

ASPECTE PRIVIND DIMENSIONAREA CIRCUITULUI MAGNETIC LA TRANSFORMATORELE TRIFAZATE DE MICĂ PUTERE

Ioana-Gabriela SÎRBU¹, Dan-Gabriel STĂNESCU², Mihai-Cătălin COMĂNESCU³,
Lucian MANDACHE⁴, Mihai IACOB⁵

^{1,2,3,4}Universitatea din Craiova, Facultatea de Inginerie Electrică

⁵S.C. Elecmond Electric SRL

ioana.sirbu@edu.ucv.ro¹, dan.stanescu@edu.ucv.ro², comanescu.mihai.m4n@student.ucv.ro³,
lucian.mandache@edu.ucv.ro⁴, office@elecmond.ro⁵

Rezumat. Transformatorul are un rol esențial în transportul și distribuția energiei electrice. Transformatoarele, ridicătoare sau coborâtore de tensiune, au influență majoră asupra costurilor de transport-distribuție și parametrilor de calitate a energiei. Una dintre etapele principale ale proiectării unui transformator constă în dimensionarea miezului feromagnetic, cu impact asupra pierderilor la mersul în gol, gabaritului și costurilor de fabricație. Lucrarea de față prezintă etapa preliminară a dimensionării acestuia, cu accent pe influența pe care anumite mărimi o au asupra dimensiunilor și performanțelor sale.

1. INTRODUCERE

Transformatorul electric este un dispozitiv static cu două sau mai multe înfășurări cuplate magnetic, cu ajutorul căruia se transformă parametrii puterii electrice în curent alternativ (tensiune, curent). Pentru a asigura un cuplaj magnetic strâns, la frecvențe mici, înfășurările sunt amplasate pe un miez feromagnetic închis.

O parte din puterea preluată de un transformator se transformă în pierderi. O parte din acestea apar în înfășurările bobinelor (pierderi prin efect Joule), o altă parte în miezul feromagnetic. În miez, pierderile sunt cauzate de curenții turbionari și histerezisul magnetic.

La funcționarea în gol, circuitul secundar este deschis. Puterea consumată de la rețea se transformă integral în pierderi. Pierderile prin înfășurarea primară sunt neglijabile, astfel încât pierderile la mers în gol sunt pierderi în miezul feromagnetic.

Studiile recente referitoare la transformatoare au încercat să identifice metode de proiectare și optimizare bazate pe obținerea unor performanțe crescute ale acestor dispozitive, inclusiv prin micșorarea pierderilor [1]–[9]. În [1] se face o sinteză a studiilor în domeniu, în vreme ce în [2]–[9] se utilizează tehnici recente de optimizare a concepției transformatoarelor electrice, precum: sisteme expert, algoritmi genetici, inteligență artificială, etc.

În lucrarea de față accentul se pune pe dimensionarea preliminară a circuitului magnetic al unui transformator trifazat de mică putere cu răcire în ulei. Se studiază influența anumitor parametri asupra geometriei miezului, dar și asupra nivelului de pierderi corespunzătoare mersului în gol al transformatorului. În final se formulează concluzii asupra studiului, bazate pe rezultatele obținute.

2. DIMENSIONAREA CIRCUITULUI MAGNETIC

Circuitul magnetic este una dintre componentele principale ale unui transformator. El este calea principală pentru fluxul magnetic, facilitând transferul de energie de la circuitul înfășurării primare la înfășurarea secundară [1]. Este construit din tole de tablă silicioasă laminată la rece; tolele sunt izolate între ele cu hârtie, lac sau oxizi ceramici (carlit) pentru limitarea curenților turbionari. În prezent tehnologia de fabricație a materialelor circuitului

magnetic s-a îmbunătățit mult, ducând la tole de calitate superioară, cu permeabilitate magnetică relativ ridicată, ciclu de histerezis îngust și pierderi reduse la frecvența industrială.

