

ANALIZA UNUI ECRAN MAGNETIC POZIȚIONAT ÎN SPAȚIUL DINTRE ÎNFĂȘURĂRILE UNUI TRANSFORMATOR DE MICĂ PUTERE

Yelda VELI¹ și Alexandru M. MOREGA^{1,2}

¹Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea POLITEHNICA din București

²Institutul de Statistică Matematică și Matematică Aplicată, Academia Română

yelda.veli@upb.ro¹, amm@iem.pub.ro^{1,2}

Rezumat. Transformatoarele electrice sunt utilizate în aplicațiile de recoltare a energiei în etapa de condiționare prin adaptarea energiei recoltate la cea cerută de către sarcină. În această lucrare se analizează efectul pe care îl are prezența diferitelor dimensiuni ale spațiului dintre înfășurarea primară, respectiv secundară, precum și efectul prezenței unui ecran magnetic între înfășurările dispuse concentric pentru un transformator de putere mică destinat aplicațiilor de energy harvesting. Analiza se realizează în regim tranzitoriu, utilizând metoda elementului finit.

1. INTRODUCERE

În aplicațiile de recoltare a energiei sunt utilizate transformatoarele electrice în etapa de condiționare a energiei prin adaptarea acesteia la energia cerută de către sarcină. Unele aplicații de recoltare a energiei impun utilizarea transformatoarelor și în etapa de recoltare. Prin utilizarea ecranelor magnetice se evită saturarea miezului feromagnetic, fiind utilizat inclusiv pentru ecranarea câmpurilor magnetice ale frecvențelor din rețeaua de alimentare, în vederea protejării atât a dispozitivelor electronice, cât și a sănătății umane [1-3].

Transformatorul monofazat, cu înfășurări cilindrice concentrice, analizat în această lucrare are un miez feromagnetic prevăzut cu un element de susținere pentru înfășurarea primară și o înfășurare secundară. Cele două înfășurări sunt coaxiale și izolate una față de alta. Între înfășurări și elementul de susținere menționat și între primar și secundar pot fi prevăzute folii de ecranare conductive.

Acest tip de transformator poate fi utilizat, de exemplu, în sursele de alimentare în comutație, cu izolare față de rețea. Dacă sunt prezente, foliile conductive ecranează capacitiv înfășurările primară și secundară, astfel încât tensiunile de înaltă frecvență, locale, nu produc interferențe externe. În acest scop, o parte a foliilor de ecranare este pusă la masă în raport cu primarul, iar cealaltă parte este pusă la masă în raport cu secundarul. Deoarece suportul înfășurărilor cuprinde un întrefier, un flux magnetic semnificativ produs în regiunea foliilor de ecranare (capacitive) poate produce pierderi semnificative, prin curenți turbionari, în folii. Un ecran magnetic (folie) suplimentar permite o reducere importantă a acestor pierderi.

Transformatorul considerat aici este prevăzut cu o folie de ecranare pentru limitarea fluxurilor de scăpări, situată între înfășurări și suportul de bază, realizată dintr-un material magnetic moale. Intuitiv, fluxul magnetic care se închide prin întrefier și suportul miezului poate fi redus considerabil dacă ce puțin prima folie ecran-magnetic (dacă sunt prevăzute mai multe) este mai groasă decât adâncimea de pătrundere a câmpului electromagnetic. Pentru materialele neferomagnetice precum cuprul, adâncimea de pătrundere este în general atât de mare, astfel încât sunt necesare folii foarte groase, costisitoare, greu de înfășurat. Foliile de ecranare magnetice moi pot oferi rezultate excelente, chiar și în cazul unei grosimi mici.

Soluții alternative consideră foliile de ecranare realizate dintr-un material magnetic moale, acoperit cu un strat dintr-un material foarte bun electroconductor [8].

