



(12)

CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2011 01314**

(22) Data de depozit: **06.12.2011**

(41) Data publicării cererii:
30.07.2013 BOPI nr. 7/2013

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA,
STR. AL. I. CUZA NR.13, CRAIOVA, DJ, RO

(72) Inventatori:
• MANDACHE LUCIAN, STR. ARȚARULUI
NR.9, BL. M29, AP.9, CRAIOVA, DJ, RO;
• TOPAN DUMITRU, STR. CEAHLĂULUI
NR. 12, CRAIOVA, DJ, RO;
• NICOLAE PETRE MARIAN,
STR. FILIP LAZĂR NR.4, BL.F5, SC.1, AP.7,
CRAIOVA, DJ, RO;

• IORDACHE MIHAI, STR. TÂRGU NEAMȚ
NR. 18, BL. D3, SC. B, ET. 2, AP. 16,
SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO;
• SÎRBU IOANA GABRIELA,
STR. CALEA BUCUREȘTI NR. 34, BL. A8,
SC. 1, ET. 2, AP. 6, CRAIOVA, DJ, RO;
• ANDREI ILIE, BD. IULIU MANIU NR. 17,
BL. 21P, SC. 1, AP. 34, SECTOR 6,
BUCUREȘTI, B, RO

(54) PROCEDEU DE DETERMINARE A PIERDERILOR ÎN FIER LA MIEZURI FEROMAGNETICE ÎN REGIMURI DE FUNCȚIONARE DEFORMATE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un procedeu de determinare a pierderilor în fier și altor mărimi electromagnetice conexe, la miezuri din tole feromagnetice care intră în componența bobinelor, transformatoarelor sau mașinilor electrice rotative în regimuri de funcționare deformante, specifice unor aplicații din domeniul electronicii de putere. Procedeu conform invenției cuprinde o primă etapă de extragere a unor parametri de referință ai miezului feromagnetic prin probe experimentale, și prelucrarea numerică a datelor, a doua etapă - de definire a unui model matematic, care folosește rezultatele obținute la etapa anterioară, a treia etapă - de implementare a modelului folosind un program de calcul matematic sau ca subrutină într-un program specializat în analiza circuitelor analogice în regim dinamic, și o ultimă etapă - de obținere a pierderilor și altor mărimi electromagnetice ce caracterizează funcționarea miezului magnetic, ca rezultate ale unor simulări numerice.

Revendicări: 2

Figuri: 12

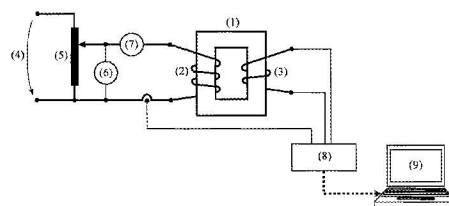


Fig. 1



PROCEDEU DE DETERMINARE A PIERDERILOR ÎN FIER LA MIEZURI FEROMAGNETICE ÎN REGIMURI DE FUNCȚIONARE DEFORMANTE

Invenția se referă la un procedeu de determinare a pierderilor în fier și altor mărimi electromagnetice conexe la miezuri din tole feromagnetice care intră în componența bobinelor, transformatoarelor sau mașinilor electrice rotative în regimuri de funcționare deformante specifice unor aplicații din domeniul electronicii de putere.

Gestionarea riguroasă a fenomenelor neliniare și inerțiale provocate de prezența miezurilor feromagnetice este dificilă atât în faza de proiectare, cât și în exploatare, cu atât mai mult dacă dispozitivele cu miez feromagnetic sunt destinate funcționării în regimuri deformante specifice aplicațiilor moderne cu convertoare statice. Aici se încadrează transformatoare de adaptare, bobine de filtrare, motoare din sisteme de acționare cu convertoare statice, generatoare sincrone cu excitație statică. În practică există tendința necorelării parametrilor constructivi cu parametrii funcționali, ceea ce conduce la funcționare defectuoasă, rate de defectare mărite sau scoaterea prematură din uz ca urmare a unor solicitări electromagnetice diferite de cele proiectate.

Un studiu riguros privind adaptarea parametrilor constructivi ai dispozitivelor cu miez feromagnetic la parametrii funcționali impuși de utilizarea lor în aplicații care presupun regimuri de funcționare deformante, impune considerarea întregului sistem fizic, de la rețeaua de alimentare până la sarcina electromagnetică sau mecanică, atât în regimuri de funcționare normale, cât și regimuri extreme sau de avarie posibile în practică. Astfel de studiu este posibil în prezent prin simulări numerice bazate pe analize ale distribuției spațio-temporale a câmpurilor magnetic/electrocinetic/termic (care folosesc discretizări spațiale bazate pe metoda elementelor finite) în combinație cu analiza în domeniul timpului a circuitului care conține dispozitivul cu miez feromagnetic [1,2]. Deși oferă rezultate precise, acestea necesită costuri ridicate impuse de resursele hardware și software necesare, timpul de calcul îndelungat și nivelul înalt de calificare al specialiștilor implicați. Ca soluții alternative, pentru încadrarea în costuri acceptabile cu nivel de precizie rezonabil, există preocupări pentru utilizarea unor instrumente de calcul mai accesibile pentru analiza întregului sistem electromagnetic. În acest scop sistemului fizic îi este asociat un model matematic simplificat, sub forma unui sistem de ecuații algebro-diferențiale ordinare (ecuații de stare sau echivalente), ce poate fi rezolvat

numeric cu un program de calcul de uz general sau cu un simulator de circuite electrice analogice [3,4]. Deși permit reducerea semnificativă a timpilor de calcul și se pretează astfel la procese iterative orientate pe optimizarea unor parametri constructivi, aceste soluții sunt însă insuficient exploatate la nivel mondial. În țară există preocupări recente în acest sens, cu rezultate importante obținute de autorii brevetului, o parte fiind comunicate și recunoscute în mediul științific [5-8].

Procedeul propus spre brevetare are ca obiective principale: a) stabilirea unor parametri funcționali limită pentru dispozitive cu miez feromagnetic concepute pentru regimuri de funcționare armonice și aflate în exploatare sub regimuri deformante specifice unor aplicații din domeniul electronicii de putere; b) proiectarea de dispozitive cu miez feromagnetic optimizate din punct de vedere al pierderilor în fier, destinate funcționării în regimuri deformante.

