

Proiect nr. 70PED din 03/01/2017 (PN-III-P2-2.1-PED-2016-0451)

**PREDETERMINAREA PIERDERILOR DE ENERGIE
PENTRU PROIECTAREA ÎMBUNĂTĂȚITĂ A MIEZURILOR
NANOCOMPOZITE MAGNETICE MOI ÎN APLICAȚII
AVÂND GAME EXTINSE DE FRECVENȚE**

Acronim: ELIDEF

Raport final

Etapa I: Elaborarea modelului conceptual, proiectarea si realizarea demonstratorului experimental

Etapa II: Testarea demonstratorului experimental

Durata: 03 ianuarie 2017 - 30 iunie 2018

Parteneri:

- ▶ ***Universitatea Politehnica din București (Coordonator)***
- ▶ ***Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrică
ICPE - CA București***

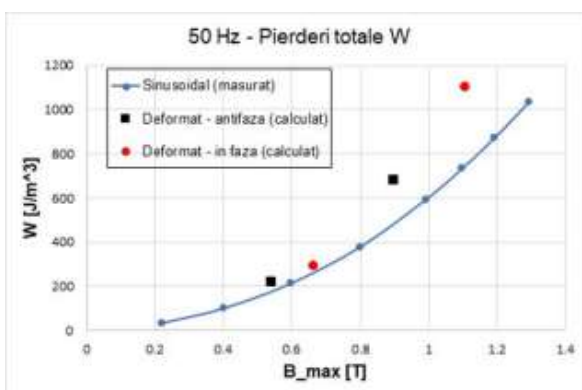
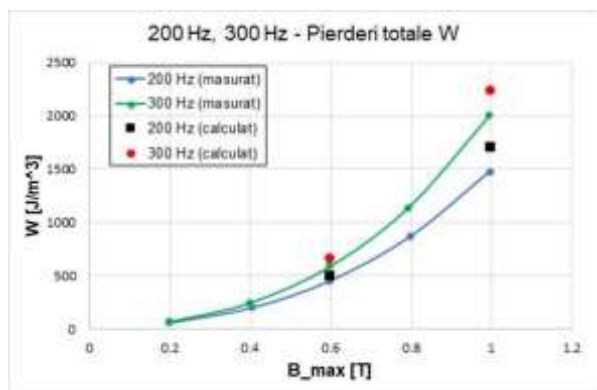
Director de proiect: Prof. univ. dr. ing. **Valentin IONIȚĂ**
(Universitatea Politehnica din București)

REZUMAT

Proiectul răspunde dezideratului actual privind consumul redus de energie și calitatea acesteia, ceea ce impune o proiectare cât mai bună a tuturor echipamentelor implicate în producția, distribuția și utilizarea energiei electrice. Studiile efectuate corespund schimbării profilului actual al consumatorului spre sarcini puternic neliniare, deformante, și răspândirea surselor de energie regenerabilă ce au crescut interesul pentru proiectarea miezurilor magnetice cu pierderi reduse atât ale mașinilor și transformatoarelor electrice, cât și ale componentelor magnetice miniaturizate din electronica de putere. Materialele magnetice compozite abordate în proiect constituie o soluție frecvent utilizată în acest moment, dar pierderile de putere aferente nu sunt suficient înțelese pentru frecvențe mai mari sau pentru regim nesinusoidal.

Conceptul de predeterminare a pierderilor formulat de către echipa consorțiului se bazează pe calculul în domeniul timp, spre deosebire de metoda clasică a formulelor aproximante în frecvență. A fost astfel posibilă extinderea gamei de frecvență a aplicațiilor, metoda de predeterminare a pierderilor fiind validată sistematic prin măsurători efectuate cu demonstratorul experimental realizat.

Proiectul a permis concepția, proiectarea, fabricarea și testarea unui dispozitiv de măsurare a miezurilor magnetice clasice (laminare) sau nanocompozite, cu scopul validării experimentale a tehnologiei de predeterminare a pierderilor magnetice în astfel de miezuri, pentru o gamă extinsă de frecvențe. Totodată, demonstratorul experimental a permis caracterizarea unor materiale nanocompozite, în scopul îmbunătățirii lor pentru a avea pierderi reduse. Rezultatele proiectului contribuie la îmbunătățirea, din faza de proiectare, a eficienței energetice a echipamentelor ce conțin miezuri magnetice, printr-o predeterminare mai precisă a pierderilor magnetice (în fier) la frecvențe mai mari sau regim deformant (cu armonici) impuse de condițiile reale de lucru. Astfel, au fost identificate valorile parametrilor energetici din formulele de estimare a pierderilor magnetice clasice, prin histerezis și excedentare, precum și funcțiile de prognoză valabile la frecvențe mai înalte.



OBIECTIVE PREVĂZUTE ȘI REALIZATE

Planul de realizare inițial a fost **integral îndeplinit**, obiectivele, activitățile și rezultatele fiind sintetic prezentate în continuare:

Obiective prevăzute	Realizări
O1. Dezvoltarea unui model conceptual pentru validarea și testarea conceptului de predeterminare a pierderilor magnetice în miezuri compozite.	- Identificarea restricțiilor dimensionale și funcționale impuse demonstratorului, selectarea soluțiilor alternative conceptuale. - Analiza tehnico-economică a soluțiilor identificate și definitivarea modelului conceptual. - Proiectarea experimentelor necesare identificării parametrilor de material și validării conceptului predeterminării pierderilor.
O2. Proiectarea demonstratorului experimental conform cerințelor identificate.	- Proiectarea bobinelor de excitație și a circuitului de alimentare, proiectarea bobinelor de măsură și a circuitului de achiziție a datelor experimentale, simularea și optimizarea numerică a circuitului magnetic. - Realizarea proiectului de execuție a subansamblor.
O3. Fabricarea și testarea dispozitivului experimental de laborator.	- Realizarea structurii mecanice, a bobinelor de excitație, a bobinelor de măsură și a circuitelor de alimentare, măsură și achiziție a datelor experimentale. - Elaborarea și implementarea suportului software pentru achiziția, vizualizarea și prelucrarea datelor experimentale. - Testarea dispozitivului pentru un miez laminat din FeSi.
O4. Proiectarea și realizarea unor miezuri magnetice moi nanocompozite (SMnC).	- Identificarea cerințelor tehnologice și de materiale pentru fabricația nanopulberilor și a miezurilor SMnC dorite. - Producerea nanoparticulelor, a pulberilor mixate și realizarea miezurilor SMnC. - Măsurarea parametrilor și curbelor de magnetizare cuasi-staționare pentru nanopulberi și esantioane din compozitele realizate.
O5. Validarea experimentală a metodei predeterminării pierderilor pentru gamă extinsă de frecvențe.	- Testarea funcționalității demonstratorului experimental la 50 Hz și calibrarea sa. - Efectuarea experimentelor proiectate și elaborarea rapoartelor de măsurare. - Estimarea pierderilor în miezuri laminate și nanocompozite pentru game extinse de frecvență, identificarea condițiilor de aplicabilitate a conceptului formulat și enunțarea concluziilor. - Analiza eficienței și preciziei demonstratorului experimental pentru frecvențe extinse și regimuri nesinusoidale.
O6. Modelarea comportării materialelor magnetice prin parametri numerici aferenți pierderilor.	- Identificarea valorilor parametrilor energetici caracteristici miezurilor laminate și nanocompozite pe baza setului de măsurători la frecvențe și amplitudini diferite. - Identificarea parametrilor modelului de histerezis Preisach ce permite calculul precis a fiecărei componente a pierderilor în miezul magnetic.

Activitățile aferente obiectivelor O1-O4 au fost desfășurate în etapa I (2017), raportul științifico-tehnic (RST) nr. 1 detaliind cele **5 rapoarte de cercetare (livrabile)** prevăzute în Planul de realizare. Celelalte două obiective O5-O6 au fost îndeplinite în etapa II (2018), raportul științifico-tehnic (RST) nr. 2 detaliind cele **3 rapoarte de cercetare (livrabile)**.

REZULTATE ESTIMATE ȘI REALIZATE

Rezultatele estimate în propunerea de proiect **au fost realizate în totalitate**, fiind prezentate pe larg în cele 2 Rapoarte științifico-tehnice (RST) aferente etapelor contractului. **Principalele rezultate ale cercetării efectuate au condus la realizarea demonstratorului experimental și a pachetului software ce permite predeterminarea pierderilor în miezuri**

magnetice, diseminarea prin articole și comunicări științifice fiind mult mai bogată decât fusese inițial propusă.

Studiul tehnic a pornit de la **identificarea restricțiilor dimensionale și funcționale** ce trebuie respectate de soluțiile constructive alternative ce au fost analizate economic și implementate practic, în vedere realizării demonstratorului experimental. Au fost analizate și simulate numeric construcția cu un singur jug (fig. 1a), respectiv cu două juguri simetrice (fig. 1b). De asemenea, s-au analizat și diverse soluții de plasarea a bobinelor de excitație pentru a obține un câmp magnetic uniform în materialul investigat și suficient de puternic pentru a-l putea satura.

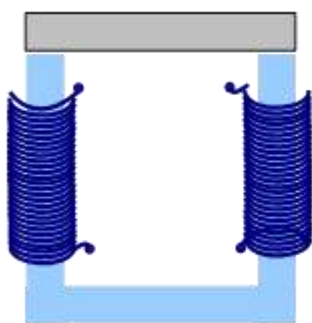


Fig. 1a. Soluția constructivă cu un singur jug.

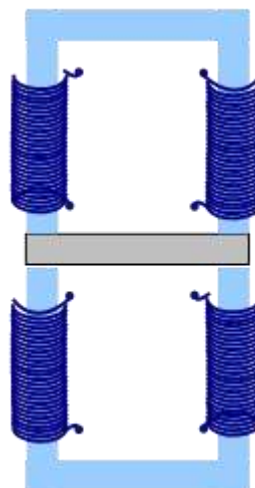


Fig. 1b. Soluția constructivă cu două juguri simetrice.

Simulările realizate, bazate pe metoda elementelor finite (programul FEMM), au considerat frecvențe reprezentative (0 Hz, 50 Hz, 400 Hz) și s-au folosit diverse materiale pentru jug (Fe moale, tole de FeSi, ferită). Analiza rezultatelor a arătat necesitatea folosirii unui jug laminat și a condus la dimensionarea bobinelor de excitație. La frecvențe mai mari, dispersia câmpului magnetic în zona miezului este mare și necesită o soluție adaptată – vezi fig. 2.a pentru a asigura uniformitatea magnetizării miezului studiat (fig. 2.b).

