

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 științific și tehnic

Etapa II: Testarea demonstratorului experimental

Termen: 30 iunie 2018

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

Planul de realizare inițial a fost integral îndeplinit, la activități participând cei doi parteneri:

CO. Universitatea Politehnica din București

P1. Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE - CA București

Activitățile și contribuțiile fiecărui partener sunt sintetic prezentate în continuare.

A.II.1. Testare funcționalitate demonstrator experimental

P1 - Efectuarea de măsuratori la 50 Hz pentru un miez magnetic de referință și calibrarea dispozitivului.

CO - Analiza datelor experimentale și testarea funcționalității modulelor software.

A.II.2. Efectuarea experimentelor pentru identificarea valorilor parametrilor energetici de material la diferite frecvențe

P1 - Efectuarea experimentelor proiectate și elaborarea rapoartelor de măsurare.

CO - Identificarea valorilor parametrilor energetici caracteristici miezurilor SMnC pentru frecvențele de măsură.

A.II.3. Validarea experimentală a pierderilor în SMnC, determinate numeric pentru domenii extinse de funcționare a miezului magnetic.

CO - Estimarea pierderilor în miezul SMnC pentru game extinse de frecvență, identificarea condițiilor de aplicabilitate a conceptului formulat și enunțarea concluziilor.

P1 - Analiza eficienței și preciziei demonstratorului experimental în validarea conceptului de determinare a pierderilor în miezuri SMnC.

A.II.4. Diseminarea rezultatelor

CO - Elaborarea unor lucrări științifice propuse pentru publicare în reviste de specialitate, actualizarea paginii WEB a proiectului.

P1 - Elaborarea unor lucrări științifice propuse spre publicare în reviste de specialitate.

Rezultatele obținute sunt prezentate în cele 3 rapoarte de cercetare (livrabile) prevăzute în Planul de realizare. Conținutul lor este sintetizat în cele ce urmează.

D.II.1. ANALIZA REZULTATELOR TESTELOR DE FUNCTIONALITATE **A DEMONSTRATORULUI EXPERIMENTAL** **(Raport tehnic, CO+P1)**

Raportul conține rezultatele activității A.II.1 din Planul de realizare.

D.II.1.1. Efectuarea de masuratori la 50 Hz pentru un miez magnetic de referinta si calibrarea dispozitivului.

Echipa partenerului P1-ICPE-CA a realizat un miez laminat din tole FeSi (de grosime 1 mm) în formă de I, identic geometric cu eşantioanele compozite ce vor fi analizate, din acelaşi material ca şi jugurile în formă de U. Astfel, circuitul magnetic închis de măsură, format din miezurile U şi I este omogen şi poate fi analizat prin măsurarea directă a tensiunii şi curentului. Un **integrator RC** (vezi fig. 1) permite integrarea tensiunii induse şi obţinerea dependenţei aproximative (folosind lungimea medie a circuitului magnetic) dintre B şi H . Această caracteristică este comparată cu cea obţinută prin bobinele de măsură B şi H ale demonstratorului conceput.



Fig. 1. Lanţul de măsură şi achiziţie incluzând integratorul RC şi bobinele de măsură B , H .

Schema de principiu a integratorului RC şi dimensiunile jugului magnetic sunt prezentate în fig. 2.

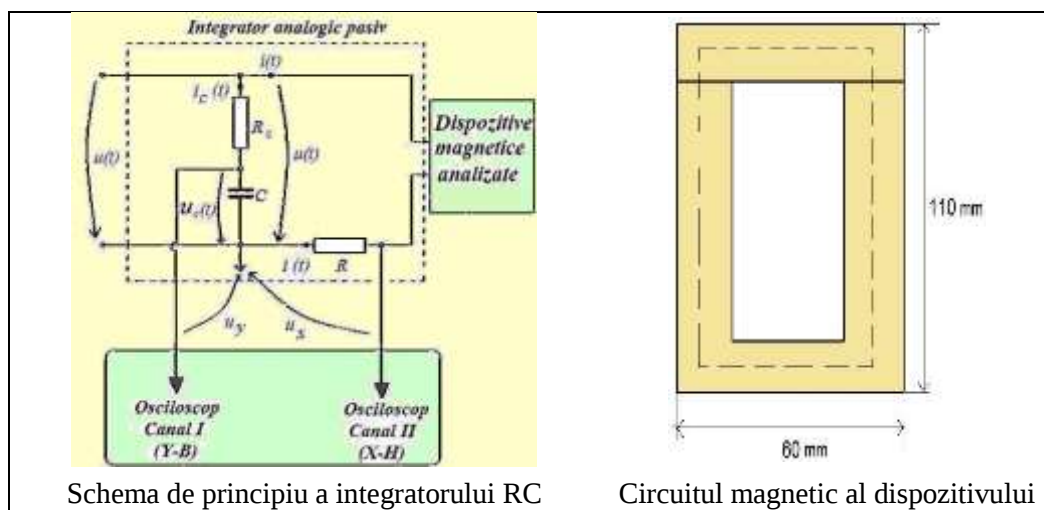


Fig. 2. Schema integratorului RC şi jugul magnetic utilizat pentru etalonare.

↳ Expresia tensiunii corespunzătoare pentru **intensitatea câmpului magnetic $H(t)$** poate fi determinată cu relațiile:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H}(t) d\vec{l} = N_1 i(t) \Rightarrow i(t) = \frac{H(t) \cdot l_m}{N_1} \Rightarrow u_R(t) = u_x(t)$$

$$R \cdot i(t) = \frac{R \cdot l_m}{N_1} H(t) \Rightarrow H(t) = \frac{N_1}{R \cdot l_m} u_x(t) = k_x u_x(t)$$

Datele numerice ale bobinelor de excitație și ale rezistenței R de pe care se măsoară tensiunea proporțională cu intensitatea curentului de excitație sunt:

$$R = 1 \, \Omega, \quad N_1 = 345 + 698 + 338 + 680 = 2061,$$

iar lungimea medie a circuitului magnetic este $l_m = 2(60-10) + 2(110-10) = 300$ mm. Rezultă constanta de proporționalitate pentru H : $k_x = \frac{N_1}{R \cdot l_m} = \underline{\underline{6870}}$ [A/Vm].

↳ În mod similar, expresia tensiunii corespunzătoare pentru **inductia câmpului magnetic $B(t)$** poate fi determinată cu relațiile:

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

$$u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = N_1 A \frac{dB(t)}{dt}$$

$$\Rightarrow N_1 A \cdot B(t) = \int u(t) dt,$$

$$u_c(t) = u_y(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = \frac{1}{C R_c} \int u(t) dt = \frac{N_1 A}{R_c C} \cdot B(t)$$

$$\underline{\underline{B(t) = \frac{R_c C}{N_1 A} u_y(t) = k_y u_y(t)}}$$

Valorile parametrilor implicați în relațiile precedente sunt:

$$R_c = 320 \, k\Omega, \quad C = 1 \, \mu F, \quad (1/\omega R_c C = 9 \cdot 10^{-3}), \quad A = 10 \times 10 = 100 \, mm^2,$$

Rezultă constanta de proporționalitate pentru B : $k_y = \frac{R_c C}{N_1 A} = \underline{\underline{1.5526}}$ [T/V].