În construcția miezurilor feromagnetice se folosește în mod frecvent tablă silicioasă cu cristale orientate de tip M4 sau M5, de grosime 0.3 mm, 0.35 mm sau 0.5 mm. Pentru aceste tole, producătorul specifică densitatea ($\rho_{Fe}=7650 \text{ kg/m}^3$) și pierderile specifice, $p_{10/50}$. Pentru tole de tip M4 de 0.35 mm, dependența dintre inducția magnetică din miez și pierderile specifice, la frecvența $f=50\text{Hz}$, este redată grafic în Fig. 1 [10].

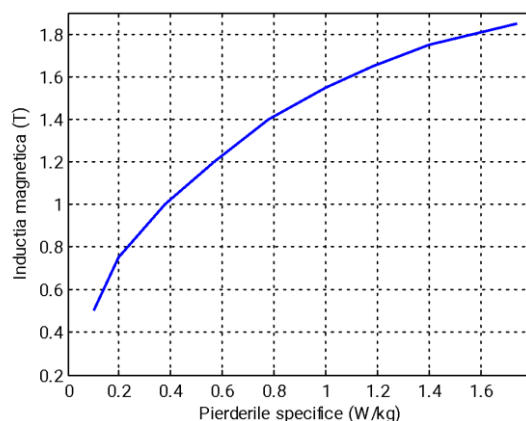


Fig. 1 — Dependenta dintre inducția magnetică și pierderile specifice, pentru tole de tip M4.

În etapa inițială de proiectare a circuitului magnetic al unui transformator trifazat se pleacă de la puterea acestuia, de la tensiunile nominale din primar și secundar și respectiv de la valoarea dorită a inducției magnetice în miezul de fier. În general valoarea acesteia este aleasă între 1.45 T și 1.7 T, pentru un echilibru între pierderile de mers în gol și gabaritul transformatorului, în funcție de puterea transformatorului. Uzual, valoarea este de 1.6 [1.65 T pentru pierderi specifice în jurul valorii de 1.2 W/kg (fig.1). Însă se pot lua și valori mai mici decât aceasta în cazul în care se urmărește atingerea unui nivel mai redus de pierderi la funcționare în gol.

În continuare studiul vizează un transformator trifazat cu $S_N=25 \text{ kVA}$, tensiuni $U_{1N}=20 \text{ kV}$, $U_{2N}=0.4 \text{ kV}$, frecvența de lucru $f=50 \text{ Hz}$, conexiunea Yzn-5 [11].

Etapile dimensionării circuitului magnetic sunt redate în continuare, având la bază atât recomandările prezentate în [12], cât și considerente practice ale producătorilor de transformatoare, în particular S.C. Elemond Electric SRL.

Puterea aparentă pe o coloană,

$$S_1 = \frac{S_N}{3} = 8333.33 \text{ VA}, \quad (1)$$

intervine în estimarea secțiunii coloanei [12]:

$$S_c = (4 \div 6) \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{S_1}{f}} = (51.64 \div 77.46) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2. \quad (2)$$

Considerând un coeficient de împachetare a miezului $k_{Fe} = 0.95$, și că, pentru transformatoarele de putere mică, secțiunea coloanei se alege de formă dreptunghiulară, se optează pentru o secțiune având dimensiunile (fig.2): $b=7 \oplus 10^{-2} \text{ m}$ și $l_g=11 \oplus 10^{-2} \text{ m}$. Cu aceste valori, secțiunea coloanei devine:

$$S_c = k_{Fe} \cdot b \cdot l_g = 73.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2. \quad (3)$$

Secțiunea jugului se ia puțin mai mare decât secțiunea coloanei, pentru a compensa anizotropia tolelor în raport cu direcția liniilor de câmp magnetic:

$$S_j = (1.03 \div 1.1) \cdot S_c = (75.34 \div 80.46) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2. \quad (4)$$

