

REALIZAREA ȘI TESTAREA UNUI MODEL-PROTOTIP DE ECHIPAMENT DIN MATERIALE MAGNETICE COMPOZITE

Ing. Vlad BREZOIANU¹, Dr. ing. fiz. Eros Alexandru PĂTROI¹,
Prof. univ. dr. ing. Gheorghe SAMOILESCU², Dr. ing. Eugen MANTA¹,
Dr. ing. Alexandru, IORGA¹, Dr. ing. Delia PĂTROI¹,
Dr. ing. Alexandru LIXANDRU¹, Ing. Nicolae STANCU¹

¹ INCDIE ICPE-CA– București, ²Academia Navală „Mircea cel Bătrân” - Constanța

REZUMAT. Lucrarea prezintă efectuarea măsurătorilor unui miez magnetic de referință- utilizând un tor magnetic și cu ajutorul acestor măsurători a fost calibrat dispozitivul realizat în cadrul unui proiect de cercetare. S-au efectuat experimente în scopul proiectării și elaborării unui prototip de echipament din materiale magnetice compozite și s-a realizat analiza eficienței și preciziei demonstratorului experimental.

Cuvinte cheie: particule nanomagnetice, miez magnetic, tor magnetic, materiale compozite, prototip, tole.

ABSTRACT. The paper presents the measurements of a reference magnetic core - using a magnetic torus and with the help of these measurements the device made in a research project was calibrated. Experiments were performed in order to design and develop a prototype of equipment made of composite magnetic materials and the analysis of the efficiency and accuracy of the experimental demonstrator was performed.

Keywords: nanomagnetic particles, magnetic core, magnetic tor, composite materials, prototype, sheet metal.

1. INTRODUCERE

Materialul compozit este o combinație între două sau mai multe materiale distincte, care la nivel microscopic își mențin proprietățile și structura proprie, dar la nivel macroscopic materialul rezultat apare ca fiind omogen, dar prezintă caracteristici și proprietăți diferite față de fiecare material component în parte. Compozitele sunt materiale multifazice cu o interfață distinctă, iar prin transfer de proprietăți se realizează performanțe deosebite superioare materialelor componente.

Materialele compozite au multe avantaje: calitate superioară; rigiditate și rezistență ridicată raportată la densitate; coeficient redus de dilatare termică; rezistență mare la uzură, coroziune și oboseală; masă scăzută; consum scăzut de energie; viteză scăzută de propagare a fisurii; rezistență bună la umiditate; rezistență mare la tracțiune; rezistență la șoc ridicată; capacitate mare de amortizare a vibrațiilor; siguranță mare în funcționare. Rezistența compozitului la temperatură, coroziune sau oxidare este determinată de natura matricei. Alegerea matricei se face în funcție de utilizare și de modul de

producere a compozitului. Materialele compozite cu matrice polimerică și incluziuni magnetice sub formă de pulbere se utilizează pentru aplicații magnetice. Acestea pot fi: materiale compozite cu matrice metalică magnetică (feromagnetică sau ferimagnetică) și cu incluziuni magnetice; materiale compozite cu matrice metalică magnetică și incluziuni nemagnetice (antiferomagnetice, paramagnetice sau diamagnetice); materiale compozite cu matrice metalică nemagnetică și incluziuni magnetice. Materialele compozite au proprietăți fizice, chimice, magnetice mecanice și electrice care sunt influențate de compatibilitatea și modul de dispunere a elementelor component care se păstrează la temperaturi ridicate [1,2,3].

O metodă folosită pentru obținerea materialelor compozite moi este presarea incluziunilor la presiune ridicată astfel încât fiecare grăunte de material-exemplu, pulberea de fier este procesată și are un strat izolator magnetic-în scopul ca materialul să devină mai performant și de a limita pierderile prin curenți turbionari. Fierul este unul din materialele metalice de matrice și prezintă proprietăți de excepție-rezistență mecanică specifică și modul de elasticitate, la care de adaugă conductivitate termică

și electric mare, stabilitate dimensională, porozitate scăzută, rezistență mare la aprindere și capacitate bună la prelucrare [3,4,5]

Materialelor compozite se folosesc ca ecrane magnetice, ca instrumente de măsurare, senzori magnetici, dispozitive electromagnetice, bobine de impedanță, transformatoare unde avem o valoare cât mai mare a permeabilității magnetice în tot spectrul frecvențelor și valori scăzute ale pierderilor.