În această lucrare se analizează un transformator monofazat, simplificat, de putere redusă, 1:1, alimentat la o tensiune sinusoidală $V_1 = 20$ V, la frecvența $f = 50$ Hz, în regim

tranzitoriu, cu rezistența de sarcină, $R_s = 100 \Omega$. Sunt studiate două astfel de modele: un model în care se consideră diferite dimensiuni ale distanței dintre înfășurările primar și secundar, dispuse concentric, iar al doilea model care consideră un subdomeniu subțire, realizat din tablă, dispus la jumătatea distanței dintre înfășurările considerate, cu rol de ecranare magnetică. Se pot utiliza diferite materiale pentru realizarea ecranării magnetice, inclusiv cupru și aluminiu, însă în această lucrare se preferă utilizarea tablei magnetice datorită valorii mici, aproape nule, a conductivității electrice.

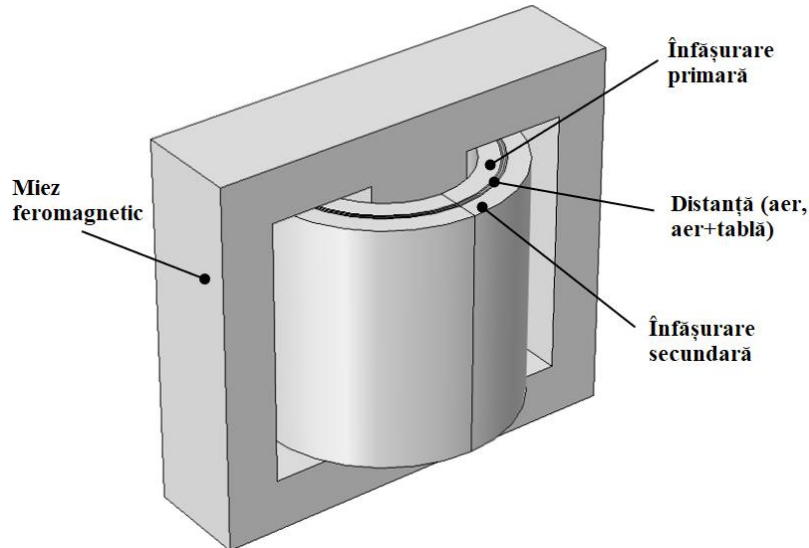


Fig. 1. Domeniul fizic, de calcul al transformatorului simplificat [4].

În această lucrare este analizat, prin modelare numerică, impactul ecranării magnetice asupra saturației miezului magnetic, iar valorile reactanțelor și a rezistențelor din primar, respectiv secundar, precum și valorile reactanțelor de magnetizare sunt calculate pentru diferite dimensiuni ale distanței dintre înfășurări, d . Pentru comparația parametrilor calculați, pentru al doilea model, cel în care avem tablă între înfășurări, se realizează și o analiză în regim armonic permanent, pe lângă cel realizat în regim dinamic.

Domeniul de calcul al transformatorului monofazat, ideal [4], cu evidențierea principalelor părți componente, este prezentat în Fig. 1. Cele două înfășurări, primară și respectiv secundară, au același număr de spire, $N_1 = N_2 = 300$. Prin depărtarea înfășurării secundare de cea primară se realizează variația distanței d dintre bobine, păstrând astfel aceeași secțiune transversală a înfășurării secundare. Grosimea ecranului magnetic este aleasă arbitrar, cât mai subțire, cât să permită realizarea rețelei de discretizare.

Primul caz consideră diferite distanțe ($d_1 = 0,001$ m, $d_2 = 0,002$ m, $d_3 = 0,003$ m, $d_4 = 0,004$ m, $d_5 = 0,005$ m) între înfășurarea primară, respectiv secundară, subdomenii reprezentate de aer, iar pentru aceleași distanțe, se consideră un al doilea model care introduce, la jumătatea distanței dintre acestea, o folie – ecran magnetic, cu grosimea de 0,4 mm.

2. MODELUL MATEMATIC

Câmpul electromagnetic este descris de legile inducției electromagnetice și circuitului magnetic

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

unde \mathbf{E} [V/m] este intensitatea câmpului electric, \mathbf{B} [T] inducția magnetică, \mathbf{H} [A/m] intensitatea câmpului magnetic, iar \mathbf{J} [A/m²] reprezintă densitatea curentului electric de conducție, la care se adaugă legea conducției electrice, legea fluxului electric, respectiv magnetic, legea conservării sarcinii electrice și legile constitutive

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (2)$$

unde μ [H/m] este permeabilitatea magnetică.