Invenția combină un procedeu experimental cu un algoritm de procesare a datelor în vederea determinării pierderilor în miezuri feromagnetice supuse unor excitații impuse de aplicația în care funcționează. Folosind date de catalog ale materialului feromagnetic și rezultate experimentale obținute în condiții de referință, se determină mărimi de importanță majoră în proiectarea optimală de produse noi sau în exploatarea celor existente, cum sunt pierderile instantanee și medii în fier, inclusiv separarea acestora în pierderi prin histerezis și respectiv pierderi prin curenți turbionari, pentru orice lege de variație a solenației aplicate, precum și alte mărimi electromagnetice care caracterizează funcționarea miezului feromagnetic în regim dinamic.

Invenția este motivată de următoarele constatări pe parcursul experienței în proiectarea de dispozitive cu miez feromagnetic: a) În practica inginerescă se constată frecvent o dispersie semnificativă a caracteristicilor tehnice ale tolelor feromagnetice față de caracteristicile tipice indicate de producător, cauzată în principal de abateri de la tehnologiile de construcție a miezurilor magnetice (pentru operații de debitare-debavurare, tratamente de recoacere, cupluri de strângere la asamblări). Se pot constata scăderea permeabilității magnetice inițiale, scăderea inducției de saturație, creșteri importante ale pierderilor specifice în fier. Ca urmare, pentru a compensa aceste fenomene, există tendința proiectanților de a stabili rezerve exagerate în concepția dispozitivelor, fapt ce conduce la consum mărit de materiale, gabarite mărite și implicit produse necompetitive pentru piața concurențială. b) Regimurile deformante specifice unor aplicații cu convertoare statice de energie supun

miezurile feromagnetice la solicitări electromagnetice greu de gestionat, cu atât mai mult cu cât miezul în sine este un mediu neliniar și inerțial. Gestionarea solicitărilor electromagnetice trebuie abordată din două perspective: din punctul de vedere al exploatării de dispozitive concepute pentru regimuri de funcționare armonice și aflate în exploatare sub regimuri deformante (spre exemplu, un transformator de serie MT/JT care alimentează o stație de redresare); din punctul de vedere al proiectării de dispozitive noi, optimizate pentru funcționarea într-un regim deformant specific.

Procedeul de determinare a pierderilor în regimuri de funcționare deformante se poate aplica fie pentru dispozitive cu miez feromagnetic aflate în exploatare, fie în proiectarea de produse noi. Pentru ambele situații, el cuprinde următoarele etape principale: a) Extragerea unor parametri de referință ai miezului feromagnetic prin probe experimentale și prelucrarea numerică a datelor; b) Definirea unui model matematic care folosește rezultatele obținute la etapa anterioară; c) Implementarea modelului folosind un program de calcul matematic sau ca subrutină într-un program de calcul specializat în analiza circuitelor analogice în regim dinamic; d) Obținerea pierderilor și altor mărimi electromagnetice ce caracterizează funcționarea miezului magnetic, ca rezultate ale unei simulări numerice.

Etapile se prezintă concomitent cu descrierea unui exemplu, în conexiune cu fig. 1, fig. 2, fig. 3, fig. 4, fig. 5, fig. 6, fig. 7, fig. 8, fig. 9, fig. 10, fig. 11 și fig. 12, care reprezintă:

Fig. 1: Schema platformei experimentale pentru extragerea parametrilor.

Fig. 2: Mărimi măsurate direct folosind platforma experimentală.

Fig. 3: Mărimile de stare a câmpului magnetic din miez obținute prin prelucrarea numerică a datelor experimentale.

Fig. 4: Procesarea datelor de catalog referitoare la pierderile în fier.

Fig. 5: Pierderile instantanee obținute prin prelucrarea numerică a datelor experimentale.

Fig. 6: Pierderile medii obținute prin prelucrarea numerică a datelor experimentale.

Fig. 7: Schema bloc a modelului de tronson feromagnetic cu considerarea histerezisului magnetic și a curenților turbionari.

Fig. 8: Mărimea de intrare și principala mărime de ieșire obținute în regim deformant prin modelare și simulare numerică. Reprezentare în domeniul timp și în spațiul stărilor.

Fig. 9: Pierderi în fier instantanee și medii obținute în regim deformant prin modelare și simulare numerică.

Fig. 10: Caracteristica de magnetizare obținută în regim deformant prin modelare și

simulare numerică.

Fig. 11: Pierderi în fier obținute în regim deformant prin simulare numerică cu un program specializat în analiza circuitelor analogice, în care s-a inclus o subrutină cu schema bloc din fig. 7.

Fig. 12: Caracteristici de magnetizare obținute în regimuri deformante prin simulări numerice cu un program specializat în analiza circuitelor analogice, în care s-a inclus o subrutină cu schema bloc din fig. 7.

Probele experimentale sunt simple și necesită aparatură de uz general. Schema de măsurare conține miezul magnetic de test (1), prevăzut cu o înfășurare de alimentare la joasă tensiune (2) și o înfășurare de măsură (3). Alimentarea de la rețeaua de joasă tensiune și frecvență industrială (4) se face prin intermediul unui autotransformator (5) cu tensiune de ieșire reglabilă, capabil să asigure saturarea parțială a miezului magnetic de test. Tensiunea aplicată și curentul absorbit sunt indicate orientativ de voltmetrul (6), respectiv ampermetrul (7). Curentul de alimentare și tensiunea la bornele bobinei de test sunt măsurate sincronizat și convertite în semnale numerice cu ajutorul unui sistem de achiziții de date (8) cu frecvența de eșantionare de cel puțin 5 kHz, semnalele eșantionate fiind transferate în memoria unui sistem de calcul (9) unde se va face ulterior prelucrarea datelor. După caz, dispozitivul de test poate fi un produs finit la care se folosesc înfășurări existente, sau un model realizat din materialul feromagnetic care face obiectul analizei. Se folosește un miez închis, preferabil fără întrefier sau cu întrefier bine determinat. Caracteristicile constructive ale miezului și bobinei de test trebuie cunoscute cu precizie. Se înregistrează secvențe de date care cuprind câteva perioade complete, pentru 7-10 niveluri distincte ale tensiunii aplicate, de la valori în vecinătatea lui zero, până la valori care asigură saturarea miezului. Tendința de saturare este sesizată prin saltul de curent obținut la creșterea ușoară a tensiunii. O secvență de date, înregistrată pentru un anumit nivel al tensiunii, conține curentul absorbit de înfășurarea (2) și tensiunea la bornele înfășurării (3), ca funcții de timp, așa cum exemplifică formele de undă (10) și (11).