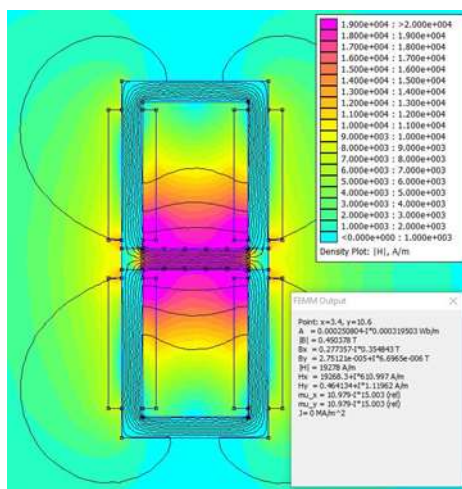


Fig. 2. Spectrul liniilor de câmp magnetic la 400 Hz (stânga) și uniformitatea magnetizării miezului (dreapta).

Analiza rezultatelor a arătat că bobinele de excitație trebuie să asigure o solenatie suficient de mare pentru saturarea esantionului, dar și un control fin al acestei solenatii, pentru

parcursul de saturare a esantionului. Uniformitatea campului magnetic in zona centrala a esantionului si in vecinatatea sa este suficient de buna pentru a permite plasarea bobinelor de masura, dar o corectie (mediere) software este necesară la frecvente mai mari. Dispozitivul prezinta o dispersie foarte mare a campului magnetic daca jugul se satureaza, deci esantionul de masurat trebuie corelat cu materialul jugului.

Soluțiile constructive identificate au fost **analizate din punct de vedere tehnico-economic**, în vederea estimării costurilor implicate, mai ales în producerea nanopulberilor din care se fabrică esantionul de investigat. Calculația aferentă fiecărei etape tehnologice pentru fiecare tip de material (nanoparticule de Fe, FeCo, FeNi și microparticule de α -Fe) este prezentată în RST-1. Au fost realizate doua variante constructive de jug magnetic: din Fe moale masiv (puritate ridicata, pentru frecvențe joase) si din tole de FeSi (pentru frecvente superioare corespunzatoare armonicilor deformante). Bobinele de excitatie au fost realizate in doua infasurari, pentru un control mai bun al campului magnetic creat in circuitul magnetic. Totodata, se poate folosi un circuit magnetic in forma de U+I+U, daca este nevoie de o solenatie mai mare pentru saturarea esantionului. Dată fiind dispersia din zona miezului, s-a optat pentru plasarea mai multor bobine de camp, cate una pe fiecare fata a esantionului de sectiune patrata, pentru a compensa neuniformitatea campului magnetic.

Experimentele necesare colectării datelor măsurate au fost proiectate pe categorii: experimente pentru caracterizarea pulberilor magnetice și a nanocompozitelor în regim cuasi-static, experimente pentru determinarea curbei de magnetizare statice a materialelor din care este confecționat circuitul magnetic al demonstratorului, experimente de calibrare a demonstratorului, experimente de măsurare a pierderilor în esantion, experimente de validare a metodei de predeterminare a pierderilor.

Circuitul magnetic si bobinele de excitatie au fost proiectate pornind de la modelul conceptual elaborat anterior, optandu-se pentru doua variante dimensionale si 4 bobine de excitatie, fiecare avand cate 2 sectiuni bobinate (660/780 spire) una peste cealalta – vezi fig. 3. Tensiunea aplicată bobinelor de excitație este generată de un generator de semnal de frecvență variabilă și amplificată înainte de intrarea pe bornele bobinelor. Prezența amplificatorului permite un reglaj suplimentar ce se adaugă celui asigurat de potențiometrul generatorului de semnal. Schimbarea schemei de conexiuni serie / paralel / mixt a celor 8 secțiuni ale bobinelor permite adaptarea alimentării la tipul materialului măsurat și la amplitudinea dorită a excitației.

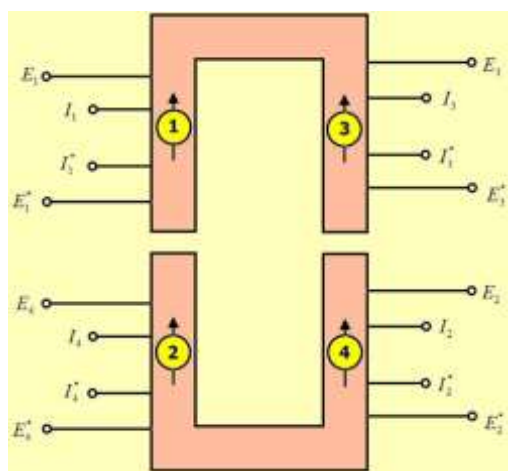


Fig. 3. Circuitul magnetic și bornele bobinelor de excitație:

(I, I*) – bornele secțiunilor interioare,
(E, E*) – bornele secțiunilor exterioare.
Bornele marcate corespund asigurării sensului fluxului magnetic prin miez în coloanele 1, 2, 3 și 4.

Simularea si optimizarea numerica a circuitului magnetic pentru frecvențe până în 500 Hz a confirmat validitatea modelului conceptual, permițând și verificarea uniformității inducției magnetice în interiorul esantionului, respectiv a intensității câmpului magnetic în imediata lui apropiere. S-au ales aceste zone de interes în raport cu poziționarea bobinelor ce culeg aceste informații în cadrul demonstratorului experimental: pentru inducția magnetică s-a

studiat zona centrală a eşantionului pe circa 3 cm (lungimea aproximativă a bobinei pentru B), iar pentru intensitatea câmpului magnetic studiul a vizat circa 4 mm în afara eşantionului, pe o lungime de 2,5 cm (lungimea aproximativă a bobinei pentru H).

Bobinele de măsură sunt astfel concepute încât să permită achiziția mărimilor câmpului magnetic: intensitatea câmpului magnetic lângă eşantion și inducția câmpului magnetic prin secțiunea eşantionului. Cele două mărimi rezultă din integrarea și scalarea tensiunilor induse în bobinele de măsură. Circuitul de măsurare cuprinde o bobină destinată măsurării tensiunii induse de variația fluxului magnetic prin secțiunea transversală a materialului investigat și 4 bobine plasate pe fiecare față a jugului median (eşantionul investigat) în care se induc tensiuni datorită variației fluxului magnetic în aer, în imediata proximitate a eşantionului. S-a verificat prin simulări numerice că inducția magnetică rămâne constantă în secțiunea eşantionului pe toată lungimea bobinei de măsură, deci tensiunea indusă măsurată va fi proporțională cu derivata inducției magnetice. Cele 4 bobine (de câmp) sunt de secțiune transversală minimă, plate, astfel încât tensiunea indusă măsurată va fi proporțională cu derivata inducției magnetice tangențială la eşantion, adică și cu derivata intensității câmpului magnetic tangențială (pentru că $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ în aer) ce se conservă la suprafața eşantionului. S-a optat pentru 4 bobine pentru a verifica uniformitatea câmpului în spațiul din jurul eşantionului. Dimensionarea bobinelor de măsură a avut în vedere inducerea unor tensiuni electromotoare măsurabile și la valori care să permită o prelucrare ulterioară a acestora.

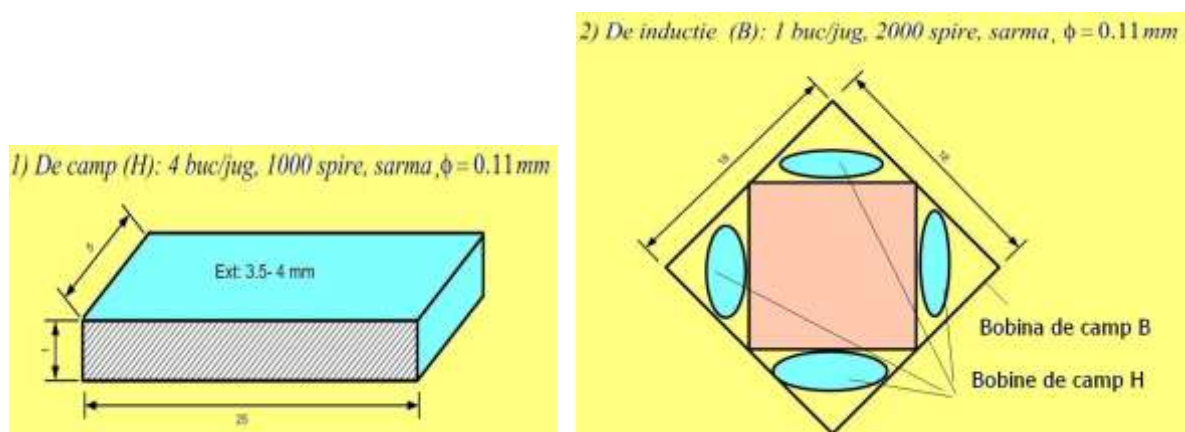


Fig. 4. Amplasarea și caracteristicile bobinelor de măsură

Dimensiunile constructive ale bobinelor de măsură (vezi fig. 4) au permis calcularea constantelor de integrare a tensiunilor măsurate:

$$H(t) = k^H \int_{t_0}^t u_H(t) dt, \quad \text{unde} \quad k^H = \frac{1}{N_1 A_{sp} \mu_0} = 53.078 \cdot 10^6$$

$$B(t) = k^B \int_{t_0}^t u_B(t) dt, \quad \text{unde} \quad k^B = \frac{1}{N_2 A_{miez}} = 5$$

Realizarea proiectului de execuție a subansamblelor a facilitat construcția componentelor demonstratorului experimental. Piesa cea mai complexă ce a fost proiectată și fabricată a fost matrița necesară presării eşantioanelor magnetic compozite – fig. 5.

Realizarea structurii mecanice, a bobinei de excitație, a bobinei de măsură și a circuitelor de alimentare, măsură și achiziție a datelor experimentale a permis definitivarea demonstratorului experimental prezentat în fig. 6.