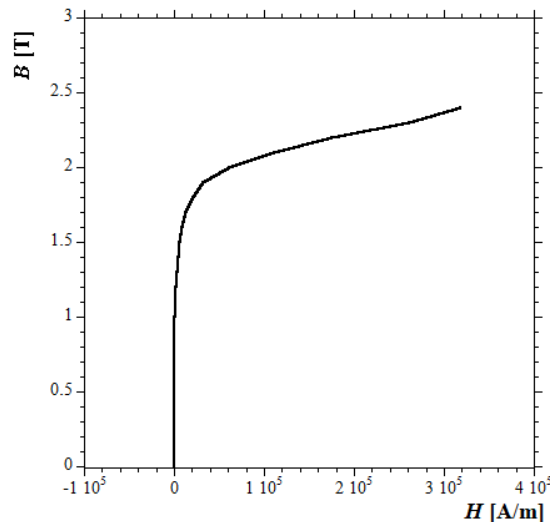


Fig. 2. Caracteristica de material a dependenței B - H pentru miezul transformatorului.

Pentru miezul transformatorului caracteristica de magnetizare (Fig. 2) este descrisă de

$$\mathbf{H} = f(\mathbf{B}) \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|}. \quad (3)$$

Circuitul electric echivalent al transformatorului electric, alimentat la o tensiune de tip sinusoidală, la $V_1 = 20$ V, este prezentat în Fig. 3 [5].

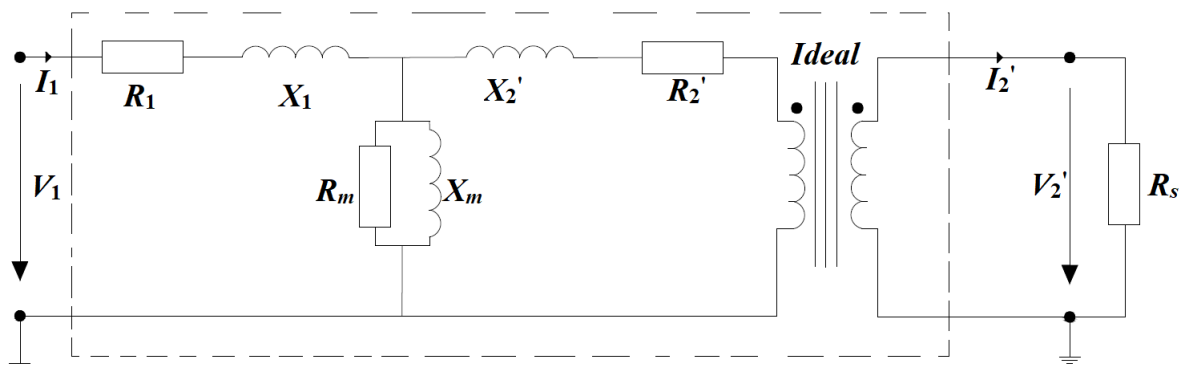


Fig. 3. Circuitul electric echivalent pentru transformatorul de putere redusă studiat.

Pentru calculul reactanței de magnetizare, X_m (Fig. 3), se utilizează energia magnetică din volumul miezului pentru calculul inductivității de magnetizare, $L_m = \frac{2}{I^2} \int_V \frac{\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}}{2} dV$ [6], respectiv al reactanței, $X = \omega L$.

Pentru a pune în legătură calculul reactanței primare, respectiv secundare cu dimensiunea distanței considerate, d , dintre înfășurări, se consideră în continuare formula inductivității [7] obținute din integrarea densității de energie magnetică asupra înfășurării

considerate, $L = \frac{2\pi\mu_0 N^2}{l} \left[\left(\frac{r_m}{3} + \frac{r_p}{4} \right) r_p + \left(\frac{r_t}{3} - \frac{r_s}{4} \right) r_s \right]$. În calcul se ține seama de înălțimea bobinelor,

$l = 25$ mm, de raza coloanei, $r_m = 10$ mm, de raza înfășurării primare, $r_p = 4$ mm, respectiv secundare, $r_s = 4$ mm., aceste două raze fiind calculate ca diferența dintre raza exterioară și cea interioară și raza totală, considerând suma tuturor razelor, inclusiv spațiul dintre înfășurări, $r_t = d$.