Prelucrarea numerică a semnalelor înregistrate are ca scop determinarea următoarelor caracteristici: pierderile în fier totale și separarea acestora în componentele principale, respectiv pierderi prin histerezis și pierderi prin curenți turbionari; caracteristica ahisteretică a miezului magnetic $B_a(H)$; o serie de parametri care definesc un model complex al miezului magnetic, capabil să descrie histerezisul staționar și curenții turbionari. Se determină atât pierderile instantanee, cât și cele medii. Pentru extragerea parametrilor care definesc caracteristica ahisteretică și histerezisul staționar se folosesc principii enunțate în [9,10].

Algoritmul de prelucrare a datelor se bazează numai pe teoria microscopică Maxwell-Hertz, fără a apela la formule empirice. Principal, pornind de la tensiunea (11), folosind un procedeu de integrare numerică, se determină fluxul principal și apoi inducția magnetică medie în secțiunea miezului, ca funcție de timp, reprezentată în (12) pentru o perioadă fundamentală. Din curentul (10), se separă componenta de magnetizare și componenta care compensează solenația curenților turbionari. Din componenta de magnetizare, folosind legea circuitului magnetic, se determină o valoare medie a intensității câmpului magnetic în miez, ca funcție de timp (13). Pentru separarea componentei impuse de curenții turbionari se folosește rezistivitatea materialului feromagnetic, măsurabilă sau specificată în mod uzual de producător. Ca metodă alternativă, dacă sunt disponibile datele de catalog ale materialului magnetic, pornind de la valorile tipice ale pierderilor specifice în fier comunicate de producător în mod uzual pentru regim armonic la 50Hz și respectiv 60Hz, așa cum se exemplifică în (14), se separă, folosind un bloc de calcul (15), componenta pierderilor prin histerezis (16), respectiv prin curenți turbionari (17). Dacă în practică pierderile prin histerezis prezintă abateri importante de la valorile tipice, pierderile prin curenți turbionari rămân în vecinătatea valorilor tipice la tensiuni de excitație sinusoidale. În urma separării componentei impuse de curenții turbionari din curentul total (10), rezultă un parametru important al modelului de regim dinamic, care permite estimarea pierderilor prin curenți turbionari în regimuri de funcționare deformante.

Pierderile instantanee în fier și componentele acestora obținute pentru miezul magnetic de test se prezintă sub forma (18), pentru un singur nivel al tensiunii de alimentare. Prin mediere pe o perioadă rezultă valorile medii (19), reprezentate în mod similar cu pierderile calculate pe baza datelor de catalog.

Definirea modelului de regim dinamic al unui tronson de miez feromagnetic folosește parametrii determinați anterior și dimensiunile geometrice rezultate în urma proiectării dispozitivului cu miez feromagnetic. Modelul are ca mărime de intrare solenația exterioară (20) și ca mărime de ieșire fluxul magnetic fascicular prin secțiunea transversală a tronsonului (21). Solenația curenților turbionari (22) se scade din solenația exterioară, folosind blocul sumator (27), rezultând tensiunea magnetică la capetele tronsonului de miez (23). Acesta impune intensitatea câmpului magnetic în miez, care determina magnetizarea materialului. Se calculează inducția magnetică medie și apoi fluxul magnetic (21), cu blocul de calcul (24). Acest bloc folosește un model al histerezisului staționar bazat pe următoarea ecuație diferențială:

$$\frac{dB}{dt} = \left[\frac{B_a - B}{k \cdot \text{sign} \frac{dH}{dt} - \frac{\alpha}{(1-c) \cdot \mu_0} \cdot (B_a - B)} + c \cdot \mu_{da} + (1-c) \cdot \mu_0 \right] \cdot \frac{dH}{dt}.$$

B și H sunt mărimile de stare ale câmpului magnetic. B_a este componenta ahisteretică a inducției magnetice determinată anterior, prin dependența neliniară $B_a(H)$, alături de parametrii k , c , α . Din caracteristica $B_a(H)$ rezultă și permeabilitatea dinamică ahisteretică

$$\mu_{da} = \frac{dB_a}{dH}$$

μ_0 este permeabilitatea magnetică absolută a vidului.

Blocul de calcul (25) permite determinarea unui curent turbionar echivalent, care depinde de viteza de variație a fluxului printr-o constantă de proporționalitate K_T . Același bloc calculează și pierderile instantanee prin curenți turbionari (26), conform expresiei:

$$p_T(t) = K_T \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2.$$

Pierderile instantanee prin histerezis (28) se determină în blocul de calcul (29), conform expresiei în care intervine tensiunea magnetică la capetele tronsonului de miez magnetic:

$$p_H(t) = u_m(t) \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

Pentru regimuri periodice, se calculează pierderile medii prin medierea pierderilor instantanee de-a lungul unei perioade fundamentale.

Subliniem că modelul rămâne valabil pentru orice lege de variație a solenațiilor exterioare, nu numai pentru regim sinusoidal sau cvasisinusoidal. La frecvențe de lucru care impun discuții asupra adâncimii de pătrundere a curenților turbionari, este necesară corectarea parametrului K_T .

Implementarea modelului se poate face folosind programe de calcul matematic de uz general. În acest mod se poate studia riguros comportarea miezului magnetic la orice tip de excitație. Spre exemplificare, prezentăm rezultate obținute pe această cale, în cazul unui tronson din tole silicioase laminate la rece tip M4, excitat cu o solenație care conține armonici de ordinele 5 și 7 alături de componenta fundamentală de frecvență industrială. Solenația este

reprezentată pentru trei perioade fundamentale (30). Principalele mărimi de ieșire ale modelului sunt fluxul magnetic ca funcție de timp (31), precum și pierderile instantanee și medii (33), (34). Reprezentarea în spațiul stărilor Solenație-Flux (32), realizată pentru trei perioade fundamentale, oferă o imagine sugestivă privind comportarea tronsonului de miez magnetic. S-a reprezentat și caracteristica de magnetizare (35) care reflectă histerezisul magnetic.