2. EFECTUAREA DE MASURATORI PENTRU UN MIEZ MAGNETIC

Aliajele FeSi au și alte elemente suplimentare de aliere. La creșterea compoziției de Si se observă cum: câmpul coercitiv scade datorită compoziției chimice, dimensiunii grăunților cristalini și orientarea cristalografică; inducția magnetică de saturație descrește, de la 2.15 T pentru fier pur, la 1,3 T pentru aliaje; rezistivitatea electrică crește, de la $9,8 \times 10^{-8} \Omega m$ la $70 \times 10^{-8} \Omega m$ pentru aliaje; magnetostricțiunea aliajului descrește, de la $\lambda_{100} > 20 \times 10^{-6}$ și $\lambda_{111} < -20 \times 10^{-6}$, la $\lambda_{100} = 0.5 \times 10^{-6}$ și $\lambda_{111} = 2 \times 10^{-6}$, toate pentru aliaje cu concentrația de siliciu de 6,5 %. Pentru a estima proprietățile magnetice ale materialelor utilizate în miezurile magneților este folosită o procedură de măsurare care menține o formă de undă sinusoidală a magnetizării în timpul măsurătorii, prin implementarea unui control digital recursiv. Sistemul de măsurare este alcătuit dintr-o sursă de alimentare, o rezistență sunt, un cadru Epstein, eșantionul de material magnetic, un convertor analog-digital, un convertor digital-analog și un calculator ce controlează procesul și stochează datele măsurate. În sistemul de măsură utilizat, calculatorul și programul de control au rolul de a comanda procedura de măsurare prin intermediul convertorului analog-digital și convertorului digital-analog, folosind calculatorul. La fiecare iterație calculatorul calculează forma de undă necesară a curentului de excitație pentru a obține forma de undă dorită. Determinarea mărimilor caracteristice ciclului de histerezis magnetic se obțin din măsurarea mărimilor electrice: intensitatea curentului de magnetizare $i(t)$ din primarul cadrului Epstein și tensiune $u_2(t)$ în secundarul cadrului. Astfel, intensitatea câmpului magnetic, $H(t)$, ce acționează asupra eșantionului S este egală cu raportul dintre produsul numărului de spire din bobina secundară a cadrului Epstein și curentul de magnetizare, și lungimea bobinei. Sursa calculatorului este controlată prin, și lungimea bobinei. Sursa calculatorului este controlată prin intermediul tensiunii generate cu convertorul digital-analog. [6, 7, 8, 9,10, 11, 12]

S-a realizat un miez laminat din tole FeSi (de grosime 1 mm) în formă de I și jugurile în formă de

U. Circuitul magnetic închis, format din miezurile sub cele două forme, este omogen și se realizează măsurarea directă a tensiunii și curentului. Integratorul RC permite integrarea tensiunii induse și obținerea dependenței dintre inducția magnetică, B și intensitatea câmpului magnetic, H . Această caracteristică este comparată cu caracteristica valorilor obținute ale lui B și H prin bobinele de măsură ale demonstratorului realizat. În cazul unui circuit integrator RC pasiv, intrarea este conectată la rezistență, iar tensiunea de ieșire este preluată de la condensator. Folosind ca semnal de intrare o undă sinusoidală, integratorul RC va acționa ca un filtru trece jos, cu pas redus, deasupra punctului său de întrerupere. Pentru un circuit integrator RC, semnalul de intrare este aplicat rezistenței, iar cantitatea de sarcină stabilită pe plăci este dependentă de intervalul de timp al curentului, deoarece condensatorul este dependent de frecvență. Rata de încărcare sau descărcare a condensatorului este direct proporțională cu produsul dintre rezistență și capacitate. Constanta de timp a circuitului integrator RC reflectă timpul pentru încărcarea condensatorului până la 63,2%, din tensiunea maximă sau descărca până la 36,8% din aceeași tensiune.