Condițiile pe frontieră care închid modelul sunt: izolare magnetică, respectiv electrică, aceste condiții fiind aplicate pe suprafața exterioară a domeniului. Un anumit mod de implementare a bobinelor, furnizată de [4], este utilizat pentru specificarea excitației care este aplicată precum condiție pe interfață, pe porțiunea secțiunii verticale care taie înfășurarea primară. O secțiune similară, prin înfășurarea secundară, este utilizată pentru interconectarea terminalelor circuitului de sarcină din secundar.

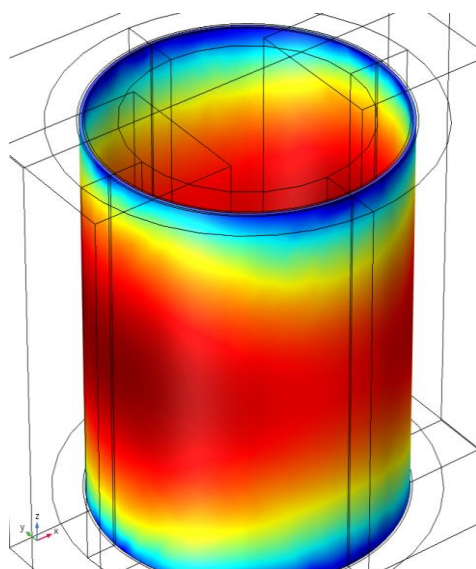
3. REZULTATELE SIMULĂRII NUMERICE

Valorile rezistențelor și reactanțelor sunt calculate și incluse în Tabelul 1. Acestea sunt rezultatul unui regim tranzitoriu, la frecvența $f = 50$ Hz, și tensiunea $V_1 = 20$ V (valoare efectivă).

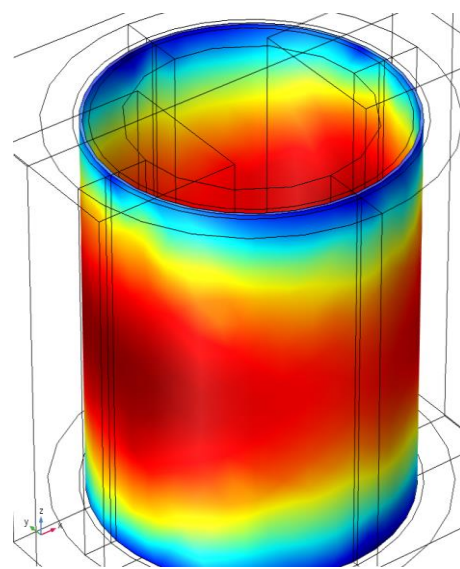
Tabelul 1. Valorile rezistențelor și reactanțelor pentru diferite distanțe între înfășurări.

d [μm]	cu aer					cu aer și ecran				
	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_1 [Ω]	X_2 [Ω]	X_m [Ω]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_1 [Ω]	X_2 [Ω]	X_m [Ω]
1	0,812	1,057	53,92	79,772	282,84	0,781	1,042	53,26	78,61	280,45
2	0,812	1,061	53,76	78,841	282,051	0,781	1,066	52,79	77,97	279,82
3	0,812	1,079	53,45	78,542	281,91	0,781	1,085	52,45	77,49	279,58
4	0,812	1,098	53,03	78,356	281,73	0,781	1,112	52,52	77,63	279,71
5	0,812	1,108	52,88	78,014	281,46	0,781	1,133	52,57	77,72	279,84

Harta de culoare a inducției magnetice pentru diferite distanțe între înfășurări, d , în prezența ecranului magnetic, este redată în Fig. 4, la aceleași momente de timp. Este evidențiat doar domeniul reprezentat de ecran.



a. $d_1 = 1 \mu\text{m}$; $B_{\text{max}} = 0,18$ T.



b. $d_2 = 2 \mu\text{m}$; $B_{\text{max}} = 0,16$ T.