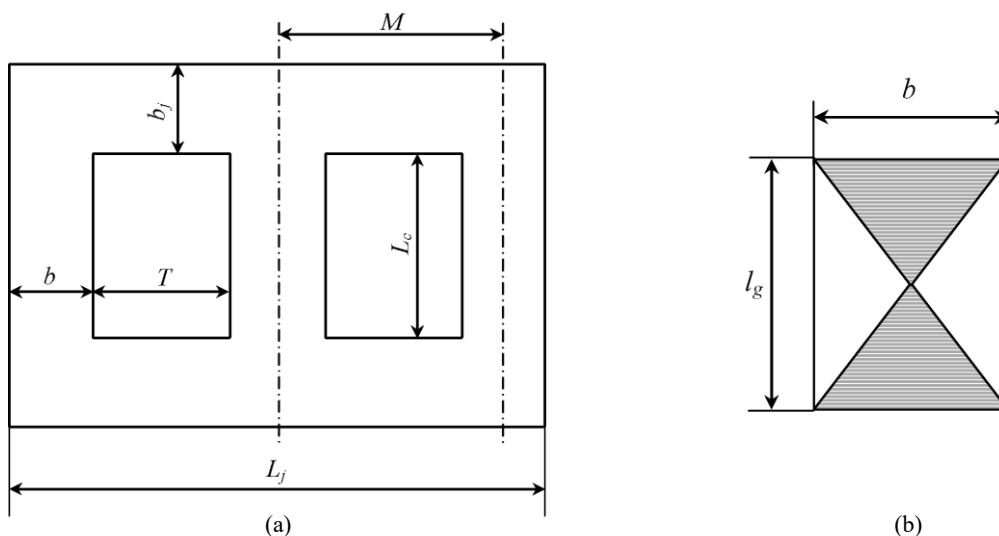


Fig. 2 – Dimensiunile miezului magnetic: (a) trifazat, cu trei coloane; (b) secțiunea coloanei.

Optând pentru aceeași grosime a jugului, $l_g = 11 \oplus 10^{-2} \text{ m}$, se alege $b_j = 7.5 \oplus 10^{-2} \text{ m}$. Astfel, secțiunea jugului este:

$$S_j = k_{Fe} \cdot b_j \cdot l_g = 78.37 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (5)$$

Tensiunea electromotoare indusă într-o spirală, în valoare efectivă, decurge din legea inducției electromagnetice în ipoteza unui câmp magnetic cu variație sinusoidală și distribuit uniform în secțiunea coloanei. Se ajunge la relația uzuală [12]:

$$e_1 = \pi \sqrt{2} \cdot f \cdot S_c \cdot B_c \text{ (V)} \quad (6)$$

Păstrând secțiunea coloanei constantă, precum și frecvența de funcționare, se observă că tensiunea indusă în spirală depinde de alegerea valorii inducției magnetice în coloană, B_c . Pentru a studia cum influențează aceasta dimensiunile miezului și pierderile de mers în gol, se vor considera valori diferite pentru B_c , în intervalul recomandat în [12], și anume: (1.25 | 1.75) T. O atenție deosebită se va acorda valorii recomandate, de 1.65 T, pentru care rezultatele obținute se vor marca distinct, prin puncte, pe reprezentările grafice.

În funcție de tensiunea indusă într-o spirală se determină înălțimea ferestrei miezului feromagnetic (înălțimea coloanei), cu relația [12]:

$$L_c = \frac{S_1}{100 \cdot A \cdot e_1} \text{ (m)}, \quad (7)$$

în care A este pătura de curent a transformatorului. Ținând cont de recomandările din [12], în funcție de puterea transformatorului, se alege $A = 200 \text{ A/cm}$.

Celelalte cote ale circuitului magnetic (Fig. 2) se determină cu relațiile:

$$M = 2.7 \cdot b = 0.190 \text{ m}; \quad T = M - b = 0.120 \text{ m}; \quad L_j = 3 \cdot b + 2 \cdot T = 0.450 \text{ m}. \quad (8)$$

Se poate observa că valorile acestora nu depind de alegerea valorii inducției magnetice B_c , prin urmare dimensiunile pe orizontală ale circuitului magnetic nu vor fi afectate de alegerea lui B_c (Fig. 2).