Ca alternativă, implementarea modelului se poate face sub formă de subrutină în programe specializate de analiză a circuitelor electrice analogice în regim dinamic. Această alternativă este preferată întrucât permite încadrarea miezului magnetic în circuitul complex împreună cu care funcționează, pentru analiza unitară a întregului sistem pe baza unei scheme de simulare capabilă să reproducă condițiile reale de funcționare ale dispozitivului sau echipamentului din care face parte miezul magnetic. Spre exemplificare, prezentăm rezultate obținute în urma unei simulări SPICE orientată pe studiul unei bobine de filtrare a curentului debitat de un redresor. Sistemul se studiază pentru diferite valori ale rezistenței de sarcină. Pentru una dintre situațiile studiate sunt reprezentate pierderile instantanee prin histerezis (36) și respectiv prin curenți turbionari (37). Caracteristicile de magnetizare obținute pentru diferite valori ale rezistenței de sarcină sunt prezentate alături de caracteristica extremă a bobinei (38). Caracteristicile de magnetizare parțiale de mici dimensiuni explică și pierderile scăzute (36), (37).

Procedeul de determinare a pierderilor în fier la miezuri feromagnetice în regimuri de funcționare deformante prezintă o serie avantaje notabile, după cum urmează: rezolvă o problemă tehnică dificilă, pentru care nu există până în prezent instrumente de analiză unanim acceptate; permite adaptarea optimă la aplicații moderne a unor dispozitive cu miez feromagnetic de concepție veche; permite proiectarea optimizată a unor produse competitive în condițiile actualei piețe concurențiale; necesită dotare minimală pentru probe experimentale în condiții de laborator sau la locul de utilizare, după caz; prelucrarea datelor experimentale este simplă și nu necesită software dedicat; permite depistarea unor abateri în respectarea unor procedee tehnologice de fabricare a miezurilor feromagnetice; permite anticiparea comportării dispozitivelor în regimuri de funcționare care nu pot fi reproduse în condiții de laborator; implementarea modelelor se poate face cu programe de calcul matematic de uz general și echipamente hardware de uz comun; prin urmare, costurile de implementare sunt minime; posibilitatea implementării în simulatoare de circuite, pentru analiza unitară a întregului

sistem din care face parte miezul magnetic; indiferent de modul de implementare, viteza de calcul este semnificativ mai mare decât în cazul metodelor bazate pe cosimulare câmp magnetic-circuit electric; impact în reducerea costurilor de mentenanță la produse existente; impact în creșterea nivelului de competitivitate a produselor nou proiectate.

În privința aplicabilității la nivel industrial, modul de implementare expus anterior și avantajele enunțate, demonstrează ca evidentă fezabilitatea procedurii pentru orice agent economic care desfășoară activități specifice de proiectare, producție, exploatare. Pentru ca procedeul să devină operațional la nivelul agentului economic, este necesară instruirea unui specialist cu studii superioare în domeniul electric, durata aproximativă a instructajului fiind de o zi lucrătoare.

Referințe bibliografice:

- [1] M.C. Costa, S.I. Nabeta, J.R. Cardoso, *Modified Nodal Analysis Applied to Electric Circuits Coupled with FEM in the Simulation of a Universal Motor*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 4, July 2000, pp. 1431-1434;
- [2] R.Escarela-Perez, E. Melgoza, J.A.-Ramirez, *Systematic Coupling of Multiple Magnetic Field Systems and Circuits Using Finite Element and Modified Nodal Analyses*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 1, January 2011, pp. 207-213;
- [3] L.O. Chua, K.. Stromsmoe, *Lumped-Circuit Models for Nonlinear Inductors Exhibiting Hysteresis Loops*, IEEE Transactions on Circuit Theory, vol. CT-17, no. 4, November 1970, pp. 564-574;
- [4] D.W.P. Thomas, J. Paul, O. Ozgonenel, C. Christopoulos, *Time-Domain Simulation of Nonlinear Transformers Displaying Hysteresis*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 7, July 2006, pp. 1820-1827;
- [5] L. Mandache, D. Topan, I.G. Sirbu, *Accurate Time-Domain Simulation of Nonlinear Inductors Including Hysteresis and Eddy-Current Effects*, Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II, WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K., pag. 1327-1332;
- [6] L. Mandache, D. Topan, M. Iordache, I.G. Sirbu, *SPICE Model for Effective and Accurate Time Domain Simulation of Power Transformers*, IEEE International Symposium on Theoretical Electrical Engineering – ISTET 2011, Klagenfurt, Austria, July 25-27, 2011, pag. 116-121;
- [7] L. Mandache, D. Topan, A. Dolan, *Alternative approach to FEM-based modeling and*

simulation of power transformers in transient behavior, 20th IEEE Soft Magnetic Materials Conference – SMM 20, Kos Island, Greece, September 18-22, 2011;

- [8] L. Mandache, D. Topan, M. Iordache, L. Dumitriu, I.G. Sirbu, *On the Time-Domain Analysis of Analog Circuits Containing Nonlinear Inductors*, 20th IEEE European Conference on Circuit Theory and Design – ECCTD 2011, Linköping, Sweden, August 29-31, 2011, pag. 77-80;
- [9] D.C. Jiles, D.L. Atherton, *Theory of ferromagnetic hysteresis*, Journal of Applied Physics, Vol. 55, No. 6, 1984, pag. 2115-2120;
- [10] D.C. Jiles, D.L. Atherton, *Ferromagnetic hysteresis*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-19, No. 5, 1983, pag. 2183-2185.