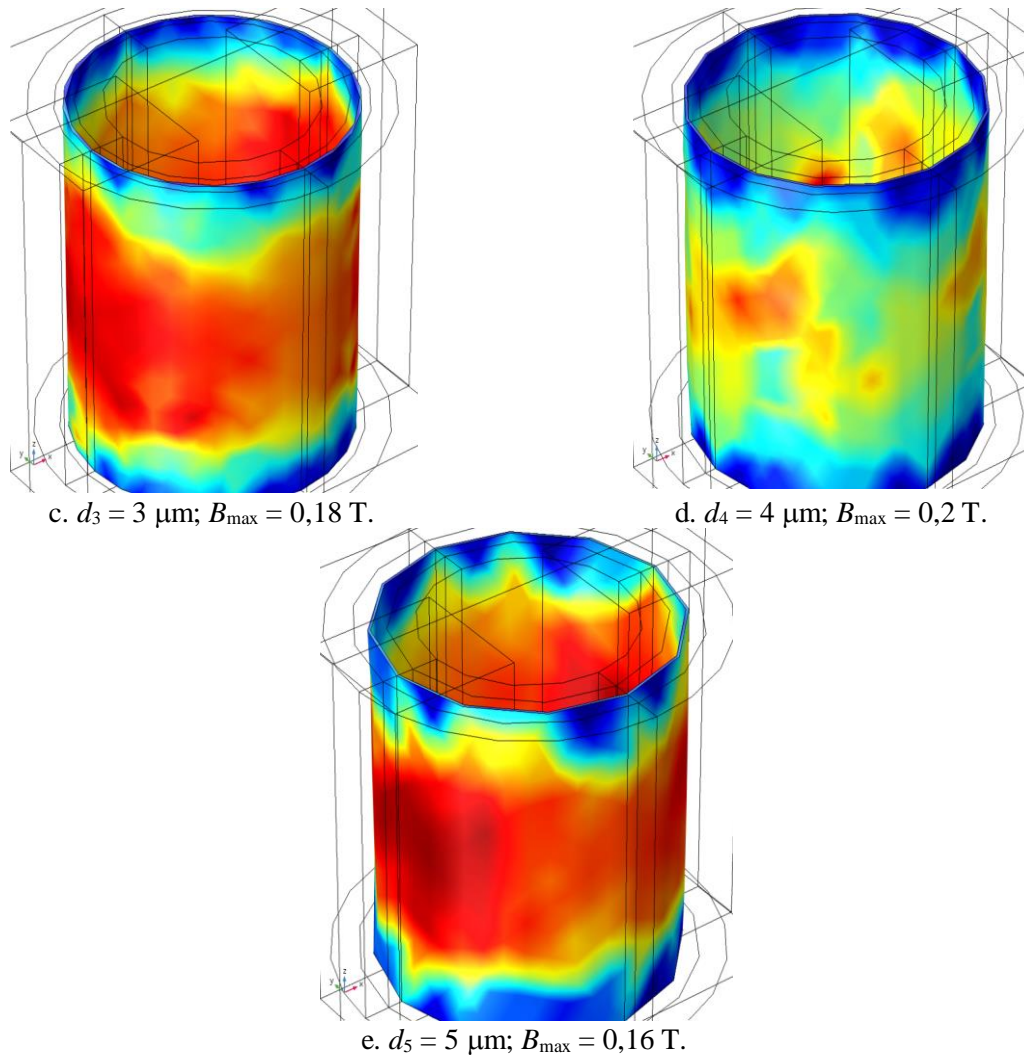


Fig. 4. Inducția magnetică pe suprafața ecranului magnetic la $t = 0.0256 \text{ s}$.

Utilizând datele din Tabelul 1, Fig. 5 prezintă variația reactanței din primar, X_1 , respectiv din secundar, X_2 , în funcție de distanță, cu și fără ecran magnetic.