Ținând cont de secțiunea diferită a jugului, se determină valoarea inducției magnetice în jug:

$$B_j = \frac{B_c \cdot S_c}{S_j} \text{ (T)}. \quad (9)$$

Masa netă a fierului, considerând masa coloanelor și masa jugurilor, se determină apoi astfel:

$$G_{Fe} = G_{Fec} + G_{Fej} = 3 \cdot S_c \cdot L_c \cdot \gamma_{Fe} + 2 \cdot S_j \cdot L_j \cdot \gamma_{Fe} \text{ (kg)} \quad (10)$$

Pierderile de mers în gol se vor putea determina cu relația:

$$P_0 \cong P_{Fe} = 1.25 \cdot p_{10/50c} \cdot B_c^2 \cdot G_{Fec} + 1.25 \cdot p_{10/50j} \cdot B_j^2 \cdot G_{Fej} \text{ (W)}. \quad (11)$$

Într-o completare a studiului, se va analiza apoi influența alegerii valorii păturei de curent A , în intervalul de valori recomandat în [12], asupra geometriei miezului și asupra pierderilor. Pentru A valorile vor fi între (150 | 300) A/cm, păstrând B_c la valoarea constantă de 1.65 T.

Pentru organizarea studiului și facilitarea interpretării rezultatelor, relațiile din etapele de dimensionare au fost implementate într-un program de calcul realizat în Matlab. Rezultatele obținute sunt redată sintetic în continuare.

3. REZULTATE

Rezultatele aplicării algoritmului de mai sus sunt redată grafic în Fig. 3–10.

Figurile 3–7 prezintă rezultatele care arată dependența unor mărimi de proiectare de valoarea maximă a inducției magnetice în coloană, B_c .

Tensiunea indusă într-o spirală este prima mărime afectată de modificarea lui B_c . Pentru inducția magnetică de 1.65 T, tensiunea indusă în spirală a rezultat de 2.68 V. Dacă inducția magnetică în coloană se alege mai mică decât valoarea recomandată de 1.65 T, tensiunea pe spirală scade proporțional (dar cu impact asupra creșterii numărului de spire al înfășurărilor, care impune creșterea înălțimii ferestrei). Dependența dintre inducția magnetică și tensiunea pe spirală este redată în Fig. 3.

Modificarea tensiunii induse într-o spirală afectează înălțimea coloanei (înălțimea ferestrei miezului feromagnetic), Fig. 4. Pentru $B_c=1.65$ T, $L_c=0.155$ m. Dacă inducția magnetică în coloană scade, înălțimea ferestrei crește, rezultând un transformator mai înalt.

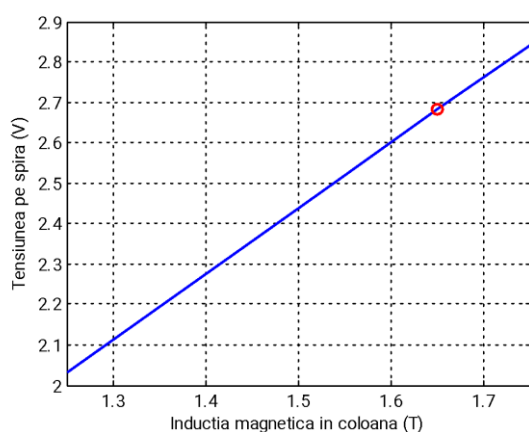


Fig. 3 — Dependența tensiunii induse într-o spirală de alegerea valorii inducției magnetice în coloană.