Semnalele măsurate de osciloscop au fost achiziționate cu integratorul pasiv și sunt prelucrate în MATLAB, iar rezultatele au fost reprezentate sub formele de undă pentru mărimile de câmp B și H . Semnalele măsurate de osciloscop au fost achiziționate cu integratorul pasiv și sunt prelucrate în MATLAB, iar rezultatele au fost reprezentate sub formele de undă, pentru mărimile de câmp B și H . - figura 1,2.[1]



Fig.1. Echipamentul de măsură și achiziție cu integratorul RC și bobinele de măsură B , H [1].

Calculăm expresia tensiunii magnetomotoare, iar intensitatea câmpului magnetic $H(t)$ se determină cu relațiile:

$$\oint_r \vec{H}(t) d\vec{l} = Ni(t) \rightarrow i(t) = \frac{H(t)l_m}{N} \rightarrow u_R(t) = u_x(t) \quad (1)$$

$$Ri(t) = \frac{Rl_m}{N} H(t) \rightarrow H(t) = \frac{N}{Rl_m} u_x(t) = k_x u_x(t)$$

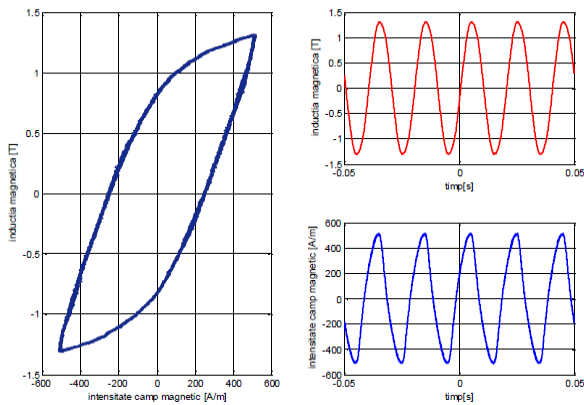


Fig. 2. Ciclu de histeresis și graficele B(t), H(t) pentru curentul de excitație I = 50 mA[1].

Valorile bobinelor de excitație și ale rezistenței R sunt: R = 1 Ω; N = 2061 spire, iar lungimea medie a circuitului magnetic este l_m = 300 mm.

Pe aceste bobine se măsoară tensiunea magnetomotoare care este proporțională cu intensitatea curentului de excitație. Pentru H se ia constanta de proporționalitate, k_x, de valoare :

$$k_x = \frac{N}{Rl_m} = 6870 \text{ [A/Vm]} \quad (2)$$

Expresia tensiunii corespunzătoare pentru inducția câmpului magnetic, B(t), este determinată cu relațiile:

$$\frac{1}{(\omega R_c C)} \ll 1 \rightarrow i_c(t) \cong \frac{u(t)}{R_c}$$

$$u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = NA \frac{dB(t)}{dt} \quad (3)$$

$$N * A * B(t) = \int u(t) dt$$

$$u_c(t) = u_y(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = \frac{1}{CR_c} \int u(t) dt = \frac{N * A}{R_c C} * B(t)$$

$$B(t) = \frac{R_c C}{N * A} u_y(t) = k_y u_y(t)$$

Valorile parametrilor sunt: R_c = 320 kΩ; C = 1 μF, A = 100 mm². Constanta de proporționalitate pentru inducția magnetică, k_y, este :

$$k_y = \frac{R_c C}{N * A} = 1.5526 \text{ [T/V]} \quad (4)$$

Pentru a etalona bobinele de măsură se realizează o integrare hardware și una software . Apoi se face o comparație între ciclurile de histeresis obținute la același curent de excitație, cu ajutorul integratorului RC (integrare hardware) și cu ajutorul bobinelor de măsură din cadrul demonstratorului experimental (integrare software).

Apar diferențe între valorile intensității câmpului magnetic, H. Aceste diferențe sunt legate de con-

strucția demonstratorului experimental și de performanța integratorului pasiv RC.