Semnalele măsurate de osciloscop sunt proporționale cu intensitatea câmpului magnetic H , respectiv cu inductia câmpului magnetic B , sunt achiziționate cu o frecvență foarte mare de eșantionare și prelucrate în MATLAB, unde au fost elaborate o serie de rutine de calcul dedicate – vezi fig. 3.

În cele ce urmează se prezintă unele dintre semnalele (proporționale cu mărimile câmpului magnetic) achiziționate cu integratorul pasiv și rezultatele prelucrării acestora pentru cazul în care materialul investigat (miezul magnetic al dispozitivului) este realizat din tole de FeSi de grosime 1 mm. De exemplu, în fig. 4 sunt prezentate tensiunile achiziționate pentru un curent de excitație de 50 mA, iar în fig. 5 sunt formele de undă corespunzătoare pentru mărimile de câmp B și H .

```

1- clc
2- clear all
3- %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4- %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5- f=50;
6- omega=2*pi*f;
7- u0=4*pi*1e-7;
8- %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
9- R1=1; % 1 Ohm/ 1 W
10- R2=320e3; % 320 kohm/ 0.25 W
11- C=1e-6; % capacitat luF/500 V
12- Nsp= 345+696+338+680; % nr. spire al celor doua bobine inseriate
13- l=(2*(60-10)+2*(110-10))*1e-3; % fibra medie circuit magnetic
14- Am=10*10e-6; % aria transversala miez
15- %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16- kx=Nsp/(R1*l); % constanta pentru intensitate camp magnetic H
17- ky=R2*C/(Nsp*Am); % constanta pentru inductie magnetica B
18- %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
19- M=load('C:\Trace00000.dat'); % incarcare data tens functie de inductie
20- N=load('C:\Trace00000.dat'); % incarcare data tens functie de intensitate
21- pctB=length(M); pctH=length(N);
22- t=M(:,1); tt=t(1:25:pctB); % filtrat datele
23- ub=M(:,2); ubb=ub(1:25:pctB); % filtrat datele
24- uh=N(:,2); uhh=uh(1:25:pctH); % filtrat datele
25- % calculare marimi magnetice
26- H=kx*uh; HH=kx*uhh;

```

Fig. 3. Fragment din codul elaborat pentru achiziția și prelucrarea numerică a semnalelor măsurate cu ajutorul integratorului RC.

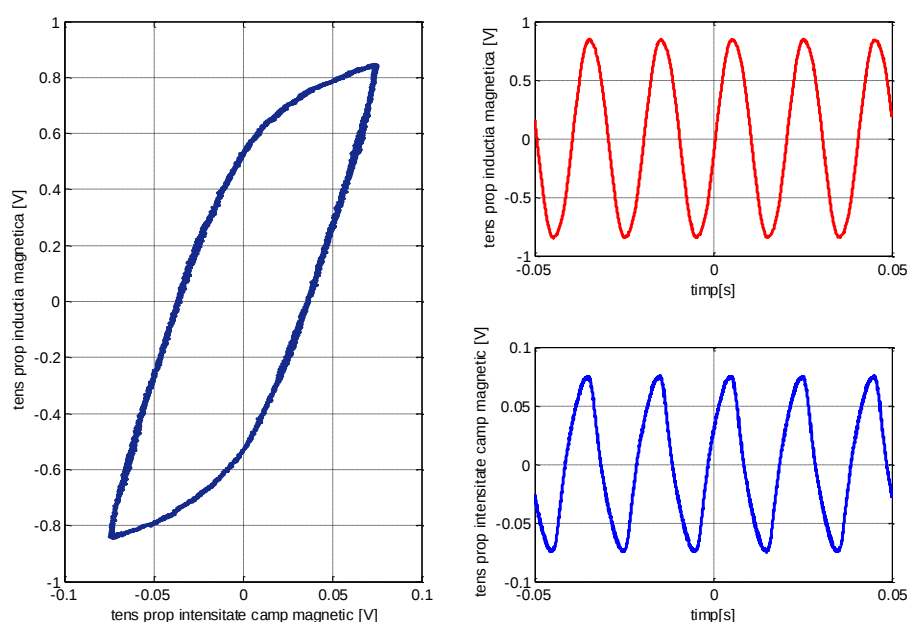


Fig. 4. Reprezentarea tensiunilor proporționale cu inducția și intensitatea câmpului magnetic pentru curentul de excitație $I = 50 \text{ mA}$.

Similar s-au obținut ciclurile de histerezis și pentru alți curenți de excitație: 100 mA , 150 mA și 250 mA (fig. 6). Cele 4 cicluri de histerezis de diferite amplitudini sunt integrate în fig. 7.

Pentru aceeași curenți de excitație au fost achiziționate și prelucrate semnalele furnizate de ansamblul bobinelor de măsură ale demonstratorului experimental. Metoda și modulele software dezvoltate au fost descrise în Etapa I (2017) a prezentului proiect de cercetare. Semnalele furnizate de bobinele de măsură sunt integrate software furnizând inducția câmpului

magnetic B , respectiv intensitatea câmpului magnetic H cu ajutorul constantelor dimensionale $k_H=53.078E+6$ si $k_B=5$.

Pentru a etalona bobinele de măsură, se face o comparație între ciclurile de histerezis, obținute la același curent de excitație, cu ajutorul integratorului RC (integrare hardware) și cu ajutorul bobinelor de măsură din cadrul demonstratorului experimental (integrare software). Rezultatele acestor comparații pentru curenții de excitație de 250 mA sunt prezentate în fig. 8.

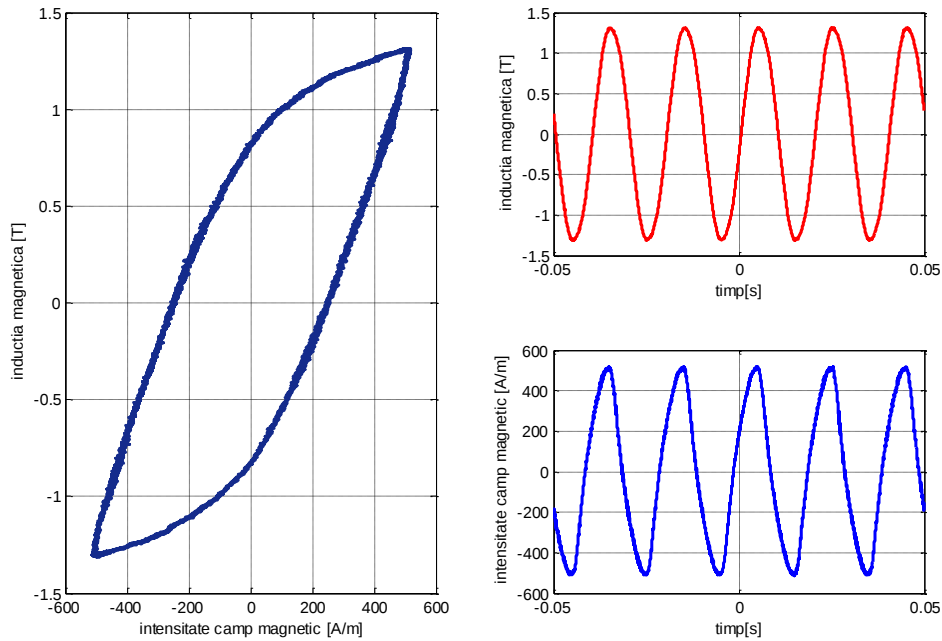


Fig. 5. Ciclul de histerezis și graficele $B(t)$, $H(t)$ pentru curentul de excitație $I = 50$ mA.