REVENDICĂRI

1. Procedeu de determinare a pierderilor în fier la miezuri feromagnetice în regimuri de funcționare deformante. Etapele procedurii: extragerea unor parametri de referință ai materialului feromagnetic studiat prin probe experimentale și prelucrarea numerică a datelor; definirea unui model matematic asociat tronsoanelor de miez feromagnetic, folosind parametrii obținuți în etapa anterioară, cu considerarea neliniarităților, histerezisului magnetic și curenților turbionari; implementarea modelului într-un program de calcul matematic sau ca subrutină într-un simulator de circuite electrice; determinarea pierderilor instantanee și medii prin histerezis, a pierderilor instantanee și medii prin curenți turbionari și a altor mărimi electromagnetice care descriu funcționarea miezului în regim dinamic – cel puțin a fluxurilor magnetice – în urma simulării numerice în condiții care reproduc regimurile de funcționare reale. Modul de realizare a procedurii: probe experimentale pe baza platformei experimentale compusă din elementele (1)-(9) pentru memorarea, sub formă de semnale eșantionate, a curentului de alimentare (10) și tensiunii (11), ca funcții de timp; prelucrarea numerică a semnalelor experimentale pentru obținerea caracteristicii ahisteretice $B_d(H)$ și a parametrilor k , c , α , K_T necesari în modelarea tronsoanelor de miez magnetic.

2. Definirea unui model compus din blocurile (24), (25), (27), (29), care operează cu mărimile (20), (21), (22), (23), (26), (28). implementarea modelului cu un program de calcul matematic de uz general; implementarea modelului ca subrutină într-un simulator de circuite electrice; obținerea mărimilor de ieșire ale simulării ca în exemplele (30), (31), (33), (34), (35), respectiv (36), (37), (38).