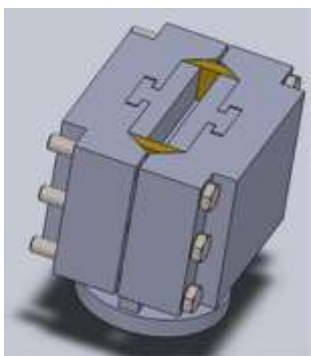


Fig. 5. Ansamblu matrita pentru presarea esantioanelor magnetice 60x10x10 mm, respectiv 70x10x10 mm

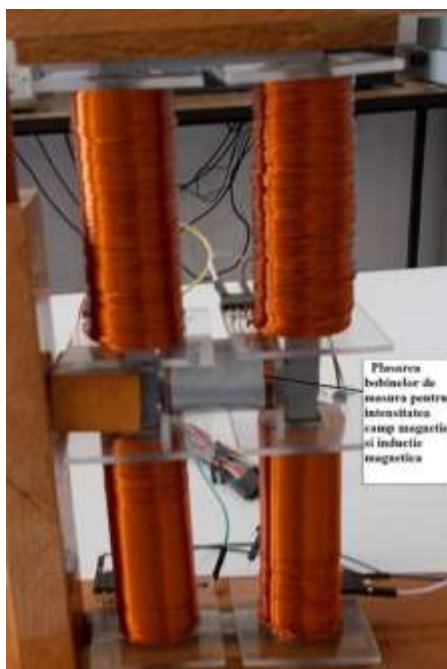


Fig. 6. Prototipul demonstratorului experimental (sus) și plasarea bobinelor de măsură (stânga)

Circuitul de măsură și achiziție a datelor a fost proiectat și realizat cu echipamente și instrumente de măsură din dotarea Laboratorului de Magnetism Tehnic din UPB (<https://erris.gov.ro/LTM-UPB>), având structura din fig. 7.

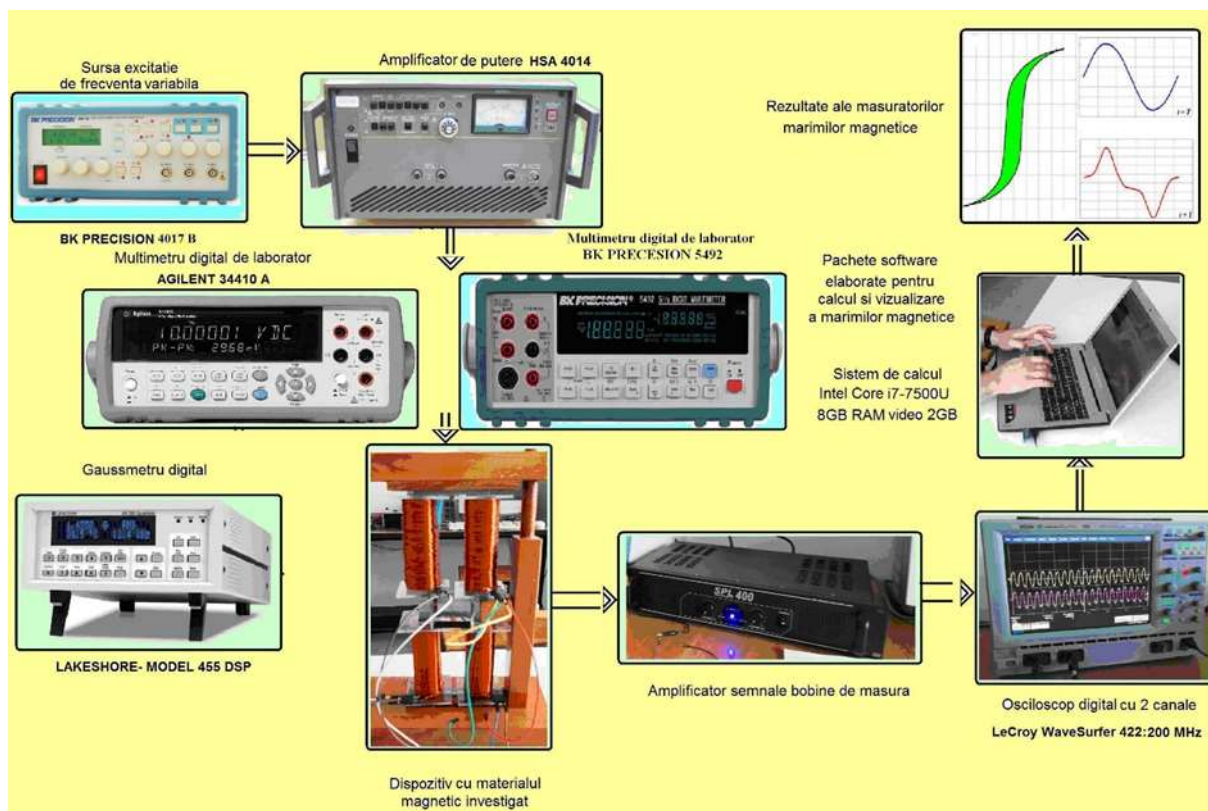


Fig. 6. Circuitul de măsură și achiziție a datelor.

Elaborarea și implementarea suportului software pentru achiziția, vizualizarea și prelucrarea datelor experimentale a fost realizată în mediul MATLAB. Principalele componente software de procesare a datelor experimentale pentru obținerea ciclurilor de histeresis $B(H)$ pentru materialul investigat permit: a) filtrarea numerică a tensiunilor induse în bobinele de măsură, b) scalarea conform constantelor de integrare asociate bobinelor de măsură, c) vizualizarea concomitentă a mai multe semnale prelucrate, în diferite faze ale procesării, d) vizualizarea formei ciclului de histeresis al materialului magnetic investigat.

Proiectarea miezurilor magnetice moi nanocompozite (SMnC) a inclus selectarea tipurilor de miezuri magnetice și de materiale componente specifice diverselor aplicații și game de frecvență, corelat cu identificarea cerințelor tehnologice și de materiale pentru fabricația nanopulberilor și a miezurilor SMnC dorite de către partenerul ICPE-CA. Sinteză cercetărilor efectuate este prezentată pe larg în RST-1.

Realizarea miezurilor SMnC dedicate demonstratorului experimental a implicat producerea nanoparticulelor din Fe, alfa-Fe, FeNi și FeCo, a pulberilor mixate și realizarea miezurilor SMnC cu ajutorul matrițelor special concepute. Materialele obținute au fost caracterizate prin măsurarea parametrilor și curbelor de magnetizare cuasi-stactice pentru nanopulberi și esantioane din compozitele realizate, în vederea verificării proprietăților și a corecției tehnologiei de realizare. După cum se știe, proprietățile pulberilor nanometrice, materialelor nanostructurate și ale nanoparticulelor în soluție sunt puternic dependente de mărimea particulelor, de starea lor de dispersie. Partenerul ICPE-CA a optat pentru efectuarea unor sinteze de laborator ale nanoparticulelor prin reacții în fază lichidă (reducerea sarurilor metalice tranziționale); echipamentele și procesul tehnologic sunt detaliate în RST-1. Investigarea experimentală a fost realizată prin: microscopie electronică cu baleiaj (SEM), difracție de raze X (XRD), spectrofluorimetrie dispersivă de raze X (EDX), spectrometrie prin fluorescență de raze X (XRF) și magnetometrie cu probă vibranta (VSM) la temperatura camerei. Aceste analize au permis corectarea parțială a metodei de obținere pentru

îmbunătățirea purității și omogenității nanopulberilor; s-au obținut nanoparticule de Fe cu dimensiunea (24 – 47 nm) și de FeCo cu dimensiuni cuprinse între 25 – 83 nm. A fost analizată și o pulbere micronica de α Fe realizată pe cale metalurgică la Hoeganaes Europe SA Buzau. Pulberile realizate au fost folosite pentru fabricarea a diferite miezuri compozite, prin compactarea în diferite concentrații, cu ajutorul unei rășini polimerice.

Măsurarea parametrilor și curbelor de magnetizare cuasi-stactice pentru nanopulberi și esantioane din compozitele realizate a fost realizată de către coordonatorul UPB cu ajutorul unui magnetometru cu probă vibrantă VSM-7304 LakeShore. Datele obținute au arătat limitările procesului tehnologic folosit de partenerul ICPE-CA, pulberile comerciale prezentând caracteristici magnetice superioare; rezultatele (curba de magnetizare și cicluri simetrice de histerezis) sunt prezentate pe larg în RST-1.

Calibrarea dispozitivului s-a realizat prin măsurători la 50 Hz, în 2 moduri: cu ajutorul unui integrator RC și cu ajutorul unor bobine Helmholtz. Echipa partenerului ICPE-CA a realizat un miez laminat din tole FeSi (de grosime 1 mm) în formă de I, identic geometric cu esantioanele compozite analizate, din același material ca și jugurile în formă de U. Astfel, circuitul magnetic închis de măsură, format din miezurile U și I este omogen și poate fi analizat prin măsurarea directă a tensiunii și curentului. Un integrator RC (vezi fig. 7) permite integrarea tensiunii induse și obținerea dependenței aproximative (folosind lungimea medie a circuitului magnetic) dintre B și H . Această caracteristică este comparată cu cea obținută prin bobinele de măsură B și H ale demonstratorului conceput, un exemplu fiind cel din fig. 8.

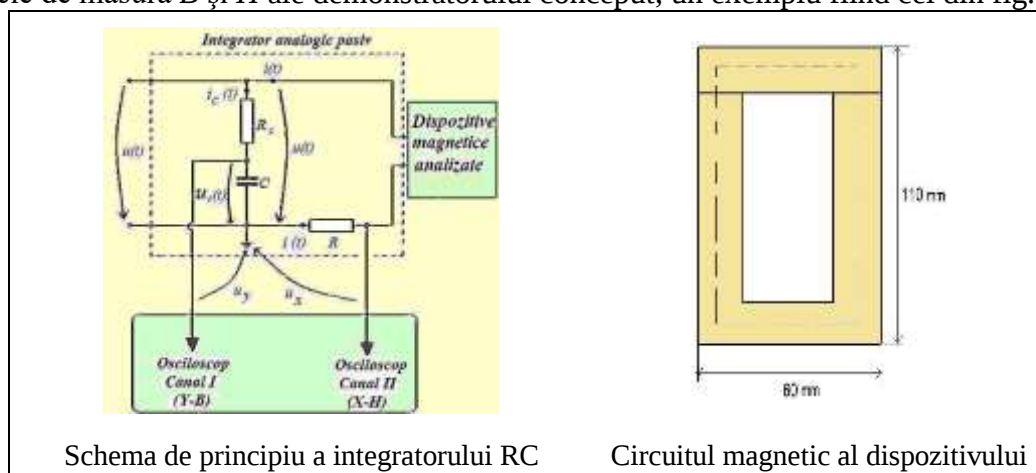


Fig. 7. Schema integratorului RC și jugul magnetic utilizat pentru etalonare.