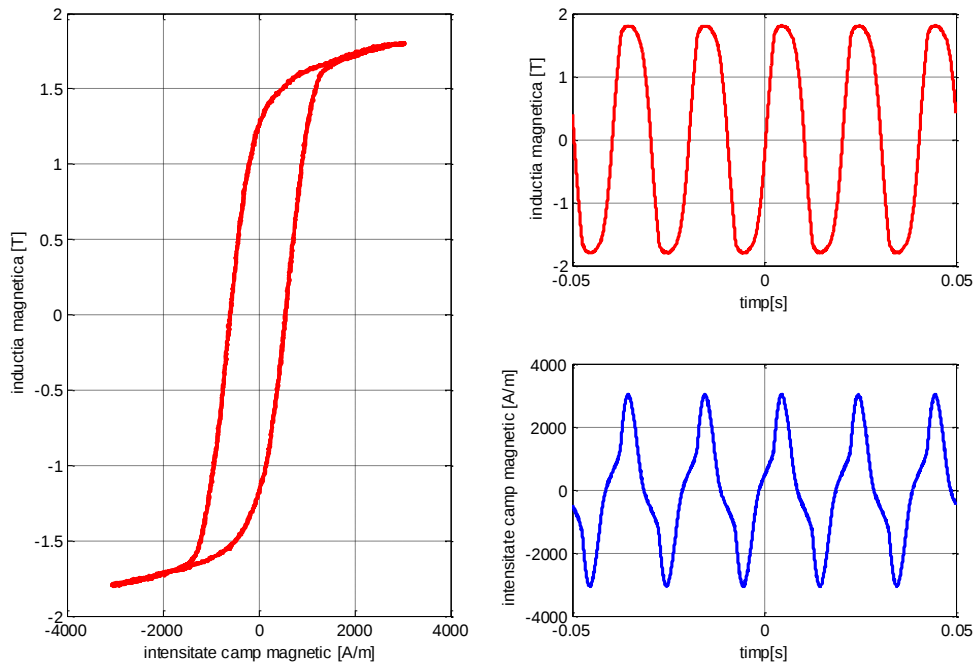


Fig. 6. Ciclul de histerezis și graficele $B(t)$, $H(t)$ pentru curentul de excitație $I = 250$ mA.

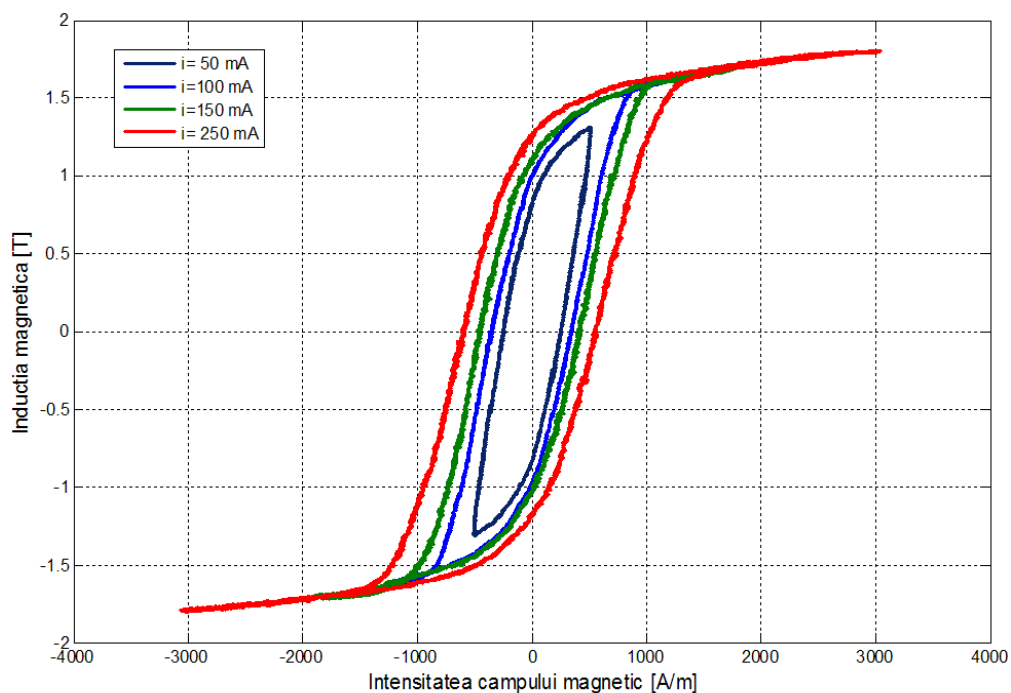


Fig. 7. Ciclurile de histerezis măsurate cu integratorul RC pentru miezul FeSi, la diferite valori ale curentului prin bobinele de excitație.

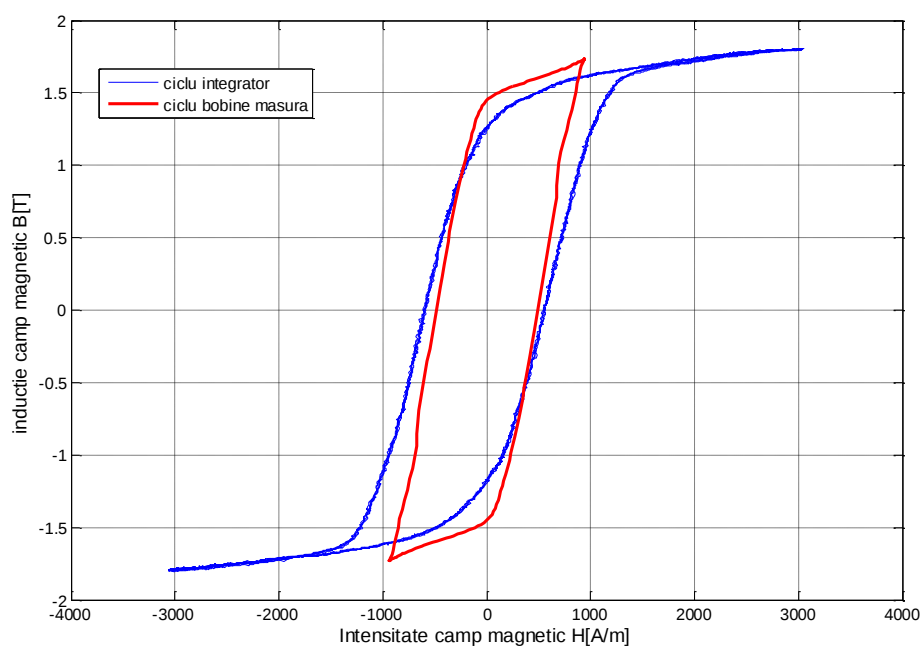


Fig. 8. Cicluri de histerezis măsurate prin metoda integratorului RC și folosind demonstratorul experimental, pentru curentul de excitație $I = 250$ mA.