INC DIE ICPE-CA a realizat materiale ce au dus la realizarea părților componente ale dispozitivului experimental. Aceste materiale au fost caracterizate magnetic cu ajutorul măsurătorilor. S-au ridicat caracteristicile statice ale eșantioanelor compozite tip pulbere. Această caracterizare permite evaluarea valorii permeabilității magnetice pentru estimarea fluxului de dispersie din cadrul demonstratorului experimental.

S-au folosit pulberi cu particule α-Fe cu dimensiunea de aproximativ 40 μm, pulberi de Fe-carbonil și pulberi de FeNi. S-au analizat pierderile de putere prin calcul și experimental pentru FeNi-figura 3

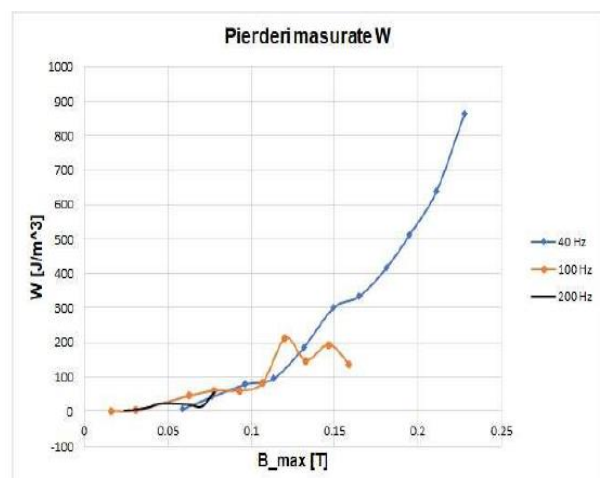


Fig. 3. Pierderi pentru FeNi [1].

S-au realizat nanocompozite bazate pe nanopulbere de FeSi. Miezurile nanocompozite au fost fabricate prin sinterizare și presare în matrițe având ca scop păstrarea sinusoidală a formei de undă a inducției magnetice. S-a realizat calculul și s-au măsurate pierderile rezultate din măsurători pentru miezul laminat de FeSi-figura 4.

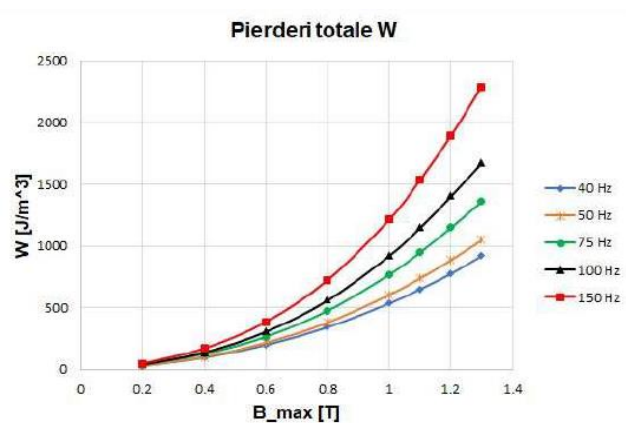


Fig. 4. Pierderi rezultate pentru un miez nanocompozit de FeSi-[1].

3. DEMONSTRATORUL EXPERIMENTAL ȘI DETERMINAREA PIERDERILOR ÎN MIEZURILE MAGNETICE

Pentru caracterizarea unui miez magnetic trebuie să realizăm studiul comportării materialelor feromagnetice și a celor compozite în game de frecvență, deoarece trebuie să ținem seama de proprietățile materialului, de forma și dimensiunile miezului, toate influențând comportarea dispozitivului de realizat.

