 2,76 = 12,61 \text{ m}^2. \quad (19.64, c)$$

Dacă se aleg radiatoare cu țevi drepte, ca în figura 15.25 (tabelul 15.3), lungimea lor nu poate fi decît $L = 71 \text{ cm}$ ($L = 90 \text{ cm}$ ar necesita o mărire a înălțimii H_{cv} a cuvei cu cca $5 + 10 \text{ cm}$), căreia îi corespunde pentru un element, aria totală de convecție (v. „nota“ de sub tabelul 15.3)

$$S'_{cT} = S_{cT} + S_{cc} = 1,98 + 0,4 = 2,38 \text{ m}^2, \quad (19.65)$$

pentru care rezultă

$$\frac{S_{er}}{S'_{cT}} = \frac{12,61}{2,38} = 5,3 \text{ radiatoare}. \quad (19.65, a)$$

Pentru a nu mări suplimentar, din faza inițială, dimensiunile transformatorului, se încearcă mai întii, varianta cu 5 radiatoare dispuse cîte 2

pe părțile laterale și unul într-o parte frontală, ca în figura 19.8; dacă încălzirile recalulate nu se încadrează în limitele admise, atunci se revine, mărind numărul de radiatoare la 6 bucăți.

Aria reală de convecție (pentru cele 5 radiatoare) rezultă din relația (18.18), în care valoarea reală a lui $S_{cT} = 5S'_{cT}$

$$S_{co} = S_{cv} + 5S'_{cT} = 2,76 + 5 \cdot 2,38 = 14,66 \text{ m}^2, \quad (19.66)$$

iar aria de radiație, conform figurii 18.3 și figurii 19.8 (cea cuprinsă în zona cu linie întrepruptă)

$$S_r = 2[(A + 30) + (B + 60)]H_{cv} = 2[(100 + 30) + (41 + 60)] \cdot 98 \cdot 10^{-4} = 2,57 \text{ m}^2. \quad (19.66, a)$$

4. Definitivarea căderilor de temperatură din transformator

a) Căderea de temperatură de la cuvă la aer, conform relației (18.19)

$$\theta_{ca} = \left[\frac{1,05(P_k + P_0)}{2,8S_r + 2,5S_{co}} \right]^{0,8} = \left[\frac{1,05(3 \cdot 246 + 522)}{2,8 \cdot 2,57 + 2,5 \cdot 14,66} \right]^{0,8} = 36,6^\circ\text{C}. \quad (19.67)$$

b) Căderea de temperatură de la ulei la cuvă, conform relației (18.20)

$$\theta_{uc} = 0,165k_1 \left[\frac{1,05(P_k + P_0)}{S_{co}} \right]^{0,6} = 0,165 \cdot 1 \cdot \left[\frac{1,05(3 \cdot 246 + 522)}{14,66} \right]^{0,6} = 4,74^\circ\text{C}. \quad (19.67, a)$$

c) Căderea medie de temperatură de la ulei la aer, în straturile superioare ale acestuia, conform relației (18.21)

$$\theta_{Mua} = 1,2(\theta_{uc} + \theta_{ca}) = 1,2(4,74 + 36,6) = 49,6^\circ\text{C} < 60^\circ\text{C}. \quad (19.67, b)$$

d) Căderea de temperatură de la bobină la aer, conform relației (18.22)

$$\theta_{ba} = \theta_{mbu} + \theta_{uc} + \theta_{ca} = 22 + 4,74 + 36,6 = 63,3^\circ\text{C}, \quad (19.68)$$

iar temperatura bobinei ϑ_n , pentru valoarea standardizată a temperaturii mediului ambiant $\vartheta_a = 40^\circ\text{C}$ (v. fig. 18.1)

$$\vartheta_n = \theta_{ba} + \vartheta_a = 63,3 + 40 = 103,3^\circ\text{C} < 105^\circ\text{C} = \vartheta_N \text{ clasa A},$$

deci transformatorul este bine dimensionat și cu 5 radiatoare (105°C este temperatura admisă pentru clasa A de izolație a transformatorului în ulei).

În cazul în care ar fi rezultat $\vartheta_n > 105^\circ\text{C}$, atunci trebuia mărit numărul de radiatoare de la 5 bucăți la 6 bucăți.

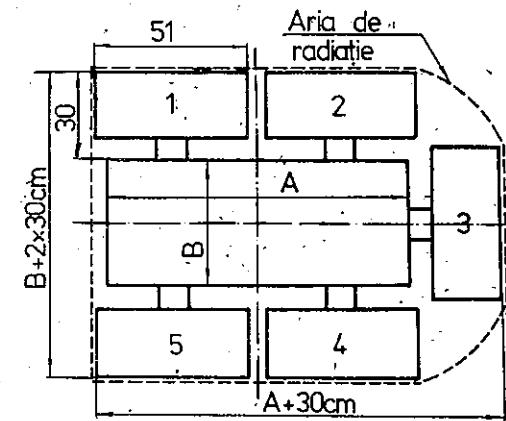


Fig. 19.8. Modul de așezare a radiatoarelor în jurul cuvei și dimensiunile transversale pentru determinarea ariei de radiație. Dimensiunile sunt în cm.