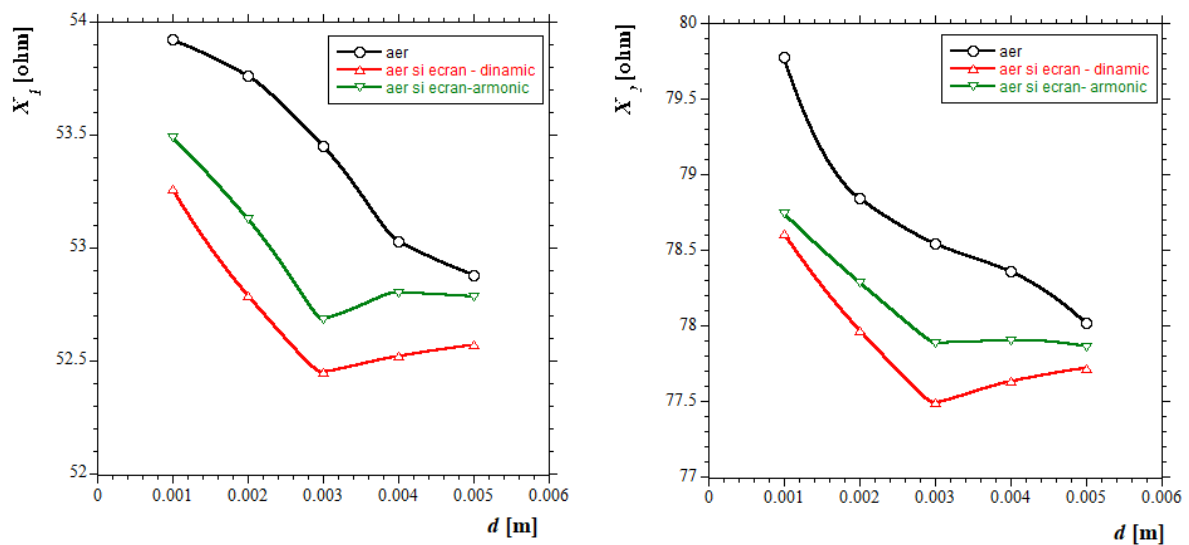


Fig. 5. Reactanțele primară (X_1) și secundară (X_2), cu și fără ecran magnetic.

Pentru primul caz, fără ecran, se observă o scădere aproape liniară a valorii reactanței din primar pe măsură ce distanța se mărește, însă atunci când considerăm și ecranul magnetic, valorile reactanței, X_1 , scad până la un minim ca apoi să crească spre o valoare aproape constantă. Variația cu d în regim armonic permanent a reactanțelor este asemănătoare cu variația indicată în grafic pentru regimul tranzitoriu. Discrpanțele pot fi de natură numerică.

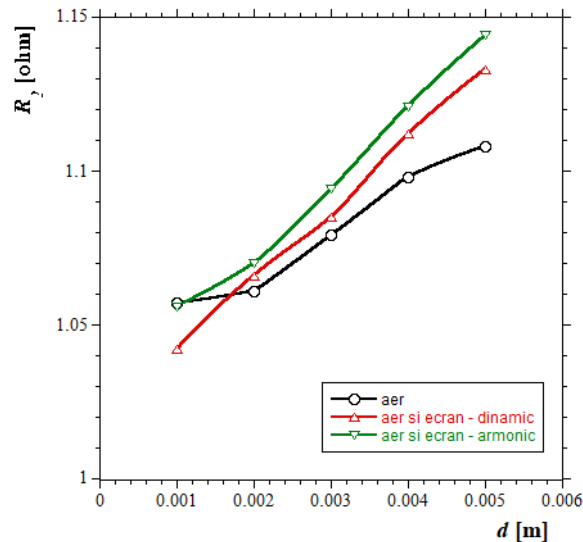


Fig. 6. Variația rezistenței din înfășurarea secundară, R_2 , pentru diferite dimensiuni ale distanței dintre înfășurări, d , pentru ambele cazuri considerate, cu și fără ecran.

Figura 6 prezintă variația rezistenței R_2 pentru diferite dimensiuni ale distanței celor două modele. Se poate observa iarăși o relație de proporționalitate. Intersecția variațiilor indică existența unei dimensiuni optime a distanței dintre înfășurări. Rezistența R_2 crește odată cu distanța considerată, deoarece lungimea conductoarelor bobinei crește odată cu valoarea lui d , păstrând aceeași arie a secțiunii transversale, iar fluxul magnetic indus este mai mare, ceea ce conduce la o valoare mai mare a tensiunii pe spiră.