Pentru caracterizarea materialului în jurul unei anumite stări (definită prin \mathbf{B} , \mathbf{H}) se utilizează următoarele permeabilități magnetice relative: permeabilitatea static- $\mu_{st} = \mathbf{B}/\mu_0 \mathbf{H}$; permeabilitatea diferențială- $\mu_{dif} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} (\Delta \mathbf{B}/\mu_0 \Delta \mathbf{H})$ în sens direct, care este proporțională cu panta curbei $\mathbf{B}=\mathbf{B}(\mathbf{H})$ cu creșterea lui \mathbf{H} ; permeabilitatea dinamică - $\mu_d = (\Delta \mathbf{B}/\mu_0 \Delta \mathbf{H})_{\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{H}_0, \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}_0}$, care este proporțională cu panta medie a ciclului deschis de material în jurul stării \mathbf{H}_0 , \mathbf{B}_0 ; permeabilitatea reversibil- $\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} (\Delta \mathbf{B}/\mu_0 \Delta \mathbf{H})_{\mathbf{H}_0, \mathbf{B}_0}$, care este proporțională cu panta ciclului reversibil descris în jurul stării \mathbf{H}_0 , \mathbf{B}_0 ; permeabilitatea inițială - $\mu_i = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} (\Delta \mathbf{B}/\mu_0 \Delta \mathbf{H})_{\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{H}_0, \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}_0}$, caracterizează panta în primul domeniu de reversibilitate (în jurul stării \mathbf{H}_0 , \mathbf{B}_0).

Materialele feromagnetice și cele compozite pe bază de fier se transformă în paramagnetice la temperaturi mai mari decât temperatura Curie.

Deoarece miezurile magnetice compozite sunt foarte complexe din punct de vedere al caracterizării magnetice, demonstratorul realizat oferă un mijloc de măsurare a dependenței $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ în miezuri magnetice compozite, permite identificarea parametrilor necesari estimării pierderilor magnetice pentru anumite regimuri de funcționare sinusoidale.

Pierderile de energie ale câmpului magnetic sunt datorate pierderilor prin curenți turbionari, care se datorează curenților induși în material și sunt invers proporționale cu rezistivitatea acestuia. Într-un material feromagnetic introdus în câmp magnetic variabil se induce, conform inducției electromagnetice, tensiuni electromotoare, care generează curenți turbionari. Pentru a micșora pierderile prin curenții turbionari este necesar ca: grosimea materialului să fie mică (tole sau pulbere); rezistivitatea să fie cât mai mare (material compozite feromagnetice); să scădem conductivitatea materialului. Pierderile prin histerezis depind numai de forma curbei de histerezis, reducerea lor fiind determinată de utilizarea unor materiale cu un ciclu histerezis de suprafață cât mai mică. Pierderile prin magnetizare provin din rămânerea în urmă a inducției la variații rapide ale intensității câmpului magnetic, fenomen de natura unei vâscozități termice.

4. CONCLUZII

Proprietățile materialelor compozite pe bază de fier le conferă o largă aplicabilitate practică în îndeplinirea unor funcții specifice: de miez magnetic; neliniare și parametrice; de generare a câmpului magnetostatic; de înregistrare magnetică a informației; de ecran magnetic; de traductor piezomagnetic și de temperatură.

Au fost efectuate măsurători magnetice utilizând un tor magnetic de referință. Cu ajutorul acestei măsurători a fost calibrat dispozitivul realizat în cadrul proiectului. Pentru creșterea preciziei măsurătorilor ansamblul de bobine a fost realizat astfel încât să se realizeze ecranarea acestuia, pentru ca fluxul de dispersie să fie direcționat spre miezuri iar materialele folosite să aibă permeabilitate scăzută. În cadrul echipamentului folosit de măsură și achiziție cu integratorul RC și bobinele de măsură s-a urmărit achiziția datelor, filtrarea și procesarea semnalelor în mediul Matlab, precum și integrarea lor cu acuratețe. S-a realizat compararea datelor măsurate cu cele obținute din simulări și cu datele experimentale în vederea determinării valorilor constantelor de integrare aferente bobinelor de măsură folosite pentru a determina \mathbf{H} și \mathbf{B} .