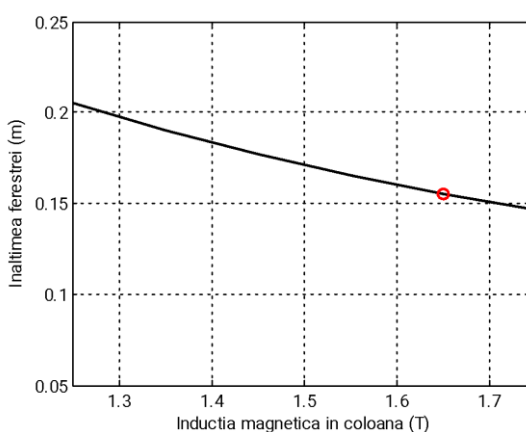


Fig. 4 — Dependența înălțimii ferestrei miezului magnetic de alegerea valorii inducției magnetice în coloană.

Având secțiunea jugului mai mare decât a coloanei, inducția magnetică în jug va fi diferită față de inducția magnetică din coloană (Fig. 5). Dependența dintre ele este una liniară. Inducția magnetică în jug va fi ușor mai scăzută decât B_c .

Masa fierului depinde și ea de alegerea inducției magnetice în coloană și, implicit, de valoarea inducției magnetice din jug (Fig. 6). La $B_c=1.65$ T, valoarea masei nete a fierului a rezultat de 79.81 kg. Pentru valori mai mici ale lui B_c , crescând înălțimea miezului, a crescut și valoarea masei acestuia. Pentru $B_c=1.25$ T, masa fierului a crescut cu 10.45%. Deoarece dimensiunile pe orizontală ale circuitului magnetic nu sunt afectate de B_c , masa aferentă jugurilor rămâne constantă.

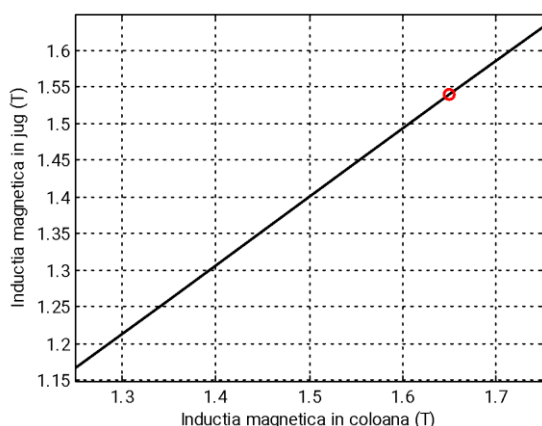


Fig. 5 – Dependenta inducției magnetice în jug de alegerea valorii inducției magnetice în coloană.

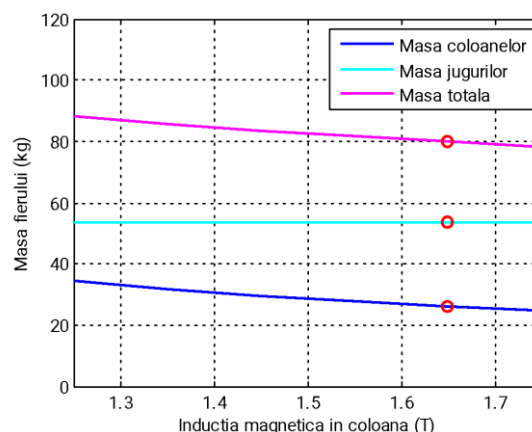


Fig. 6 – Dependenta masei nete a fierului de alegerea valorii inducției magnetice în coloană.

Pierderile la mers în gol depind, conform relației (11), atât de inducția magnetică, prin pătratul acesteia, cât și de masa netă și de frecvența de funcționare. Valorile obținute sunt redată grafic în Fig. 7. Pentru $B_c=1.65$ T, pierderile de mers în gol au rezultat de 263.13 W. Se observă grafic că aceste pierderi scad rapid în cazul alegerii unei inducții magnetice în coloană de valoare mai mică. Pentru $B_c=1.25$ T pierderile în gol rezultate au fost de doar 87.88 W, adică de trei ori mai mici.