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. Astfel:***

- Pentru dispozitivul experimental

- Plasarea bobinelor sursă de câmp (de excitație) pe jugul în formă de U face ca tensiunea magnetică să fie neuniformă de-a lungul circuitului magnetic, iar câmpul magnetic din armătura I să difere de cel din restul circuitului.
- Bobinele de măsură, atât cea de inducție magnetică cât și cele destinate măsurării intensității câmpului magnetic nu sunt perfect executate și nu pot fi plasate perfect simetric, fapt care generează o asimetrie și în forma de undă a semnalelor achiziționate (fiind necesară corecția software a formelor de undă). În plus formele de undă, în special cele obținute la curenți intensi sunt puternic distorsionate și datorită armonicilor spațiale, amplificate de dispersia puternică a câmpului produs în bobinele de excitație.
- Impedanța puternic neliniară și variabilă cu frecvență a dispozitivului de măsură determină limitări în putere ale surselor de energie care alimentează dispozitivul experimental. Acest lucru este pregnant la frecvențe superioare celei industriale, tensiunea de alimentare furnizată de lanțul de măsură devine puternic nesinusoidală.
- La câmpuri intense, apar vibrații ale întregului dispozitiv care determină câmpuri electromagnetice parazite ce afectează istoricul miezului magnetic cu histerezis.
- Ecranarea bobinelor de măsură asigură corectitudinea măsurării fluxului magnetic prin miez (bobina B). Bobina H este însă plasată la cca. 3 mm de suprafața miezului și măsoară un câmp diminuat față de cel interior. Diferența este cu atât mai mare cu cât excitația este mai puternică și câmpul magnetic se atenuează mai lent în spațiu. Suplimentar apare și distribuția neomogenă a câmpului în secțiunea pătrată a miezului măsurat.
- Jugul izotrop favorizează dispersia câmpului magnetic la joncțiunea dintre piesele U și I.
 - *Pentru integratorul analogic RC*
- Integratorul furnizează semnalele proporționale cu inducția magnetică respectiv intensitatea câmpului magnetic (mărimi locale) în mod indirect, folosind semnale (tensiuni electrice-mărimi integrale). În acest fel constantele de proporționalitate depind de o serie de factori constructivi ai dispozitivului experimental dificil de calculat cu exactitate, aceștia putând fi doar estimați în funcție de geometria concretă a dispozitivului.
- Principala sursă de eroare constă în faptul că integratorul nu poate considera și rezistență ohmică a dispozitivului experimental investigat. În acest fel tensiunea aplicată dispozitivului este ușor diferită de tensiunea integrată.
- Prin modul în care este conceput integratorul poate funcționa exclusiv la 50 Hz (atunci tensiunea de pe condensator este proporțională cu inducția magnetică- ce rezultă din integrarea tensiunii aplicare)

În concluzie, valorile măsurate pentru H corespund unei valori mediate ideale (fără dispersie) pentru întreg circuitul magnetic - în cazul montajului cu integrator RC, respectiv unei valori diminuate, corespunzătoare câmpului în miezul I – în cazul demonstratorului experimental.

Verificarea (calibrarea) bobinelor de măsură s-a realizat și în cadrul unui **sistem de bobine Helmholtz** alimentate în curent alternativ (50 Hz). Montajul prezentat în fig. 9 mai 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.



Fig. 9. Schema și aparatele utilizate pentru verificarea bobinelor de câmp cu ajutorul bobinelor Helmholtz.

Măsurătorile au fost efectuate pentru două valori ale curentului prin bobinele Helmholtz - 0.5 A și 1 A. Integrarea tensiunii captate cu bobina B necesită recalcularea constantei de proportionalitate.

Toate semnalele sunt sinusoidale, de frecvență $f=50\text{Hz}$, comparația putându-se face cu ajutorul mărimilor efective măsurate prin cele 2 metode: cu ajutorul bobinelor de măsură ale demonstratorului experimental, respectiv cu sonda Hall a fluxmetrului. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul I.

Tabelul I. Etalonarea cu ajutorul sondei Hall pentru doi curenți de excitație

I [A]	B_Hall [T]	B_bobine [T]	H_Hall [A/m]	H_bobine [A/m]	kH_corectat	kB_corectat
0.5	0.00385	0.004429	3063.733	2458.375	$66.148 \cdot 10^6$	4.346
1	0.00772	0.008828	6143.381	4655.915	$70.352 \cdot 10^6$	4.372

Se observă 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 calitativ cu observațiile de la calibrarea cu integratorul RC.**

Toate măsurătorile au fost efectuate de către echipa CO-UPB la 50 Hz, folosind alimentarea directă de la rețea prin intermediul unui autotransformator.

D.II.1.2. Analiza datelor experimentale si testarea functionalitatii modulelor software.

Echipa Co-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 prezentate în etapa precedentă (livrabilul D.I.3.4). 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 trebuie 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 în continuare pentru miezul de referință din tole de FeSi izotrope având grosimea de 1 mm.

1. Conversia, simetrizarea și centrarea datelor achiziționate prin osciloscop.

Tensiunile induse în bobinele de măsură ale mărimilor H și B au fost achiziționate în 2 fișiere tip *.DAT cu ajutorul osciloscopului. Fișierele au fost citite de programul elaborat în MATLAB, iar datele au fost rărite (eșantionate) la dimensiunea dorită (de exemplu, 200 puncte pe o perioadă) și a fost izolată o singură perioadă. Calculul integralei fiecărei tensiuni induse a permis identificarea valorii medii (offset-ul semnalului) ce este numeric eliminat pentru a obține un semnal H sau B periodic. Totodată se calculează factorul de formă k_f pentru a aprecia abaterea față de forma sinusoidală ($k_f = 1.11$). Ciclul primar $B(H)$ este centrat apoi, având în vedere că integrala se efectuează pornind de la vârful ciclului.