Figura 7 redă variația reactanței de magnetizare a miezului feromagnetic, X_m , pentru diferite valori ale lui d .

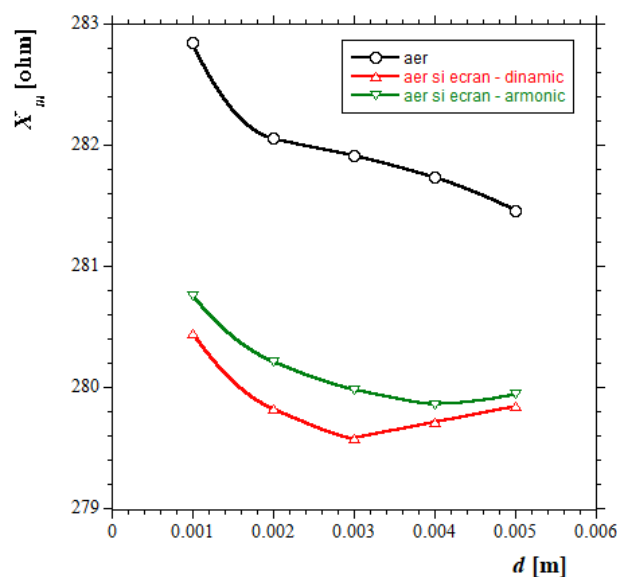


Fig. 7. Reactanța de magnetizare (X_m) pentru diferite valori ale distanței dintre înfășurări (d).

4. CONCLUZII

Modelul simulat este în sarcină, la $R_s = 100 \Omega$, excitația bobinelor este în tensiune, iar valoarea tensiunii de alimentare, sinusoidale la $V_1 = 20 \text{ V}$, și $f = 50 \text{ Hz}$, cât timp formele de undă nu se deformează, păstrându-și aspectul sinusoidal, miezul feromagnetic nu se saturează.

Utilizarea ecranului magnetic determină valori mai mici ale reactanței de magnetizare față de cazul fără ecran, însă valori ușor ridicate pentru rezistența din înfășurarea secundară.

Variațiile reactanțelor pentru cazul cu ecran magnetic prezintă o valoare minimă, fapt ce conduce la presupunerea că ar exista o valoare optimă a acestei distanțe d dintre înfășurări.

Înfășurarea primară a transformatorului nu ține cont de refularea curentului, aspect explicat de modul în care bobinele numerice sunt descrise [4].

BIBLIOGRAFIE

- [1] H. Yun, J. Yuan, J. Zou, „Design of novel structure current transformer with sheilding coils for overcoming the saturation of core”, *IEEE Transactions on Magnetics*, **42**, 4, 2006.
- [2] M. Istenic, P. Kokelj, P. Zunko, B. Cestnik, T. Zivic, „Some aspects of magnetic shielding of a transformer substation using alternative shielding techniques”, CIRE2001, Conference Publication No. 482, 2001.
- [3] A. Di Pasquale, G. Antonini, A. Orlandi, „Shielding effectiveness for a three-phase transformer at various harmonic frequencies”, *IET Science Measurement & Technology*, 2009.
- [4] .: Comsol Multiphysics V5.3a, User Guide.
- [5] M. Morega, „Structuri electromagnetice statice. Transformatoare. Electromagneți. Bobine de reactanță” în *Mașini Electrice*, notițe de curs, platforma Moodle, accesat la data de 18.11.2020.
- [6] I. Hernandez, F. De Leon, P. Gomez, „Design formulas for the leakage inductance of a toroidal distribution transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **26**, 4, 2011.
- [7] A. N. Jahromi, J. Faiz, H. Mohseni, „A fast method for calculation of transformers leakage reactance using energy technique”, *IJTE Transactions B: Applications*, **16**, 1, 2003.
- [8] .: IBM Technical Disclosure Bulletin, **12**, 10, pp 1623-1624, March 1970.