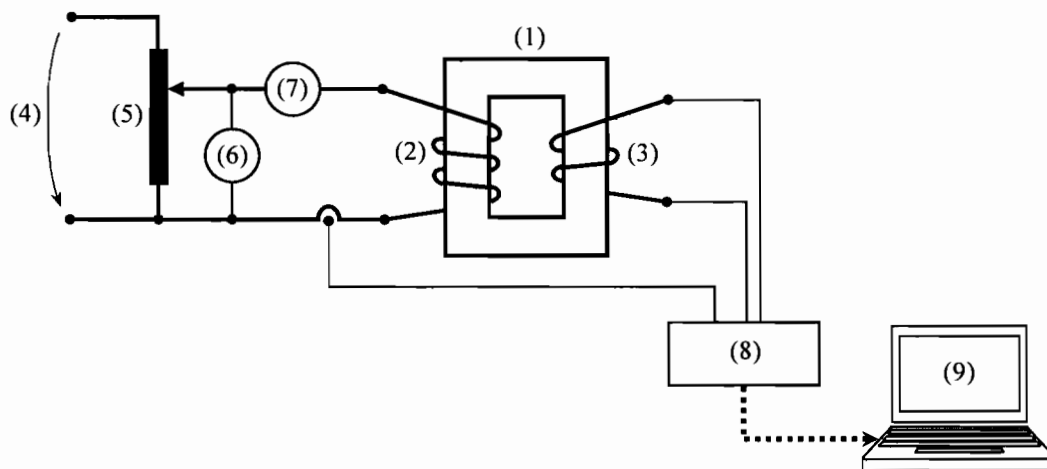


Fig. 1

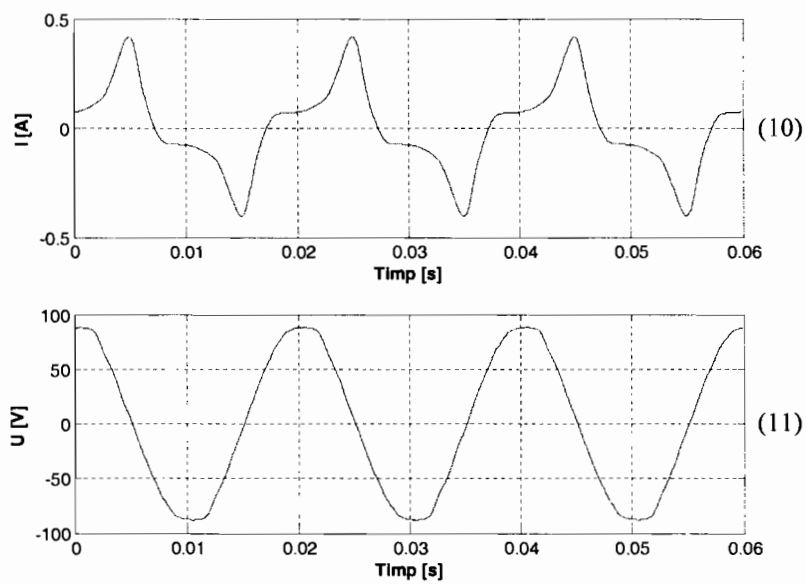


Fig. 2

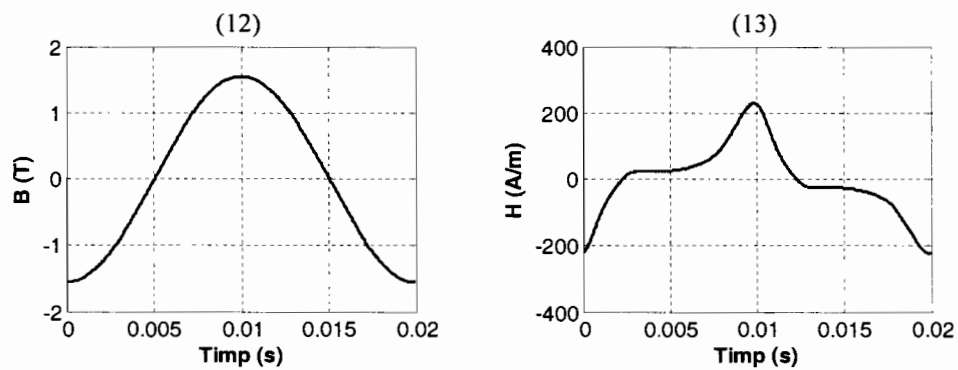
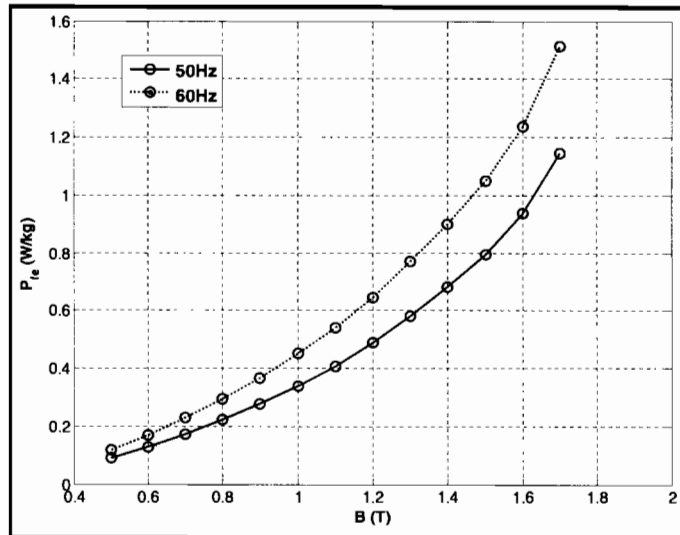
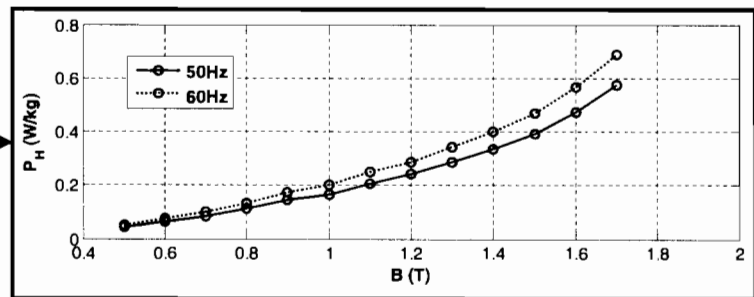


Fig. 3

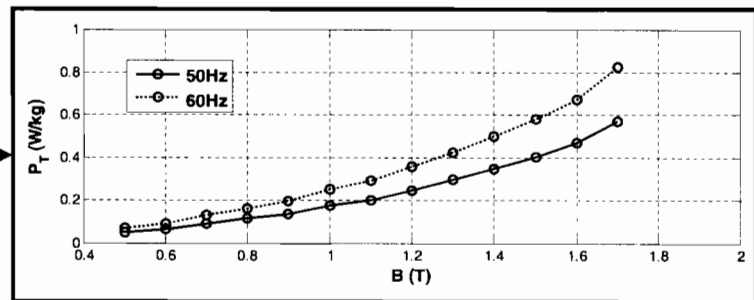


(14)

(15)



(16)



(17)