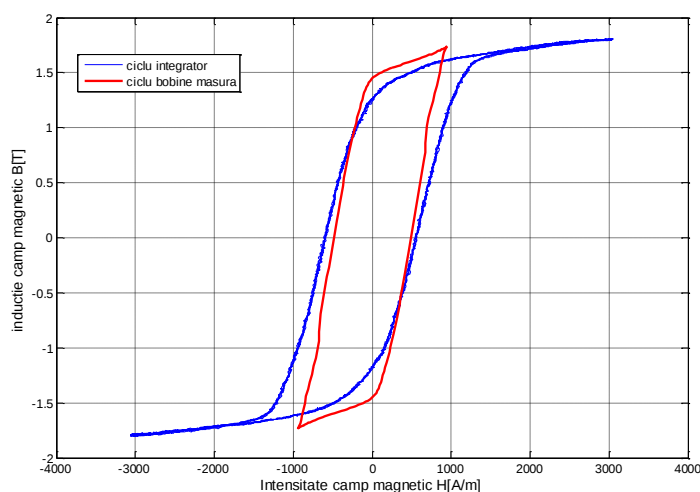


Fig. 8. Cicluri de histerezis măsurate prin metoda integratorului RC și folosind demonstratorul experimental, pentru curentul de excitație $I = 250$ mA.

Diferențele dintre ciclurile experimentale obținute pentru același curent de excitație sunt semnificative pentru valorile lui H . Așadar, putem concluziona că valoarea constantei de proporționalitate asociată bobinei de măsură a inducției magnetice B a fost corect calculată. Diferențele mari obținute pentru valorile lui H sunt legate atât de construcția demonstratorului experimental cât și de limitele de performanță ale integratorului pasiv RC, după cum este explicat în RST-2. Verificarea (calibrarea) bobinelor de măsură s-a realizat și în cadrul unui **sistem de bobine Helmholtz** alimentate în curent alternativ (50 Hz). Montajul conține un osciloscop digital de măsură și achiziție a semnalelor induse în bobinele investigate precum și un gaussmetru care permite măsurarea directă a valorile efective ale inducțiilor câmpului magnetic în bobinele de măsură. Rezultatele arată că valorile inițiale ale constantelor asociate bobinelor de măsură (calculate pe baza geometriei aproximative) $k_H=53.078 \cdot 10^6$ și $k_B=5$ ar trebui **ajustate conform calibrării Helmholtz la valorile medii corectate** $k_H=68.25 \cdot 10^6$ și $k_B=4.359$. Aceste valori vor conduce la valori mai mari cu 28.6% pentru H și valori mai mici cu 12.8% pentru B , ceea ce corespunde cu observațiile de la calibrarea cu integratorul RC.

Echipa UPB a folosit datele măsurate pentru circuitul magnetic laminat închis (U+I), omogen (din tole cu grăunți neorientați FeSi groase de 1 mm), pentru a **testa funcționalitatea modulelor software de achiziție, procesare și prelucrare a datelor ce au fost concepute pentru a determina pierderile în miez**. O parte din modulele software, dedicate achiziției, vizualizării și integrării numerice a semnalelor (tensiunilor) furnizate de bobinele de măsură au fost integrate în pachetul software final. Analiza preliminară a datelor experimentale obținute la frecvența de 50 Hz a arătat **necesitatea ecranării ansamblului bobinelor de măsură**, pentru a capta fluxul magnetic de dispersie la trecerea din armătura U în cea I și pentru a reduce câmpul magnetic închis prin aer ce ar putea fi captat de bobinele de măsură. Totodată, semnalele (tensiunile) achiziționate cu ajutorul osciloscopului digital trebuiesc prelucrate pentru a furniza cicluri de histerezis centrate și simetrice.

Programul de prelucrare și calcul al pierderilor în miezul magnetic a fost realizat în mediul MATLAB, utilizând fișiere de date intermediare de tip EXCEL. Principalele module software și efectul rulării lor sunt prezentate pe larg în RST-2. Funcțiile asigurate de **produsul software elaborat** pot fi astfel grupate:

1. Conversia, simetrizarea și centrarea datelor achiziționate prin osciloscop – fig. 9
2. Salvarea ciclurilor de histerezis, calculul pierderilor măsurate și concatenarea datelor - fig. 10
3. Generarea rețelei de discretizare a planului Preisach și eșantionarea familiei de cicluri conform rețelei fixate pentru planul modelului de histerezis Preisach.
4. Identificarea funcției Everett ce caracterizează modelul Preisach.
5. Identificarea parametrilor de material microstructurali n_0 și V_0 .
6. Calculul estimativ al pierderilor pentru o alta frecvență, altă amplitudine sau pentru o excitație nesinusoidală.

Pierderile totale P sunt calculate pe baza separării pierderilor fundamentată de Bertotti:

$$P = P_h + P_c + P_e \quad (1)$$

Pierderile specifice prin histerezis P_h (în W/kg), mediate pentru o perioadă T sunt:

$$P_h = \frac{1}{\rho T} \int_0^T H_{hyst} \cdot \frac{dB}{dt} dt, \quad (2)$$

unde ρ este densitatea masică. Pentru o inducție dată $B(t)$, H_{hyst} corespunzător este furnizat de modelul Preisach anterior identificat sau interpolând spre frecvențe reduse măsurătorile efectuate. Dacă σ conductivitatea electrică a miezului și B_{max} este inducția magnetică maximă pe o perioadă T , pierderile specifice clasice (prin curenți turbionari) P_c sunt calculate prin:

$$P_c = \frac{\sigma d^2}{8\rho T} \cdot \int_0^T \left[\frac{B(t)}{B_{\max}} \cdot \left| \frac{dB}{dt} \right| \cdot \frac{dB}{dt} + \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \right] \cdot dt , \quad (3)$$

unde d este grosimea tolei (miezului). Dacă $B(t)$ este sinusoidală, se poate folosi formula alternativă:

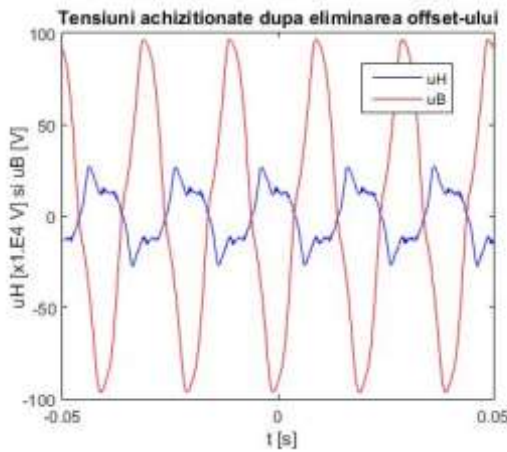
$$P_c = \frac{\sigma d^2}{12\rho T} \cdot \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot dt \quad (4)$$

Pierderile specifice excedentare (în exces, anormale) P_e sunt estimate folosind câmpul excedentar H_e :

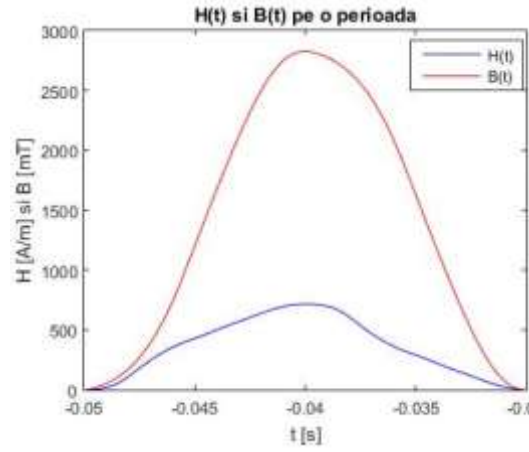
$$H_e = \frac{n_0 V_0}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4\sigma G d l}{n_0^2 V_0} \cdot \frac{dB}{dt}} - 1 \right) , \quad (5)$$

$$P_e = \frac{1}{\rho T} \int_0^T H_e \cdot \frac{dB}{dt} \cdot dt , \quad (6)$$

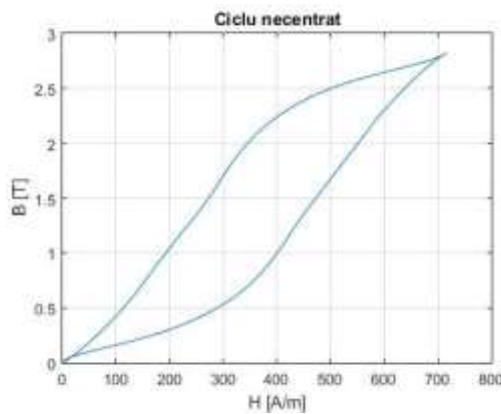
unde l este lățimea miezului și $G=0.1356$ este un parametru microscopic geometric. Parametrii microstructurali n_0 și V_0 sunt identificați pe baza pierderilor măsurate pentru excitații sinusoidale de diferite amplitudini și frecvențe.



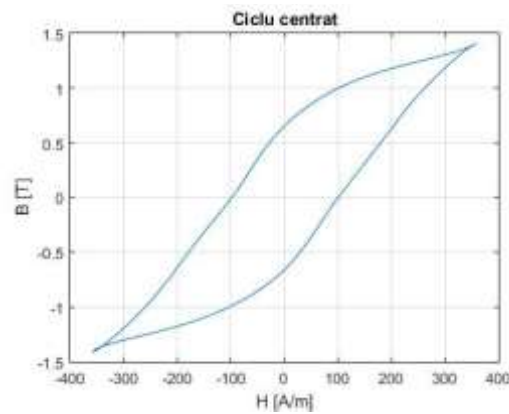
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9. Obținerea ciclului centrat $B(H)$: a) tensiuni măsurate după eliminarea offset-ului, b) $B(t)$ și $H(t)$ obținute prin integrare și scalare pentru o perioadă, c) ciclu $B(H)$ necentrat, d) ciclu $B(H)$ centrat.