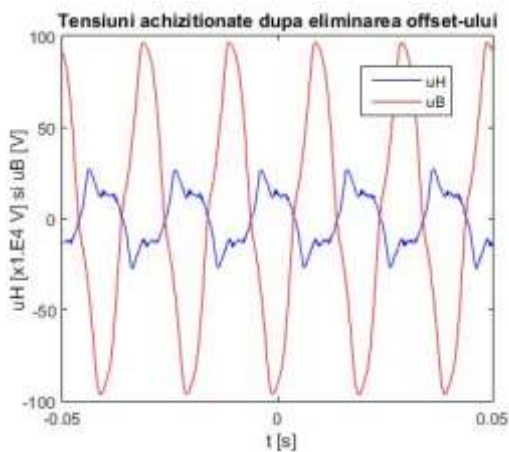
Un fragment din codul elaborat este prezentat în fig. 1, iar semnalele succesiv obținute prin prelucrare sunt prezentate în fig. 2.

```

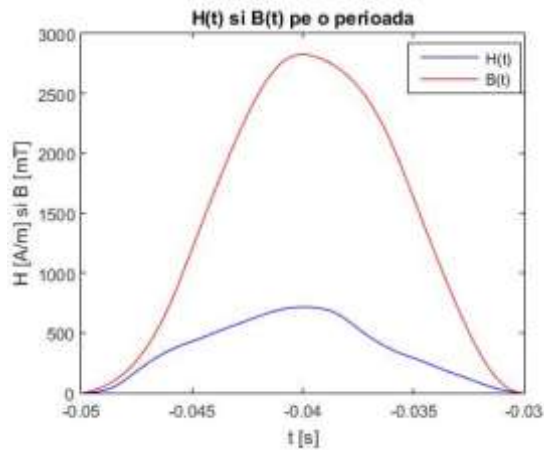
Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\Filtrare_offset.m*
Filtrare_offset.m* x +
1 % Citire fișiere .DAT achiziționate de la osciloscop:
2 % canal C1 = (timp, tensiune pe bobina H)
3 % canal C2 = (timp, tensiune pe bobina H)
4 % Ulterior, se raresc punctele, se elimina componenta continua (offset),
5 % se izoleaza o perioada si se integreaza.
6 clear
7
8 f=50.; % frecventa masuratorii
9 N_HB=200; % numar dorit de puncte per perioada (corespunde unui ciclu)
10 kH=53.078E6; % constanta integrare bobina H
11 kB=5.; % constanta integrare bobina B
12
13 mH=load('C1Trace00000.dat'); % incarcare fisier tensiune bobina H
14 mB=load('C2Trace00000.dat'); % incarcare fisier tensiune bobina B
15
16 % Vizualizare date, eventuala punere in faza si amplificare
17 figure('Name','1E4*uH(t),uB(t) masurate','NumberTitle','off')
18 plot(mH(:,1),10000*mH(:,2),'b',mB(:,1),mB(:,2),'r')
19 mB(:,2)=-mB(:,2); % daca este nevoie
20 mH(:,2)=-mH(:,2); % daca este nevoie
21
22 N=length(mH); %nr pct. achizitionate
23 t=mH(:,1); %momentele de timp masurate
24 dt=t(2)-t(1); % pas de timp la masurare
25 Nt=uint32(1/(f*dt)); % nr. puncte masurate per perioada (rotunjit)
26 uH=mH(:,2); % tensiune masurata pe bobina H
27 uB=mB(:,2); % tensiune masurata pe bobina B
28
29 % rarire puncte la N_HB dorit (vezi la inceput)
30 rar=uint32(Nt/N_HB); % pas rarire siruri
31 uHr=uH(1:rar:N); uBr=uB(1:rar:N);
32 Nr=length(uBr); % nr. puncte al sirurilor rarite
33 dtr=dt*double(rar); % pas de timp rarit
34 Ntr=uint32(1/(f*dtr)); % nr. puncte rarite per perioada (rotunjit)

```

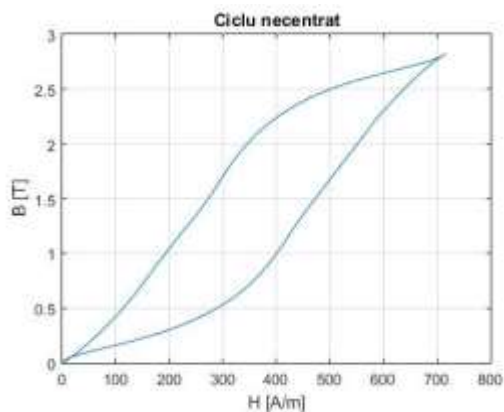
Fig. 1. Fragment din codul scris pentru conversia, simetrizarea și centrarea datelor achiziționate prin osciloscop



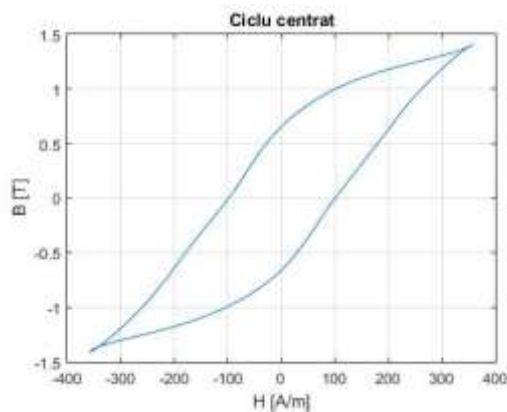
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. 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.

2. Salvarea ciclurilor de histerezis, calculul pierderilor măsurate și concatenarea datelor.

Ciclu de histerezis obținut pentru fiecare frecvență și fiecare amplitudine a excitației, precum și factorul de formă și pierderile totale calculate din datele măsurate sunt înregistrate în câte un fișier *.xlsx, cu ajutorul modulelor software prezentate parțial în fig. 3. De exemplu, în fig. 4 sunt prezentate pierderile calculate pentru miezul de referință FeSi la 50 Hz, pentru diverse amplitudini, pe baza ciclurilor de histerezis măsurate cu ajutorul demonstratorului experimental. Ciclurile externe sunt distorsionate deoarece forma de undă a tensiunii induse în bobina de măsură a lui $B(t)$ este deformată față de forma sinusoidală. Se aranjează fișierul ce conține familia ciclurilor de histerezis concatenate și se salvează drept “SST_XXX.xlsx” sheet “cicluri” (XXX=codul dorit folosit mai departe).

3. Generarea rețelei de discretizare a planului Preisach și eșantionarea familiei de cicluri conform rețelei fixate pentru planul modelului de histerezis Preisach.

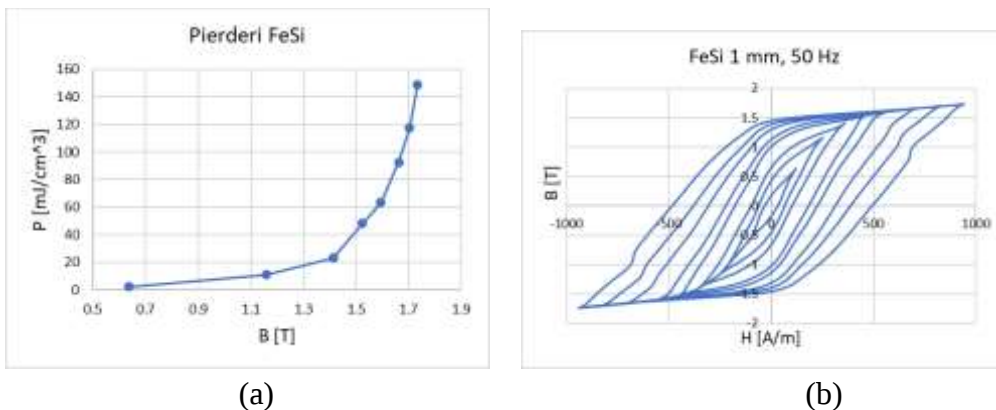
Se rulează modulul software “gen_grid_HB.m” (vezi fig. 5) generându-se în fișierul “SST_XXX.xlsx” sheet-ul “curbaHB” ce conține curba normală de magnetizare alcătuită din vârfurile ciclurilor de histerezis măsurate. Se rulează modulul software “sort_cicluri_HB.m” (vezi fig. 6) citind din fișierul “SST_XXX.xlsx” și generând fișierul “Rez_ident_XXX.xlsx” sheet-urile “cicluri_desc”, “cicluri_asc” și “H_grid”. Se generează astfel familia curbelor descendente, respectiv ascendente ale ciclurilor de histerezis sortate în nodurile rețelei de discretizare ce va fi utilizată de modelul Preisach.

```

Editor - D:\2017 ELIDEP.3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\Filtrare_offset.m
Filtrare_offset.m
93 - ShiftTH=k; % (decalare fata de t_initial a momentului H=Hsat)
94
95 % Integrare cumulativa incepind cu varful de maxim al ciclului !
96 dH=kH*dtr*cumtrapz(uHTf); dB=kB*dtr*cumtrapz(uBTf);
97
98 figure('Name','H(t), IE3*B(t) nesincronizate','NumberTitle','off')
99 plot(trar(1:Ntr),dH,'b',trar(1:Ntr),1000*dB,'r')
100
101 figure('Name','Ciclu necentrat','NumberTitle','off')
102 plot(dH,dB)
103
104 % Centrare ciclu:
105 BO=max(dB)-(max(dB)-min(dB))/2; HO=max(dH)-(max(dH)-min(dH))/2;
106 for k=1:Ntr
107     B(k)=-BO+dB(k); H(k)=-HO+dH(k);
108 end;
109 figure('Name','Ciclu centrat','NumberTitle','off')
110 plot(H,B)
111
112 % Verificare forma sinusoidala B(t)
113 kf=rms(B)/mean(abs(B)) % factor forma (=1.11 pt. sinus)
114 xlswrite('HB_0.xlsx',kf,'kf'); % scriere in fisier
115
116 HB=[H',B'];
117 xlswrite('HB_0.xlsx',HB,'HB'); % scriere in fisier
118
119 % Calcul pierderi (in W/m^3)
120 P=0; % initializare pierderi
121 for k=2:Ntr
122     P=P+(H(k)+H(k-1))*(B(k)-B(k-1))/2; % adauga H*dB
123 end;
124 P=P*f % pierderi in [W/m^3]
125 xlswrite('HB_0.xlsx',P,'P'); % scriere in fisier