BIBLIOGRAFIE

- [1] Ioniță Valentin, *Predeterminarea pierderilor de energie pentru proiectarea îmbunătățită a miezurilor nano-compozite moi în aplicații având game extinse de frecvență* – Proiect 70PED, 2018
- [2] Mehdi Zamanpour, *Cobalt-based Magnetic Nanoparticles: Design, Synthesis and Characterization*, Dissertation Northeastern University, Boston, 2014
- [3] Lupescu Mihai Bogdan, *Fibre de armare pentru material compozite*, Editura Tehnică, 2004
- [4] Carcea Ioan, *Materiale compozite*, Editura Politehnică, 2008
- [5] Sun S., C. B. Murray, D. Weller, L. Folks and A. Moser, *Monodisperse FePt Nanoparticles and Ferromagnetic FePt Nanocrystal Superlattices*, Science, 287, 2000
- [6] V. Paltanea, G. Paltanea and H. Gevrila, "Magnetic anisotropy in silicon iron alloys", *Electrical and Electronic Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 383-388, 2012.
- [7] F. Fiorillo, *Measurement and characterization of magnetic materials*, Elsevier Academic Press, 2004.
- [8] ***I. E. Commission, *Magnetic materials - Part 4-2: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials*, 2010.
- [9] Pricop Valentin, *Efectele histerezisului din materialele folosite pentru circuitele magnetice din acceleratoarele de particule*, Universitatea Transilvania, Brașov, 2016
- [10] Blanc-Beguine F, Nabily S, Gieraltowski J, Turzo A, Querellou S, Salaun PY, *Cytotoxicity and GMI bio-sensor detection of maghemite nanoparticles internalized into cells*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321, 192-197, 2009.
- [11] Cavalli G, Banu S, Ranasinghe T, Broder GR, Martins HFP, Neylon C, Morgan H, Bradley M, Roach PL,

CERCETARE ȘI EXPERTIZĂ INGINEREASCĂ LA CONSTANȚA

Multistep synthesis on SU-8: combining microfabrication and solid-phase chemistry on a single material, Journal of Combined Chemistry, 9, 462–472, 2007.

[12] Carroll K, *Core-shell Nanoparticles: Synthesis, Design, and Characterization*, Ph.D. Dissertation, Virginia Commonwealth University, 2007

Despre autori

Ing. **Vlad BREZOIANU**,
INCDIE ICPE-CA

Absolvent al Facultății de Inginerie Electrica, în cadrul Universității Politehnica București, secția de Instrumentație și Achiziție de date promoția 2019. Este masterand în cadrul aceleiași facultăți la specializarea Sisteme inteligente de instrumentație și măsurare. Este asistent de cercetare științifică în cadrul Departamentului de materiale magnetice avansate, laboratorul de compatibilitate electromagnetica, în cadrul INCDIE ICPE-CA. Deține cunoștințe solide și s-a specializat pe măsurări electrice și magnetice, electronică de semnal, automatizări, programare (C#). A scris 3 articole-1 ISI și 2 BDI

Dr.ing.fiz. **Eros Alexandru PĂTROI**
INCDIE ICPE-CA

Absolvent a Universității București, Facultatea de Fizică și cercetător științific I la INCDIE ICPE-CA. Este director științific al Institutului. Este doctor în Inginerie Electrică, titlu obținut la Universitatea Politehnica București. A efectuat stagii de pregătire pentru redactarea tezei în Italia la L' Instituto Nazionale di Ricerca Metrologico, Torino. Este master în Magnetism Tehnic și Aplicat. A obținut medalii și premii, a scris 40 de articole în reviste ISI și a obținut 8 brevete de invenție. A scris 2 cărți de specialitate și este membru în proiecte de cercetare.

Prof. dr. ing. **Gheorghe SAMOILESCU**
Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța

Este absolvent al Institutului de Marină- Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța și este cadru didactic la această instituție din 1991, iar din anul 2007 este profesor universitar, ocupând de-a lungul anilor diverse funcții de conducere în managementul învățământului universitar și a cercetării. Deține o invenție, 7 premii pentru cărți în domeniul știință și Tehnică, a scris 4 tratate și 30 cărți și peste 200 articole publicate în reviste științifice sau comunicate la conferințe și simpozioane naționale și internaționale. Membru AGIR și vicepreședinte al Filialei AGIR Constanța, precum și membru al următoarelor asociații: SRPRNI, Asociația Internațională a Inginerilor din Construcția de Mașini, IEEE, Asociația de Compatibilitate Electromagnetică din România etc.