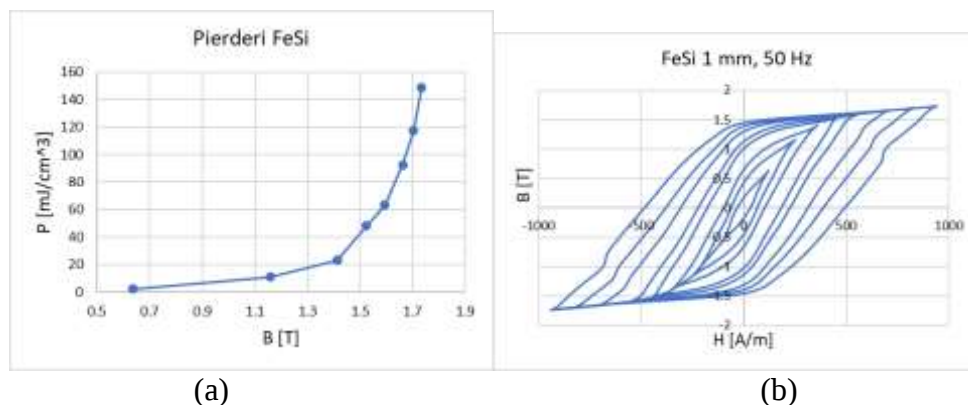


Fig. 10. Pierderi calculate (a) pe baza ciclurilor de histerezis măsurate (b) la 50 Hz pentru miez laminat de FeSi

Analiza eficienței energetice a miezurilor SMnC estimată cu ajutorul demonstratorului experimental de laborator pentru game extinse de frecvență a necesitat mai multe serii de experimente. În conformitate cu planul de realizare al proiectului ELIDEF, partenerul IPCE-CA a sintetizat o serie de materiale ce au dus la realizarea părților componente ale dispozitivului experimental. Aceste materiale au fost caracterizate magnetic cu ajutorul echipamentelor din cadrul celor două instituții partenere. Această **caracterizare preliminară** a permis evaluarea valorii permeabilității magnetice pentru estimarea ulterioară a fluxului de dispersie din cadrul demonstratorului experimental.

S-au folosit materiale destinate utilizării în miezuri magnetice ce funcționează la frecvențe ridicate. **O prima clasă de pulberi au fost preparate de IPCE-CA:** a) particule α -Fe cu dimensiunea de aproximativ 40 μm (denumite alpha-Fe-40micro), b) hematit (α -Fe), dar acoperite cu un strat protector nemagnetic (denumit alpha-Fe-shell), c) Fe-carbonil (denumit în continuare Fe-carbonil), d) pulbere de FeNi (denumită FeNi). Tabelul I prezintă principalele **caracteristici magnetice statice** ale eșantioanelor investigate, observându-se valori modeste ale permeabilității magnetice, ceea ce arată deficiențe în procesul de obținere a nanopulberilor.

Tabelul I. Principalele caracteristici magnetice statice ale eșantioanelor investigate

Material	B_r	H_c	$\mu_{r, \max}$
	mT	A/m	-
alpha-Fe-40micro	5.2	749.5	5.6
alpha-Fe-shell	3.5	487.0	5.7
Fe-carbonil	1.4	253.8	4.4
FeNi	21.5	4,631.7	3.7

Măsurătorile dinamice, la diferite frecvențe, efectuate cu ajutorul dispozitivului experimental, au reliefat aceeași neomogenitate structurală ce conduce la un comportament neregulat. Având în vedere aceste rezultate și termenele contractului, s-a trecut la obținerea unor **nanocompozite bazate pe alte materiale:** a) nanopulbere de FeCo, în care particulele sunt învelite în strat izolant, b) Distaloy (nanopulbere comercială de Fe, folosită pentru compozite metalice, fără proprietăți magnetice deosebite). Miezurile nanocompozite au fost fabricate prin sinterizare și presare în matrițe dedicate. Totodată, **procedura de determinare a pierderilor a fost testată și pe miezul laminat de FeSi cu grăunți neorientați** din care este fabricat și jugul (piesa “U”) demonstratorului experimental.

S-a constatat că nanoparticulele neînvelite în cămașă izolantă nu pot fi distribuite prea uniform în rășina polimerică, ceea ce conduce la rezultate dezordonate. De exemplu, în fig. 11 sunt prezentate unele dintre pierderile de putere măsurate pentru Distaloy, iar în fig. 12 sunt pierderile calculate din măsurătorile pe FeNi.

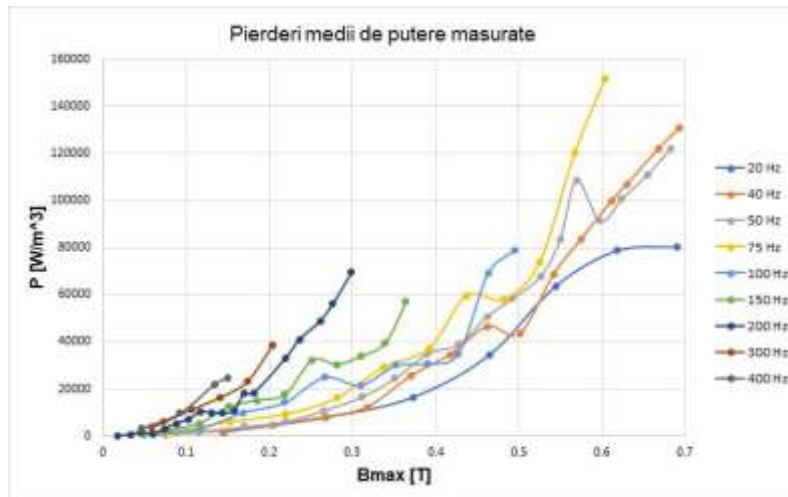


Fig. 11. Pierderi experimentale de putere pentru Distaloy

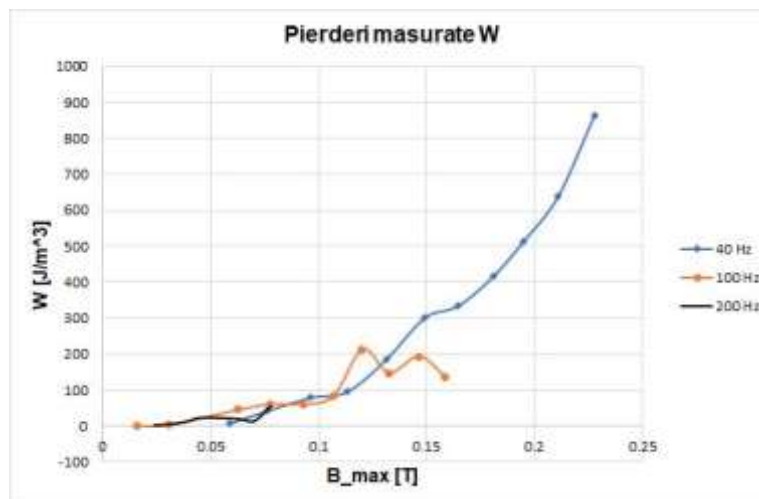


Fig. 12. Pierderi experimentale pentru FeNi

Coordonatorul UPB a realizat măsurătorile pentru diferite frecvențe și amplitudini astfel încât **forma de undă a inducției magnetice să rămână sinusoidală**. Această restricție a limitat destul de mult gama datelor experimentale deoarece generatorul de semnal este clasic, fără posibilitatea generării automate a unui semnal neregulat care să asigure un B sinusoidal. Spre exemplificare, în fig. 13 sunt prezentate pierderile totale rezultate din măsurătorile efectuate pe un miez sinterizat din nanopulbere de FeCo, respectiv pentru miezul laminat de FeSi. Totodată, au fost efectuate măsurători pentru frecvențe mai ridicate: 150 Hz pentru FeCo, respectiv 200 Hz și 300 Hz pentru FeSi. Aceste date au fost ulterior folosite pentru testarea metodei de determinare a pierderilor.

Procedura de determinare a pierderilor folosește separarea pierderilor măsurate în cele trei componente (histerezis, clasice și excedentare) și **identificarea parametrilor energetici specifici materialului: funcția numerică Everett Ev** (pentru modelul de histerezis static Preisach) și **cei doi parametri microscopici n_0 și V_0** necesari estimării pierderilor excedentare. Rezultatele identificării pentru cele 2 tipuri de miez magnetic (nanocompozit din FeCo, respectiv laminat din FeSi-NO) sunt prezentate în RST-2. Valorile parametrilor n_0 și V_0 pentru fiecare amplitudine B_{max} pot fi approximate cu ajutorul unei funcții polinomiale de fitare: de ordinul 1 (clasic) sau de ordinul 6 (mai precis) – vezi, de exemplu, fig. 14.

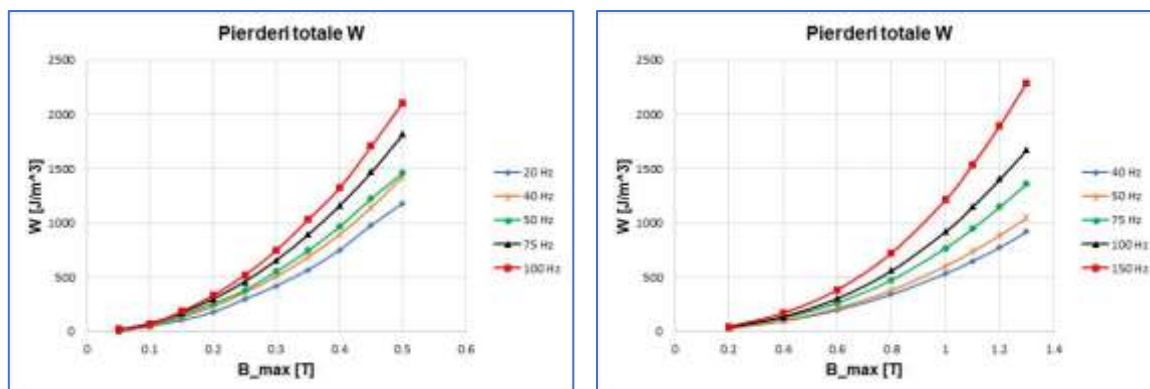


Fig. 13. Pierderi experimentale pentru miez nanocompozit de FeCo (stânga) și miez laminat de FeSi-NO (dreapta)