```

Fig. 3. Fragment din codul scris pentru calculul factorului de forma, a pierderilor măsurate și pentru salvarea datelor.



(a)

(b)

Fig. 4. Pierderi calculate (a) pe baza ciclurilor de histerezis măsurate (b) la 50 Hz pentru miez laminat de FeSi

```

Editor - D:\2017 ELIDEP.3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\gen_grid_HB.m
gen_grid_HB.m
9 - SST=xlswrite('SST_FeSi','cicluri'); %citire valori masurate pt. cicluri
10 Grid=zeros(3*N+1,2); %initializare grid Preisach (de la -Hsat la Hsat)
11 Grid(N+1,1)=0.; Grid(N+1,2)=0.; % nu opere in cicluri
12 for k=1:N %pentru fiecare ciclu (k)
13     % Sortare valori ciclu (k) necesare
14     initial=NP*(k-1)+1; %de unde incepe ciclul (k)
15     final=initial+NP;%unde se termine ciclul (k)
16     [Hfix,Ifix]=min(SST(initial:final,3)); %localizare valoare H minima
17     Grid(N+1-k,1)=SST(initial+Ifix-1,3); % H grid negativ
18     Grid(N+1-k,2)=4*pi*1.E-4*SST(initial+Ifix-1,3)+SST(initial+Ifix-1,4);
19     % B grid negativ (B=mu0*H+J)
20     [Hfix,Ifix]=max(SST(initial:final,3)); %localizare valoare H maxim
21     Grid(N+1+k,1)=SST(initial+Ifix-1,3); % H grid pozitiv
22     Grid(N+1+k,2)=4*pi*1.E-4*SST(initial+Ifix-1,3)+SST(initial+Ifix-1,4);
23     % B grid pozitiv
24 end; %cicluri simetrice
25 xlswrite('SST_FeSi',Grid,'cuthbHB');

```

Fig. 5. Fragment din codul scris pentru construcția curbei normale de magnetizare

```

Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\sort_cicluri_HB.m
sort_cicluri_HB.m
72 - Iasc=size(Asc,1);
73 - % ----- Pentru curbele descendente:
74 - BCdesc(k,1)=SST(initial+Imax-1,4);
75 - BCdesc(k,2*k+1)=SST(initial+Imin-1,4);
76 - for j=(2*k):-1:1
77 -     Hj=H_grid(N-k+j); %valoarea din H_grid
78 -     [Hfix, Ifix]=min(abs(Asc-ones(Iasc,1)*Hj));
79 -     BCdesc(k,2*k-j+2)=SST(initial+Imax+Ifix-1,4);
80 - end;
81 - % ----- Pentru curbele ascendente:
82 - BCasc(k,1)=SST(initial+Imin-1,4);
83 - BCasc(k,2*k+1)=SST(final,4);
84 - for j=2:2*k
85 -     Hj=H_grid(N-k+j); %valoarea din H_grid
86 -     [Hfix, Ifix]=min(abs(Asc-ones(Iasc,1)*Hj));
87 -     BCasc(k,j)=SST(final-Iasc+Ifix+1,4);
88 - end;
89 - end;
90 - end; %cicluri simetrice
91 - xlswrite('Rez_ident_FeSi',BCdesc,'cicluri_desc');
92 - xlswrite('Rez_ident_FeSi',BCasc,'cicluri_asc');
93 - xlswrite('Rez_ident_FeSi',H_grid(2:2*N+1),'H_grid');

```

Fig. 6. Fragment din codul scris pentru sortarea punctelor din ciclurile de histerezis măsurate conform rețelei de discretizare a planului Preisach.

4. Identificarea funcției Everett

Predeterminarea pierderilor în miezuri magnetice supuse unor excitații nesinusoidale (deformate) implică estimarea pierderilor prin histerezis pentru cicluri ce includ cicluri minore produse de armonicile deformatoare ale sinusoidei. Pentru aceasta se folosește modelul de histerezis Preisach. Utilizarea sa robustă impune folosirea funcției Everett drept parametru ce este identificat cu ajutorul familiei de cicluri de histerezis măsurate conform rețelei de ediscretizare alese. Pentru aceasta, se rulează modulul software “conversie_SST_Everett_B.m” (vezi fig. 7) citind din fisierul “Rez_ident_XXX.xlsx” sheet-urile “cicluri_desc”, “cicluri_asc” și generând în același fișier “Rez_ident_XXX.xlsx” sheet-ul “Everett”.

```

Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\conversie_SST_Everett_B.m
conversie_SST_Everett_B.m
6 - clear all;
7 - N=15;
8 - BCdesc=xlswrite('Rez_ident_400-65-50Hz','cicluri_desc');
9 - BCasc=xlswrite('Rez_ident_400-65-50Hz','cicluri_asc');
10
11 % Normare cicluri masurate:
12 - B_min=abs(BCdesc(N,2*N+1)); %valoare minima in modul
13 - B_max=BCasc(N,2*N+1); %valoare maxima
14 - B_norm=max([B_min B_max]); % extremul ciclurilor
15 - BCdesc(:, :)=BCdesc(:, :)/B_norm; %normare
16 - BCasc(:, :)=BCasc(:, :)/B_norm; %normare
17
18 - Ev=zeros(2*N);
19 - for k=1:N %pentru fiecare ciclu (k)
20 -     % Calcul Everett
21 -     for j=1:2*k % pe linia verticala coresp. lui i=N+k
22 -         Ev(N+k,N+k-j+1)=(BCdesc(k,1)-BCdesc(k,2*k-j+2))/2;
23 -     end;
24 -     for i=1:2*k-1 % pe linia orizontala coresp. lui j=N+k
25 -         Ev(N+k-i,N+k)=(BCasc(k,2*k-i+1)-BCasc(k,1))/2;
26 -     end;
27 - end;
28 - xlswrite('Rez_ident_FeSi',Ev,'Everett');