Fig. 4

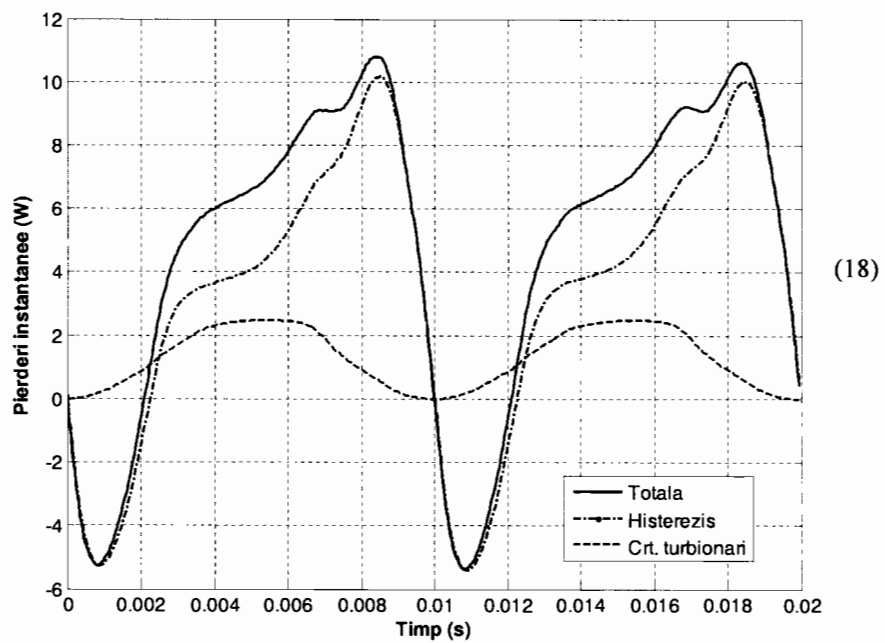


Fig. 5

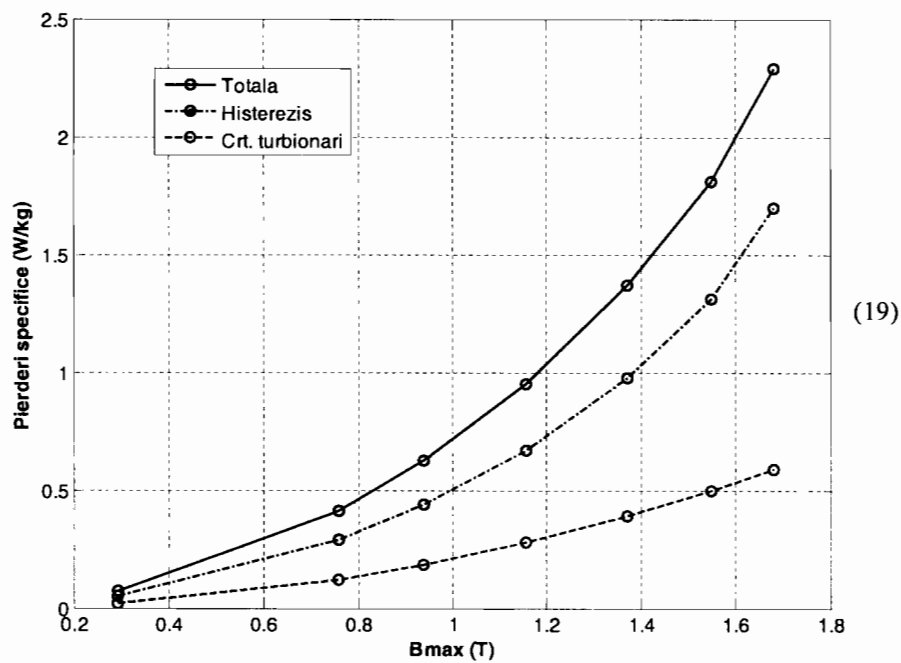


Fig. 6

2

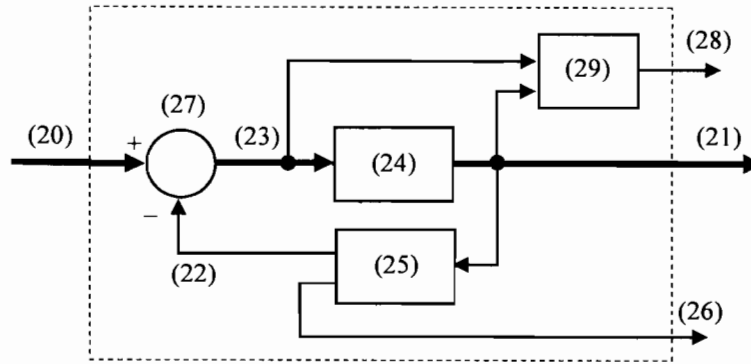


Fig. 7

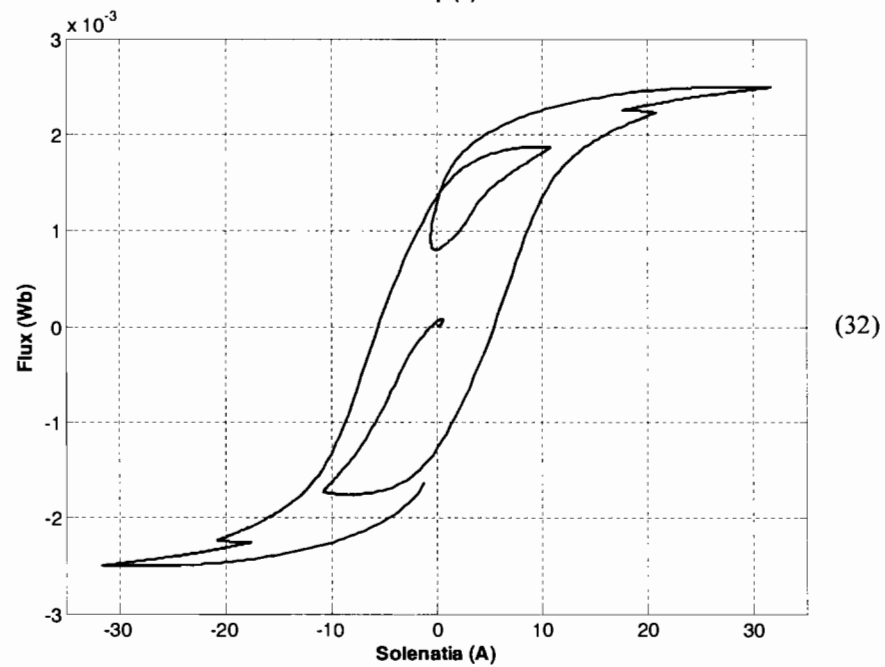
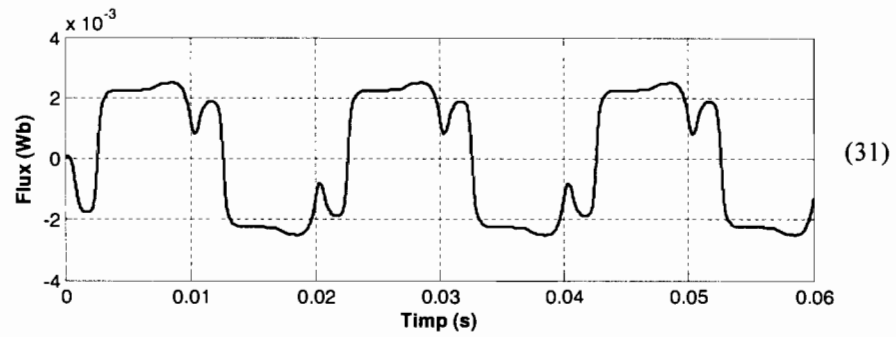
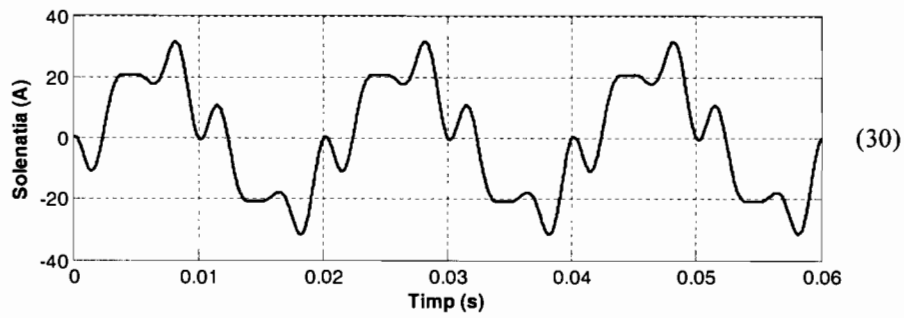