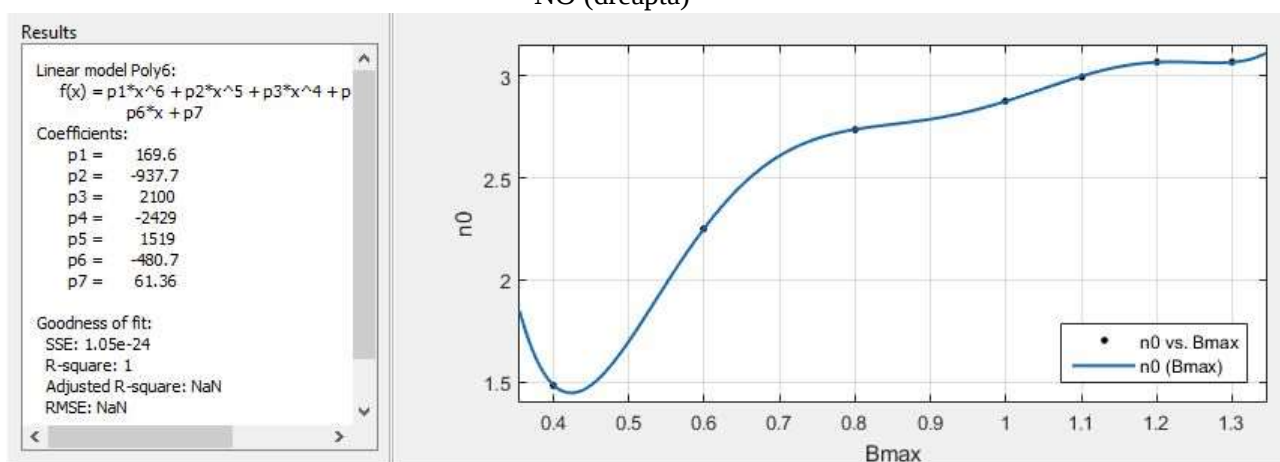


Fig. 14. Valorile lui n_0 și fitarea sa cu polinom de gradul 6 pentru miezul laminat de FeSi-NO

Cunoașterea acestor parametri permite estimarea pierderilor pentru orice altă frecvență sau amplitudine a excitației. Cu cât frecvența crește, pierderile excedentare vor fi mai importante. În aceste condiții, un model dinamic de histerzis poate modela mai precis dependența B - H . În abordarea noastră, am utilizat modelul static Preisach; de exemplu, figura 15 prezintă un ciclu de histerzis calculat pentru miezul nanocompozit de FeCo, având amplitudinea de 0.5 T.

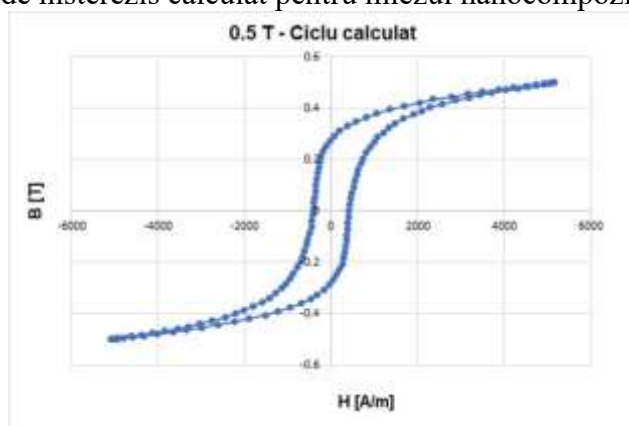


Fig. 15. Exemplu de ciclu de histerzis generat de modelul Preisach pentru miezul nanocompozit de FeCo

Parametrii energetici de material identificați pe baza unui set de măsurători au permis **estimarea pierderilor pentru frecvențe mai mari sau pentru regim periodic nesinusoidal (deformant)**. Testarea metodei s-a realizat folosind câteva măsurători punctuale în aceste condiții extinse de funcționare, valorile măsurate fiind comparate cu cele estimate pe baza metodologiei propuse. Ca exemplificare, în fig. 16 sunt prezentate câteva rezultate ale testelor în regim sinusoidal la frecvențe mai mari.

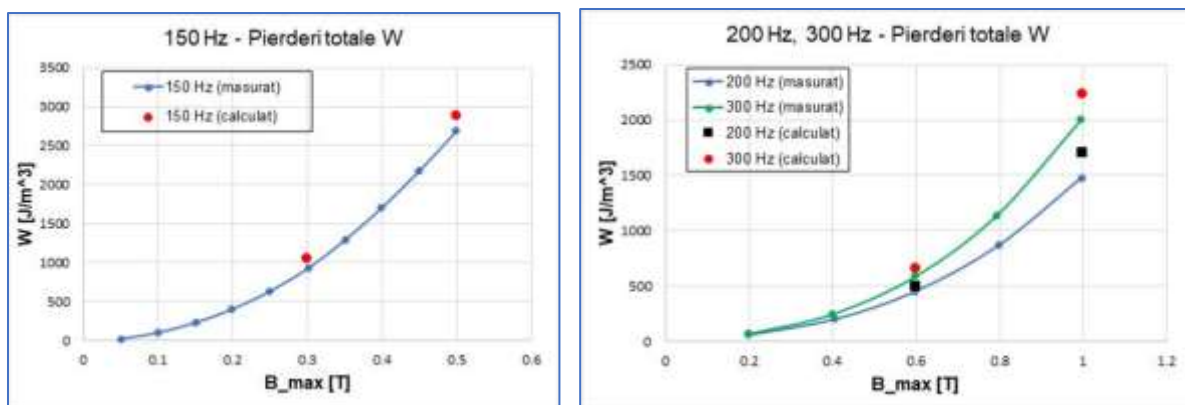


Fig. 16. Pierderi măsurate și estimate (calculate) în regim sinusoidal pentru miezul nanocompozit de FeCo (stânga) și pentru miezul laminat de FeSi-NO (dreapta)

Parametrii de material identificați au permis și estimarea pierderilor în cazul regimurilor deformante. De exemplu, a fost considerată o formă de undă reală din domeniul mașinilor electrice ce conține armonicile 1, 3 și 5 și are coeficientul de deformare total (THD) de 13.74%, fazele inițiale ale armonicilor fiind variabile (fig. 17).

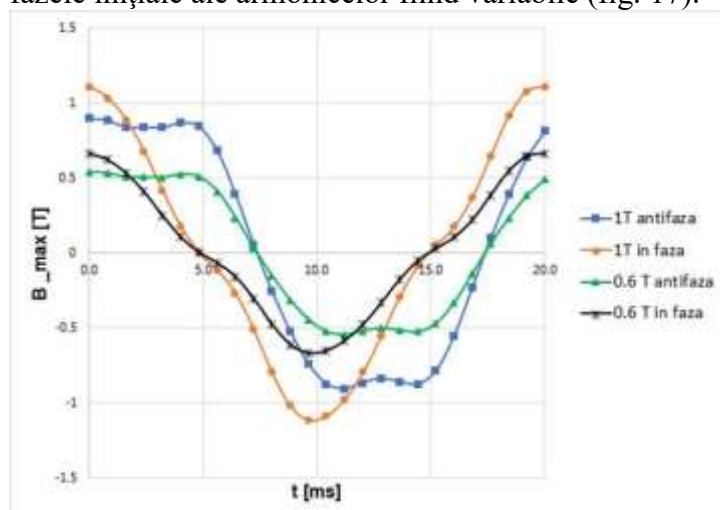


Fig. 17. Forme de undă distorsionate (armonicile 1, 3 și 5, THD=13.74%) utilizate

Pierderile estimate pentru aceste regimuri nesinusoidale sunt comparate cu pierderile măsurate în regim sinusoidal (50 Hz) pentru aceeași amplitudine a fundamentalei (vezi fig. 18).

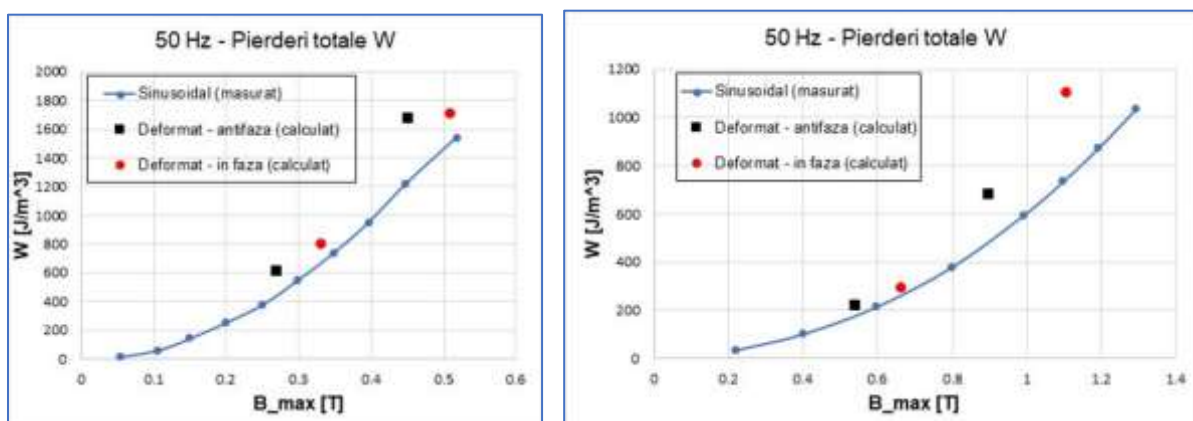


Fig. 18. Pierderi estimate în regim nesinusoidal pentru miezul nanocompozit de FeCo (stânga) și pentru miezul laminat de FeSi-NO (dreapta).

Se observă că metoda furnizează o ușoară supraestimare a pierderilor în regim sinusoidal la frecvențe mai mari, mai ales la amplitudini mai mari, ceea ce era de așteptat având în vedere amplificarea efectului pelicular (scăderea adâncimii de pătrundere). Ar mai fi de remarcat dependența preciziei metodei propuse de conductivitatea electrică a materialului. În cazul compozitelor, acest parametru poate varia destul de mult în masa miezului, în funcție de dimensiuni, temperatura și presiunea de sinterizare/aglomerare a particulelor.