```

Fig. 7. Fragment din codul scris pentru identificarea funcției Everett

5. Identificarea parametrilor de material microstructurali

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:

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

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 :

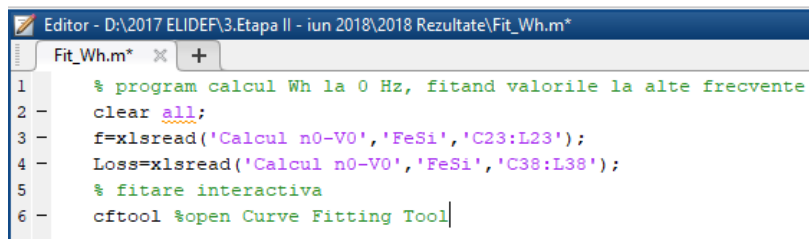
$$H_e = \frac{n_0 V_0}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4\sigma G d l}{n_0^2 V_0} \cdot \frac{dB}{dt}} - 1 \right), \quad (5)$$

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

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.

Pentru identificarea acestor doi parametri microstructurali, se procedează astfel:

- se generează tabelul pierderilor W [J/m³] (B_{max} , f) măsurate la diferite amplitudini și frecvențe;
- se rulează modulul software "Fit_Wh.m" (vezi fig. 8) pentru fiecare B_{max} , obținându-se pierderile prin histerezis corespunzătoare W_h [J/m³] (pierderi prin histerezis la 0 Hz).
- cu ajutorul formulei (4), se construiește tabelul pierderilor clasice W_c (B_{max} , f).
- cu ajutorul formulei (1), se construiește tabelul pierderilor excedentare W_e (B_{max} , f).
- se rulează modulul software "Fit_n0V0.m" (vezi fig. 9) pentru fiecare B_{max} , obținându-se dependențele $n_0=f(B_{max})$ și $V_0=f(B_{max})$.
- se rulează modulul software "Fit_n0V0_Bmax.m" (vezi fig. 10). Din fereastra afișată de cftool.m se rețin valorile coeficienților din fitarea polinomială $n_0=f(B_{max})$ și $V_0=f(B_{max})$.



```

Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\Fit_Wh.m*
Fit_Wh.m*  X  +
1      % program calcul Wh la 0 Hz, fitand valorile la alte frecvente
2      clear all;
3      f=xlsread('Calcul n0-V0','FeSi','C23:L23');
4      Loss=xlsread('Calcul n0-V0','FeSi','C38:L38');
5      % fitare interactiva
6      cftool %open Curve Fitting Tool

```

Fig. 8. Calculul pierderilor prin histerezis prin fitarea pierderilor măsurate la diferite frecvențe

```

Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\Fit_n0V0.m
Fit_n0V0.m
1 % program calcul n0 si V0 (parametri P_exces) fitand valorile
2 % la f=variabil pentru Bmax=const ; n=n0+Hexc/V0
3 clear all;
4 H_exc=xlsread('Calcul n0-V0','FeSi','C99:L113');
5 n=xlsread('Calcul n0-V0','FeSi','C120:L134');
6 NB=size(n,1); %numar valori Bmax
7 %Fitare polinomiala n=n0+hexc/Vo
8 for i=1:NB %pentru fiecare Bmax
9     p=polyfit(H_exc(i,:),n(i,:),1);
10    n0(i)=p(2);
11    V0(i)=1/p(1);
12 end;
13 xlswrite('Calcul n0-V0',n0,'FeSi','C137:C151');
14 xlswrite('Calcul n0-V0',V0,'FeSi','D137:D151');

```

Fig. 9. Calculul parametrilor microstructurali n_0 și V_0 pentru fiecare amplitudine B_{max} , prin fitarea valorilor calculate pentru diferite frecvențe

```

Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\Fit_n0V0_Bmax.m*
Fit_n0V0_Bmax.m*
1 % program fitare n0=f(Bmax) si V0=f(Bmax)
2 clear all;
3 BmT=xlsread('Calcul n0-V0','FeSi','B137:B151');
4 B=BmT*0.001; % in T
5 n0=xlsread('Calcul n0-V0','FeSi','C137:C151');
6 V0=xlsread('Calcul n0-V0','FeSi','D137:D151');
7 %Fitare interactiva
8 cftool %open Curve Fitting Tool

```

Fig. 10. Calculul coeficienților din polinoamele aproximante ale dependențelor $n_0=f(B_{max})$ și $V_0=f(B_{max})$

6. Calculul estimativ al pierderilor pentru o alta frecvență, altă amplitudine sau pentru o excitație nesinusoidală.

Se ruleaza modulul software “calc_P.m” (vezi fig. 11) citind din fisierul “Rez_ident_XXX.xlsx” sheet-urile “Everett”, “H_grid”, iar din fisierul “SST_XXX.xlsx” sheet-ul “curbaHB”. Se genereaza in fisierul “Rezultate_XXX.xlsx” sheet-urile “H-B” si “Errori” continuand rezultatele aplicarii modelului Preisach invers $H(B)$. Programul foloseste si functia “Magnetization.m” (vezi fig. 12). Rezultatele calculului pierderilor (P_h , P_c , P_e si P , in W/kg) sunt inscrise in fisierul “Rezultate_XXX.xlsx” sheet-ul “Loss”.