Fig. 8

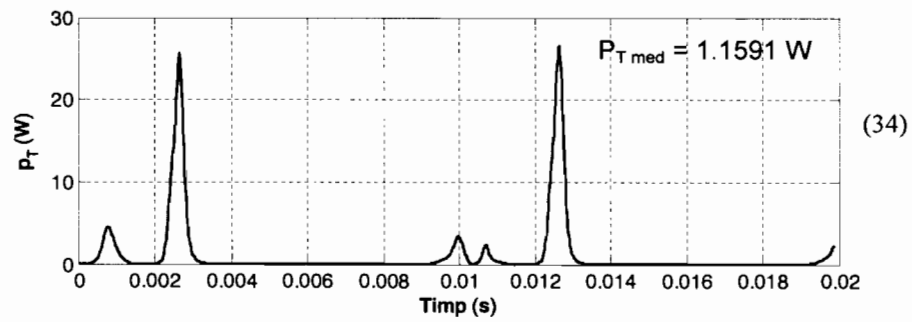
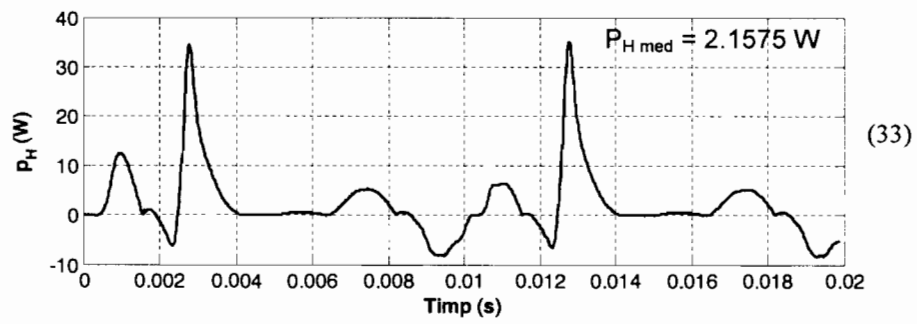


Fig. 9

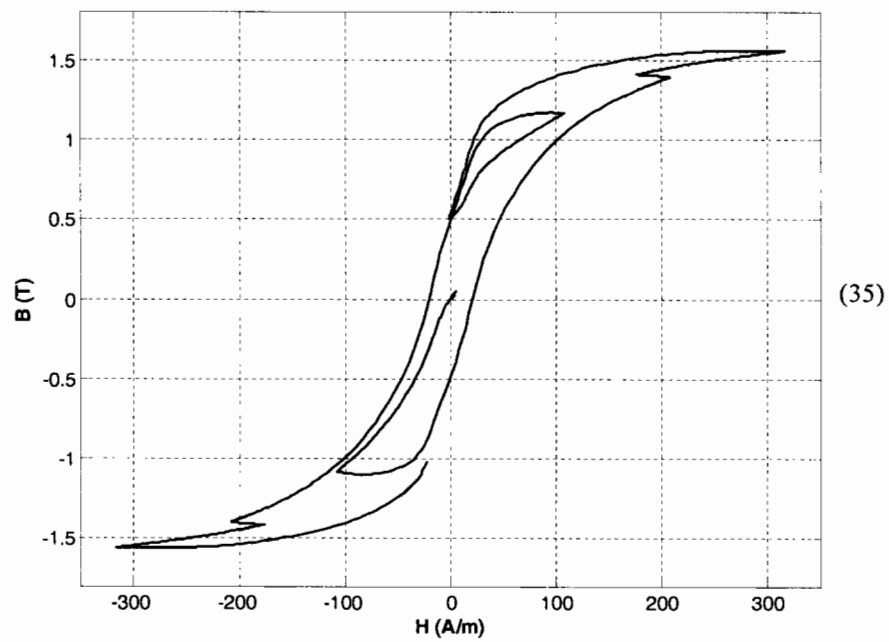


Fig. 10

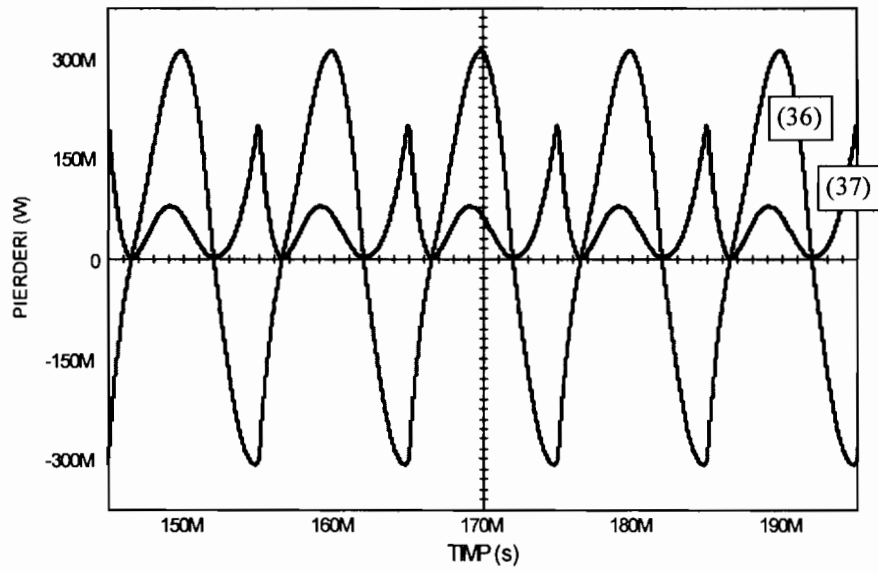


Fig. 11

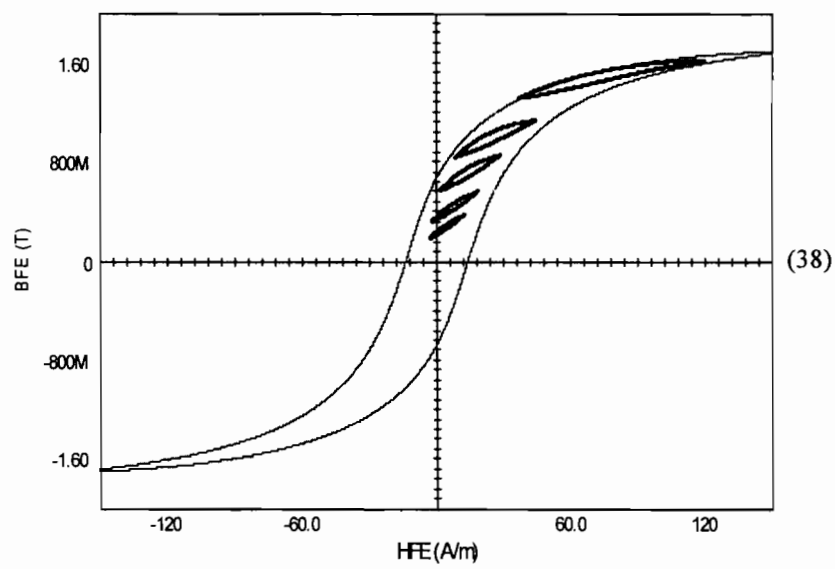


Fig. 12