Analiza eficienței și preciziei demonstratorului experimental în validarea conceptului de predeterminare a pierderilor în miezuri SMnC trebuie să pornească de la stadiul actual al studiilor în domeniu. Problema caracterizării unui miez magnetic este amplu dezbătută în comunitatea științifică pentru că doar proprietățile materialului nu sunt suficiente, forma și dimensiunile miezului influențând și ele comportarea dispozitivului. Dacă pentru miezurile clasice din tole, standardele oferă 2 alternative (cadrul Epstein și testerul unitolă), miezurile magnetice compozite sunt atât de complexe încât nu au putut fi încă standardizate din punct de vedere al caracterizării. De aceea, **demonstratorul nostru experimental oferă un mijloc de măsurare a dependenței $B(H)$ în miezuri magnetice (inclusiv compozite) ce permite identificarea parametrilor necesari estimării pierderilor magnetice pentru un regim de funcționare prezumat (inclusiv la frecvențe mai mari sau în regim nesinusoidal).** Pachetul de proceduri software dezvoltate pentru calculul componentelor pierderilor (prin histerezis, prin curenți turbionari și prin procese microscopice) a fost testat atât pentru miez clasic, laminat, din tole FeSi cu grăunți neorientați, cât și pentru miez nanocompozit din FeCo.

În urma numeroaselor experimente și analize efectuate, se desprind câteva concluzii:

1. Precizia măsurătorilor cu ajutorul demonstratorului experimental a fost maximizată prin **execuția atentă a dispozitivului, optimizat anterior prin simulări numerice**. Astfel, bobinele de măsură au fost executate dimensional astfel încât semnalul măsurat să fie suficient de puternic pentru lanțul de achiziție. Totodată, ecranarea ansamblului de bobine a permis colectarea fluxului magnetic de dispersie și redirecționarea sa pentru excitarea miezului magnetic studiat. Bobinele de excitație au fost proiectate astfel încât să asigure magnetizarea cât mai bună a miezurilor compozite ce au o permeabilitate mai scăzută.
2. **Configurarea lanțului de măsură**, în limitele dotării existente, a asigurat achiziția datelor cu o acuratețe ridicată. **Filtrarea și procesarea semnalelor** în mediul Matlab, precum și **integrarea lor numerică cu mare precizie** (cuanta de timp folosită a fost de ordinul 20 ns) a condus la obținerea cu precizie a funcțiilor $B(t)$ și $H(t)$.
3. **Efectuarea măsurătorilor cu reglaj manual a fost extrem de laborioasă și atent supravegheată pentru a nu altera istoricul evoluției miezului cu histerezis prin variația prea bruscă sau nemonotonă a excitației**. Dificultatea întâlnită, care a și limitat uneori gama măsurătorilor, a fost saltul necontrolat al semnalului furnizat de generator la schimbarea gamei de funcționare, ceea ce „arunca” punctul de funcționare din planul $B(H)$ în poziții ce influențau toate măsurătorile ulterioare.
4. Obținerea ciclurilor de histerezis simetrice, de diferite amplitudini, a necesitat **o demagnetizare atentă înaintea fiecărui nou ciclu**. Limitarea generatorului de semnal menționată anterior a trebuit să fie atent manageriată.
5. **Compararea datelor măsurate cu cele obținute prin simulări numerice și cu datele experimentale alternative (metoda integratorului RC, metoda bobinelor Helmholtz) a permis reglarea precisă a valorilor constantelor de integrare aferente bobinelor de măsură (H și B)**. Au fost astfel eliminate eventualele erori de bobinare și diferențele dintre valorile lui H în miez și în imediata sa vecinătate.
6. **Precizia separării pierderilor magnetice și calculul parametrilor de material aferenți este dependentă de factorii tehnologici implicați în obținerea miezului compozit:**

uniformitatea nanoparticulelor și a membranei acestora, omogenizarea amestecului, temperatura de sinterizare, presiunea și omogenitatea sa în matriță etc. Toate acestea influențează **valoarea conductivității electrice a miezului, a cărei valoare este crucială în precizia estimării pierderilor.**

7. **Precizia pierderilor magnetice estimate depinde de acuratețea identificării parametrilor energetici al materialului.** Astfel, utilizarea modelului clasic Preisach (static) limitează gama de frecvențe a semnalelor sau ale armonicilor; un model dinamic ar extinde gama, dar ar necesita un volum mai mare de măsurători și calcule. De asemenea, fitarea dependenței de amplitudine a parametrilor microscopici n_0 și V_0 prin polinoame de ordin superior asigură precizia estimării; în cazul nostru, polinomul de ordin 7 necesită cel puțin 8 amplitudini diferite în setul de măsurători, dar acuratețea este pe măsură.
8. **Acuratețea generală a metodei de estimare a pierderilor magnetice este corelată cu aproximările intrinseci din teoria statistică** a separării pierderilor fundamentată de Bertotti pentru tole. Extinderea teoriei pentru compozite este încă intens studiată datorită complexității și diversității crescute a acestor materiale noi, de viitor.
9. **Eficiența generală a metodei propuse de estimare a pierderilor magnetice este foarte bună** și poate conduce la economii semnificative prin **proiectarea optimizată a dispozitivelor electromagnetice pentru condițiile reale de lucru** (la frecvențe mai mari sau în regimuri distorsionate). O dată identificați parametrii materialului, estimarea pierderilor se face automatizat de către pachetul software dezvoltat.
10. Un **avantaj deosebit** al demonstratorului experimental este acela că folosește eșantioane ușor de realizat – în formă de „I” – cu matrițe simple. Eșantionul poate fi ușor montat în dispozitivul experimental, prin culisare, fără a schimba ceva în schema de conexiuni electrice ale bobinelor de excitație, de măsură, sau în restul ansamblului experimental.

Deși nu a fost posibilă, din motive tehnologice, crearea mai multor miezuri nanocompozite performante, considerăm că **proiectul și-a atins obiectivul vizat, acela de a realiza un demonstrator experimental** pentru efectuarea măsurătorilor necesare, identificarea parametrilor energetici ai unui miez magnetic dat și estimarea suficient de precisă a pierderilor magnetice din acel miez în condiții extinse de funcționare – frecvențe mai mari sau regimuri nesinusoidale. Eficiența a fost probată atât pentru miezuri clasice, laminate, din tole de FeSi, cât și pentru miezuri nanocompozite din FeCo.

Rezultatele proiectului au fost diseminate în numeroase lucrări științifice publicate în articole din reviste sau în volumele unor conferințe internaționale de prestigiu. Astfel, au fost elaborate **6 articole, dintre care 5 articole pentru reviste științifice de prestigiu (4 reviste indexate ISI - COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Revue roumaine des sciences techniques - Série Électrotechnique et Énergétique, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Revista de Chimie și 1 revista indexată BDI (Index-Copernicus).** Dintre cele 5 articole ISI, două au fost publicate, unul este acceptat pentru a fi publicat în ultimul număr din 2018 și două sunt în curs de recenzare la **Revista ISI “Revista de Chimie”.**

Totodată, membrii echipelor de cercetare au participat la **6 conferințe internaționale de prestigiu**, prezentând **9 lucrări** cu rezultatele obținute, la fiecare fiind precizat suportul (acknowledgment) prezentului contract de finanțare. Dintre acestea, **6 lucrări au obținut indexare ISI**, iar o altă lucrare este indexată IEEE, urmând a fi indexată și ISI, conform istoricului conferinței. O parte dintre lucrări au fost ulterior recomandate pentru recenzare și publicare în reviste de prestigiu.

Lista lucrărilor științifice de diseminare a rezultatelor proiectului ELIDEF, cu acknowledgment, este prezentată în continuare.

Articole în reviste indexate ISI

1. V. Ioniță, M. Codescu, E. Chițanu, L. Petrescu, E. Cazacu - Hysteresis modeling accuracy for soft magnetic nanopowders, *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Electrotechnique et Energetique*, ISSN 0035-4066, vol 63, nr. 1, pp. 11-14, 2018, [WOS:000430897800002](#)
2. E. Cazacu, V. Ioniță, L. Petrescu - Thermal aging of power distribution transformers operating under nonlinear and balanced load conditions, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, ISSN 1336-1376 (Print), ISSN 1804-3119 (Online), vol. 16, no. 1, pp. 92-100, 2018, <https://doi.org/10.15598/aeee.v16i1.2701>, [WOS:000429160100009](#)
3. V. Ioniță, L. Petrescu, E. Cazacu - Improved estimation of iron losses for non-sinusoidal voltages, *Int. J. for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Eng. COMPEL*, ISSN 0332-1649, vol. 37, issue 6, 2018 (în curs de publicare)
4. T. Mălăeru, E.-A. Pătroi, V. Marinescu, O. Oprea, D. Pătroi, C. Morari, G. Georgescu - Preparation and characterization of Fe₃O₄ magnetic nanofluid in vegetable oil, *Revista de Chimie*, ISSN 0034-7752, în curs de evaluare.
5. T. Malaeru, E. Patroi, D. Patroi, E. Manta, V. Marinescu, G. Georgescu - Influence of synthesis parameters of FeNi₃ alloy nanoparticles obtained by chemical reduction method in aqueous solution, *Revista de Chimie*, ISSN 0034-7752, în curs de evaluare.

Articole în reviste indexate BDI (Index-Copernicus)

1. E. Cazacu, V. Ioniță, L. Petrescu - Transient state characterization of asynchronous motors in modern low-voltage electric installations, *Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty – SBEEF*, p-ISSN 1843-6188, e-ISSN 2286-2455, vol. 18, issue 1, 2018, pp. 19-25, <https://doi.org/10.1515/sbeef-2017-0017>

Articole în volumele unor conferințe indexate ISI

1. V. Ionita, E. Cazacu, L. Petrescu – Remarks about the magnetic characterization of magnetite nanopowders, *Proc. of 10-th Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE'2017)*, Bucharest, March 2017, ISBN 978-1-5090-5160-1, ISSN: 1843-8571, pp. 369-372, <https://doi.org/10.1109/ATEE.2017.7905176>, [WOS:000403399400072](#).
2. E. Cazacu, V. Ionita, L. Petrescu – An efficient method for investigating the ferroresonance of single-phase iron core devices, *Proc. of 10-th Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE'2017)*, Bucharest, March 2017, ISSN: 1843-8571, ISBN 978-1-5090-5160-1, pp. 363-368, <https://doi.org/10.1109/ATEE.2017.7905167>, [WOS:000403399400071](#).
3. A. Bordianu – Losses analysis for a soft magnetic composite material, *Proc. of 10-th Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE'2017)*, Bucharest, March 2017, ISSN: 1843-8571, ISBN 978-1-5090-5160-1, pp. 382-385, <https://doi.org/10.1109/ATEE.2017.7905064>, [WOS:000403399400075](#).
4. V. Ionita, L. Petrescu, E. Cazacu, E.-A. Patroi, E. Manta - Improved prediction of hysteresis losses in electrical machine cores, *7th International Conference on Modern Power Systems (MPS 2017)*, 06-09 June 2017, Cluj-Napoca, Romania, pp. 1-4, IEEE Catalog Number CFP17MPR-USB, ISBN: 978-1-5090-6564-6, <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974403>, [WOS:000428462600033](#)
5. E. Cazacu, V. Ionita, L. Petrescu - Flux-current description of some particular iron core devices, *7th International Conference on Modern Power Systems (MPS 2017)*, 06-09 June 2017, Cluj-Napoca, Romania, pp. 1-4, IEEE Catalog Number CFP17MPR-USB, ISBN: 978-1-5090-6564-6, <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974373>, [WOS:000428462600004](#)
6. L. Petrescu, V. Ionita, E. Cazacu, C. Petrescu – Steinmetz' parameters fitting procedure for the power losses estimation in soft magnetic materials, *Proceedings of the 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Brasov, Romania, 25 May - 27 May 2017, pp. 208-213, IEEE Catalog Number: CFP1722D-USB, ISBN: 978-1-5090-4488-7, <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2017.7974972>, [WOS:000426909600032](#)