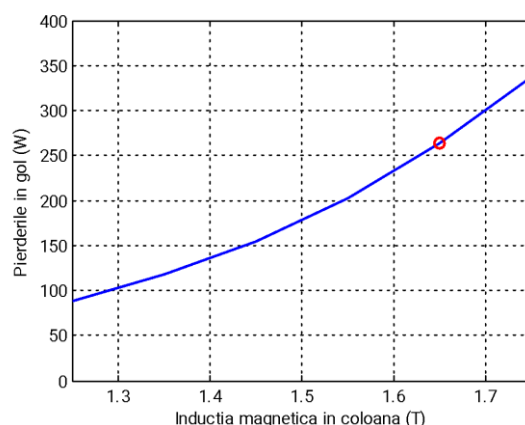


Fig. 7 – Dependenta pierderilor la mers în gol de alegerea inducției magnetice în coloană.

Figurile 8–10 prezintă rezultatele obținute în cazul alegerii diferitelor valori pentru pătura de curent, A . Și această mărime influențează înălțimea ferestrei transformatorului, implicit masa netă a acestuia și pierderile în gol.

Datorită dependenței neliniare a lui L_c de A , în cazul alegerii unei valori mai scăzute a păturii de curent, înălțimea ferestrei miezului feromagnetic crește (Fig. 8). Astfel, cele două mărimi, B_c și A , au un efect cumulat asupra geometriei circuitului magnetic.

Fiind afectată înălțimea coloanei, și masa netă a fierului se va modifica în funcție de A . Dependența dintre cele două mărimi se observă în Fig. 9. Scăderea valorii păturii de curent duce la creșterea masei nete a fierului.

Figura 10 indică faptul că pierderile la mers în gol au tendința de a crește în cazul scăderii valorii păturii de curent. Astfel se constată că, în acest caz, efectul este contrar celui obținut la scăderea lui B_c .

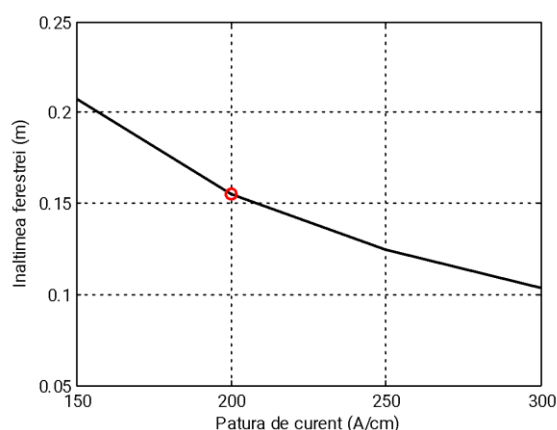


Fig. 8 — Dependenta înălțimii ferestrei miezului magnetic de alegerea valorii păturii de curent, pentru $B_c=1.65T$.

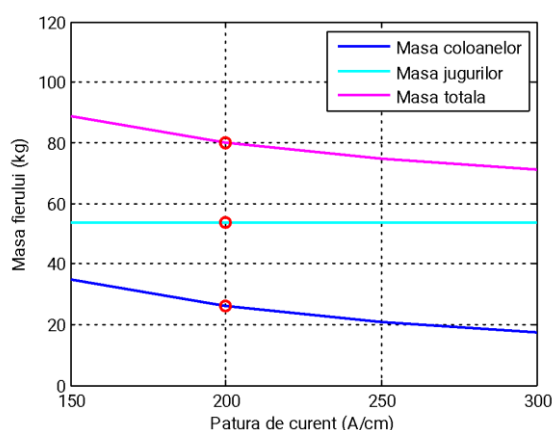


Fig. 9 — Dependenta masei nete a fierului de alegerea valorii păturii de curent, pentru $B_c=1.65T$.