7. V. Ioniță, E. Cazacu, L. Petrescu - Effect of voltage harmonics on iron losses in magnetic cores with hysteresis, *18-th IEEE PES Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2018)*, Ljubljana (Slovenia), May 13-16, 2018, ISBN 978-1-5386-0516-5, Electronic ISSN: 2164-0610, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378843>, în curs de indexare ISI

Articole în volumele altor conferințe internaționale

1. V. Ionita, L. Petrescu, E. Cazacu - Improved losses estimation in soft magnetic cores for non-sinusoidal voltages, *18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2017)*, Lodz (Polonia), 14-16 sept. 2017, format electronic, acceptată în format revizuit pentru publicare în *COMPEL*.
2. V. Ioniță, M. Codescu, E. Chițanu, L. Petrescu, E. Cazacu - Preisach model accuracy for soft magnetic nanopowders, *11th Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics (HMM 2017)*, Barcelona (Spania), 29-31 mai 2017, Book of Abstracts, pag. 106, a fost propusă pentru recenzare și publicare în *Physica B – Condensed Matter*, article PHYSB-S-17-01392

A fost proiectată și realizată **pagina WEB** a proiectului (<http://elidef.elth.pub.ro>), conținutul fiind permanent actualizat pe durata desfășurării proiectului ELIDEF.

NIVELUL DE MATURITATE TEHNOLOGICĂ (TRL) LA FINALUL PROIECTULUI

Pornind de la definiția general acceptată a TRL, **proiectul a asigurat trecerea de la TRL 2 (conceptul de tehnologie formulat) la TRL 3 (dovada experimentală a conceptului)**. Într-adevăr, echipa proiectului avea expertiza și activitatea de cercetare anterioară în tehnologia referitoare la separarea și predeterminarea pierderilor magnetice, modelarea materialelor, metodele experimentale și producția de nanopulberi și compozite magnetice. Formulele existente în literatura de specialitate, pentru a evalua pierderile magnetice pe baza coeficienților cvasi-empirici asociați materialului magnetic, nu sunt suficient fundamentate experimental și nu sunt înglobate într-o teorie detaliată care să susțină întreaga ipoteză. Totodată, tehnologia de predeterminare a pierderilor pe baza separării în componente, fundamentată pentru miezuri magnetice clasice, laminate, de FeSi, nu era încă verificată experimental pentru miezuri magnetice avansate (nanocompozite, amorfe) și / sau frecvențe înalte, în ciuda interesului industrial pentru acest subiect în ultimii ani.

De aceea, proiectul și-a propus trecerea la TRL 3, activitățile axându-se pe **fabricarea unui demonstrator experimental de laborator, care să permită validarea experimentală și extinderea conceptului tehnologic pentru miezuri magnetice nanocompozite, frecvențe mai mari și regimuri deformante**. Scopul a fost atins, livrabilele prezentate în cele două etape demonstrând o activitate complexă de cercetare și dezvoltare, care a inclus atât **studii analitice și numerice pentru a stabili parametrii modelului conceptual** de predeterminare a pierderilor într-un context adecvat pentru miezurile magnetice compozite, dar și laminate, precum și **studii de laborator pentru a valida fizic predicțiile identificate**.

Demonstratorul experimental a permis implementarea conceptului inițial TRL2, adăugându-se validarea / corectarea / îmbunătățirea conceptului de predeterminare a pierderilor și caracterizarea avansată a miezurilor magnetice moi din nanocompozite, ce prezintă o eficiență energetică și economică ridicată. **Pachetul software elaborat înglobează toate etapele tehnologiei propuse:** achiziția, filtrarea și procesarea datelor măsurate; calculul componentelor pierderilor măsurate; identificarea valorilor parametrilor energetici specifici miezului magnetic; identificarea valorilor parametrilor modelului de histerezis Preisach ce permite urmărirea dependenței $B(H)$ de orice tip; predeterminarea pierderilor pentru orice tip de variație $u(t)$ a tensiunii aplicate bobinelor de excitație a miezului, inclusiv în regim deformat,

cu armonici; compararea și reprezentarea grafică a valorilor estimate și a celor disponibile experimental pentru pierderile din miezul magnetic.

Demonstratorul experimental de laborator - proiectat, construit și testat în acest proiect - **deschide oportunitatea de a continua dezvoltarea tehnologiei la următorul nivel TRL** - o tehnologie unificată de determinare a pierderilor pentru miezurile magnetice omogene sau compozite.

MODUL DE ATRIBUIRE ȘI EXPLOATARE A DREPTURILOR DE PROPRIETATE ASUPRA REZULTATELOR PROIECTULUI

Atribuirea și exploatarea drepturilor de proprietate asupra rezultatelor intermediare și finale ale proiectului se realizează **conform legislației în vigoare referitoare la titlurile de proprietate industrială și drepturile de autor, Acordului de Colaborare și Contractului încheiat cu Autoritatea Contractantă**. Astfel, rezultatele cercetărilor sunt administrate de proprietarii acestora, cu toate drepturile care decurg din calitatea de proprietar.

Documentația tehnică de orice natură (rapoarte de experimentări, studii, etc.) aparține partenerilor implicați direct în realizarea fazelor respective. Rezultatele științifice/tehnice originale au fost prezentate în comun ca lucrări publicate în reviste de specialitate sau comunicări științifice la conferințe interne și/sau internaționale, **respectând regulile specifice de proprietate intelectuală ale revistei sau conferinței respective**. Fiecare partener din proiect are dreptul de difuzare a rezultatelor proprii, precum și dreptul de a difuza, pe bază de acord, în comun cu celălalt partener, rezultatele științifice/tehnice generale ale proiectului. Dreptul de difuzare a rezultatelor pentru materialele dezvoltate efectiv în proiect îl au toți participanții colaboratori la proiect, în măsura contribuției fiecăruia dintre ei.

Exploatarea ulterioară a rezultatelor proiectului, pentru a îmbunătăți eficiența energetică a dispozitivelor care funcționează în condiții reale, către utilizatori finali adecvați, cum ar fi asociațiile profesionale, producătorii de materiale magnetice, actorii industriali (întreprinderile mici și mijlocii), va necesita acordul prealabil al tuturor partenerilor de proiect și UEFISCDI înainte de difuzare.

IMPACTUL REZULTATELOR OBTINUTE

Impactul proiectului este în acord cu cel general prevăzut în Programul PN-III-CO-PED, **sporind capacitatea partenerilor** (actori importanți în domeniul cercetării – Universitatea “Politehnica” din București și INCDIE ICPE-CA) de **a genera soluții îmbunătățite, validate experimental**, de utilizare eficientă a miezurilor magnetice nanocompozite și de **predeterminare a pierderilor în miezuri magnetice pentru regimurile de frecvență mai mare sau distorsionate de prezența consumatorilor reali neliniari**.

Impactul tehnico-economic poate fi apreciat prin faptul că valorile parametrilor de tip energetic identificați pot fi adăugați la fișa de catalog a materialelor magnetice studiate și pot fi folosite de orice proiectant (utilizator final) pentru a crea un **produs mai bun, cu consum redus de energie și de dimensiuni mai mici**. Domeniul electronicii de putere (convertoarele statice, sursele în comutație, transformatoarele planare etc.) implicată în aplicațiile de energie eoliană sau solară este o piață importantă a acestei tehnologii îmbunătățite. Cunoștințele dobândite în timp de către echipa UPB privind predeterminarea pierderilor în materiale magnetice, sub diverse câmpuri magnetice aplicate, au putut fi **validate experimental cu ajutorul demonstratorului construit** împreună cu echipa INCDIE ICPE-CA, permițând îmbunătățirea nivelului tehnologic (TRL) al acestui instrument util pentru caracterizarea materialelor avansate

(cum sunt nanocompozitele magnetice), în **condiții extinse de lucru** (frecvențe mai mari sau regim distorsionat).

Impactul științific al rezultatelor obținute este deosebit, dovadă fiind **numărul mare de articole și comunicări științifice**, realizate de echipa contractului, acceptate pentru publicare de către comunitatea științifică. Realizarea demonstratorului experimental și a pachetului software aferent a permis **evidențierea diferențelor fundamentale din teoria separării pierderilor**, fundamentată pentru miezuri laminate, în cazul extinderii sale pentru miezuri magnetice nanocompozite, frecvențe ridicate sau regim nesinusoidal. Concluziile prezentate în livrabilele proiectului arată **experiența dobândită de colectiv** în abordarea problemei extrem de complexe a caracterizării experimentale complete a miezului magnetic și predeterminarea suficient de precisă a pierderilor asociate unui regim de funcționare la frecvențe mai mari sau în regim deformant (nesinusoidal).

Demonstratorul experimental conceput poate fi utilizat în continuare pentru caracterizarea și predeterminarea pierderilor în **alte tipuri de miezuri magnetice**. Se intenționează **introducerea acestui demonstrator într-o lucrare de laborator** integrată dedicată unui program de master, pentru a contribui la educarea masteranzilor în spiritul proiectării economice (din punct de vedere al pierderilor) a dispozitivelor electromagnetice.

Desigur, **demonstratorul poate fi perfecționat** pe baza cunoștințelor acumulate în acest proiect, **putând conduce la un prototip de laborator, având un nivel TRL superior**, dedicat caracterizării energetice a miezurilor magnetice prin parametri ce permit predeterminarea precisă a pierderilor și, implicit, proiectarea adecvată a dispozitivelor respective.