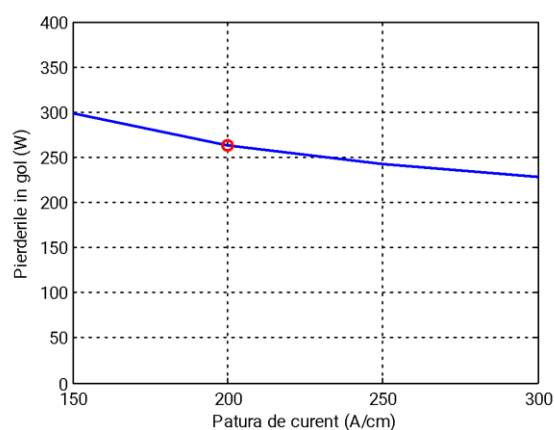


Fig. 10 — Dependenta pierderilor la mers în gol de alegerea valorii păturii de curent, pentru $B_c=1.65T$.

Rezultatele obținute oferă indicii importante privind modul cum se pot obține pierderi în gol mai mici, dar și cum se pot stabili dimensiunile circuitului magnetic pentru un echilibru între gabarit și pierderi la un transformator trifazat de mică putere.

4. CONCLUZII

Lucrarea analizează dimensionarea circuitului magnetic la un transformator trifazat de mică putere, în ulei. Dincolo de calculul propriu-zis, s-a pus în evidență modul cum anumite mărimi, în acest caz inducția magnetică în coloană și pătura de curent, influențează dimensiunile circuitului magnetic și, implicit, masa acestuia și dimensiunile de gabarit, precum și pierderile la mers în gol. Cum uneori beneficiarii solicită în mod expres realizarea unui transformator cu pierderi mici, studiul oferă soluții de proiectare utile în acest scop.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. E.I. Amoiralis, M.A. Tsili, A.G. Kladas, *Transformer design and optimization: A literature survey*, IEEE Transactions on Power Delivery, **24**, 4, pp. 1999-2024, Oct. 2009.
2. C. Hernández, M.A. Arjona, *Design of an efficient distribution transformer based on an expert system and FE*, The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM, pp. 1-5, Rome, Italy, 2010.
3. D. Phaengkiao, S. Ruangsinchaiwanich, *Design optimization of electrical transformer using genetic algorithm*, 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 3487-3491, Hangzhou, China, 2014.
4. M. H. Hashemi, H. Polat, *Distribution transformer core design optimization using heuristic optimization methods*, 2024 6th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), pp. 394-398, Budapest, Hungary, 2024.
5. A. Stulov, A. Tikhonov, I. Snitko, *Fundamentals of artificial intelligence in power transformers smart design*, 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), pp. 34-38, Chelyabinsk, Russia, 2020.
6. K. Dawood, F. Gezer, F. Köse, S. Tursun, *Experimental assessment of no-load and load losses in dry- type and oil-filled transformers*, 2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), pp. 1-4, Varna, Bulgaria, 2024.
7. D.G. Stănescu, I.G. Sîrbu, A. Vanvu, M.E. Ardeleanu, L. Mandache, M. Iacob, *Aspects regarding the testing of an ONAN distribution transformer with a special construction*, 2024 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), pp. 1-5, Craiova, Romania, 2024.
8. M.E. Ardeleanu, I.G. Sîrbu, D.G. Stănescu, I.M. Burciu, A. Scorenea, *Modern methods of analysing the transformer oil*, 2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), pp. 288-292, Iași, Romania, 2021.
9. A. Gamil, F. Schatzl, *Determining transformer core losses based on investigation of core material behaviour during test and operation – mathematical interpretation*, Transformers Magazine, **2**, 4, pp.20-25, 2015.
10. *** Cataloage proprietăți magnetice ale miezurilor feromagnetice, Elecmond Electric SRL, 2020.
11. M.C. Comănescu, I.G. Sîrbu (coord.), *Proiectarea și construcția unui transformator trifazat de 25 kVA*, Universitatea din Craiova, Facultatea de Inginerie Electrică, 2025 (nepublicată).
12. I. Cioc, I. Vlad, G. Calotă, *Transformatorul electric. Construcție. Teorie. Proiectare. Fabricare. Exploatare*, Scrisul Românesc, Craiova, 1989.