Testarea modulelor software prezentate la etapele 1-3 s-a realizat pentru datele obținute la 50 Hz, pentru un miez realizat din tole FeSi similare celor folosite la construcția jugului demonstratorului experimental. Celelalte module software, prezentate în etapele 4-6, necesită măsurători la mai multe frecvențe. Din această cauză, testarea funcționalității lor s-a facut utilizând un set de cicluri de histerezis obținute experimental pentru tole FeSi prin metoda standardizată a testerului unitolă. Rezultatele testelor au fost foarte bune, o parte din rezultate fiind diseminate în lucrări publicate.

```

Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\calc_P.m*
calc_P.m* x +
133 - end; % pt. fiecare valoare B_new(i_new) din scenariu
134 - H_B=[H_new(N_demag+1:N_new), B_new(N_demag+1:N_new)];
135 - xlswrite('rezultate_FeSi', H_B, 'H-B'); %scriere in fisier H[A/m] si B[mT]
136 - xlswrite('rezultate_FeSi', Error_B, 'Error'); %scriere eroare inversare
137 - dt=1/(f1*(N_new-N_demag-1)); %pas de timp [sec.]
138 - Bp=0.001*B_new(N_demag+1); % valoarea maxima Bmax=Bp [T]
139 - Ph=0.; Pc=0.; Pe=0.; %initializare
140 - % Calcul puteri medii Ph, Pc pe o perioada [W/kg]
141 - for i=N_demag+2:N_new %pentru fiecare moment de timp
142 - dB=(B_new(i)-B_new(i-1))*0.001; %variatia lui B [T]
143 - Ph=Ph+0.5*(H_new(i)+H_new(i-1))*dB;
144 - Pc=Pc+(0.5*(B_new(i)+B_new(i-1))*0.001*abs(dB)*dB/(Bp*dt)+dB^2/dt);
145 - end;
146 - Ph=Ph*f1/ro; %pierderile prin histerezis [W/kg]
147 - Pc=Pc*f1*Sigma*d^2*1.E-6/(8*ro); %pierderile clasice [W/kg]
148 -
149 - n0=pln*Bp^5+p2n*Bp^4+p3n*Bp^3+p4n*Bp^2+p5n*Bp+p6n;
150 - V0=plv*Bp^5+p2v*Bp^4+p3v*Bp^3+p4v*Bp^2+p5v*Bp+p6v;
151 - for i=N_demag+2:N_new; %pentru fiecare moment de timp
152 - dB=(B_new(i)-B_new(i-1))*0.001; %variatia lui B [T]
153 - Hw=Sigma*G*(S*1.E-6)*dB/dt; %campul peretelui [A/m]
154 - Hexc=(n0*V0/2)*(sqrt(1+4*Hw/(V0*(n0^2)))-1); %camp in exces [A/m]
155 - Pe=Pe+Hexc*dB;
156 - end;
157 - Pe=Pe*f1/ro; %pierderile in exces [W/kg], medii pe o perioada
158 - P=Ph+Pc+Pe; %pierderile totale [W/kg], medii pe o perioada
159 - Loss=[Ph;Pc;Pe;P];
160 - Loss_abs=abs(Loss)
161 - xlswrite('rezultate_FeSi', Loss, 'Loss');

```

Fig. 11. Fragment din codul scris pentru calculul pierderilor estimate

```

Editor - D:\2017 ELIDEF\3.Etapa II - iun 2018\2018 Rezultate\Magnetization.m*
Magnetization.m* x +
103 - M_new=M_old+2*M_sat*s_new*E_new; %daca nu se sterg extreme din Hist(ory)
104 - if (kk>=2)%se sterg extremele 2...kk din Hist(ory)
105 - s_E=1; %semnul fiecarui E (alterneaza)
106 - for k=2:kk
107 - M_new=M_new-2*M_sat*s_old*s_E*Hist(3,k);
108 - s_E=-s_E;
109 - end;
110 - end
111 - % Actualizare linie de stare temporara
112 - Hist(1:3,1)=[H_new; H_new; 0.]; %punctul 1'
113 - if (kk==1) % se insereaza punctul nou pe pozitia 2
114 - N_hist=N_hist+1;
115 - for k=(N_hist-1):-1:2
116 - Hist(1:3,k+1)=Hist(1:3,k); % se deplaseaza extremele 3... la dreapta
117 - end;
118 - Hist(1:3,2)=[Hi; Hj; E_new]; %punctul 2'
119 - elseif (kk==2) % se inlocuieste punctul 2 cu punctul nou
120 - Hist(1:3,2)=[Hi; Hj; E_new];
121 - elseif (kk<N_hist) % se sterg extremele 3...kk dar nu pana la capat
122 - Hist(1:3,2)=[Hi; Hj; E_new]; % se inlocuieste punctul nou pe pozitia 2
123 - Hist=cat(2, Hist(1:3,1:2), Hist(1:3,(kk+1):N_hist));
124 - N_hist=N_hist-kk+2;
125 - else % se sterg extremele de la 3 pana la capat (kk=N_hist)
126 - Hist(1:3,2)=[Hi; Hj; E_new]; % se inlocuieste punctul nou pe pozitia 2
127 - N_hist=2;
128 - end; %actualizare linie de stare
129 - Hist_temp=Hist;
130 - M_new_temp=M_new;
131 - s_new_temp=s_new;

```

Fig. 12. Fragment din codul scris pentru funcția MATLAB utilizată în modulul software de calcul al pierderilor

D.II.2. ANALIZA EFICIENȚEI ENERGETICE A MIEZURILOR SMNC ESTIMATA CU AJUTORUL DEMONSTRATORULUI EXPERIMENTAL DE LABORATOR PENTRU GAME EXTINSE DE FRECVENTA (Raport tehnic, CO+P1)

Raportul conține rezultatele activităților A.II.2 și A.II.3 din Planul de realizare.

D.II.2.1. Efectuarea experimentelor proiectate si elaborarea rapoartelor de masurare.

În conformitate cu planul de realizare al proiectului ELIDEF, partenerul P1-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. Astfel, folosind Magnetometrul cu Probă Vibrantă (VSM – Vibrating Sample Magnetometer - <https://erris.gov.ro/LTM-UPB>), s-au ridicat caracteristicile statice ale eșantioanelor compozite tip pulbere puse la dispoziție de IPCE-CA. Această caracterizare preliminară permite 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 P1-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***). Ciclurile de magnetizare specifica sunt prezentate în fig. 1. Pentru pulberile bazate pe α -Fe, la câmpuri intense (peste 11 kOe), eșantioanele se magnetizează puternic, deplasând tija VSM-ului din poziția centrală, ceea ce duce la deformările din extremele graficelor respective.

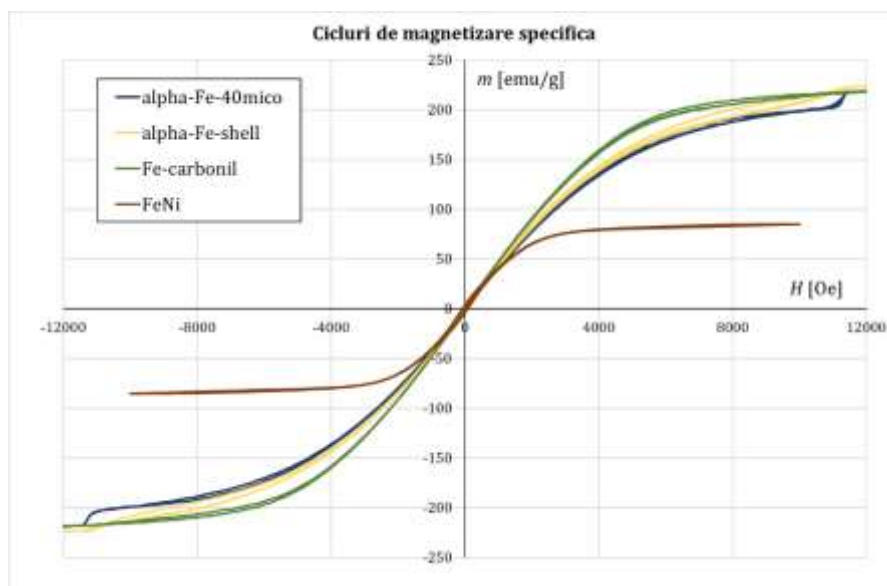


Fig. 1. Curbele de magnetizare pentru cele 4 materiale în sistemul CGS

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*. De exemplu, în fig. 2 sunt prezentate unele dintre pierderile de putere măsurate pentru Distaloy, iar în fig. 3 sunt pierderile calculate din măsurătorile pe FeNi.

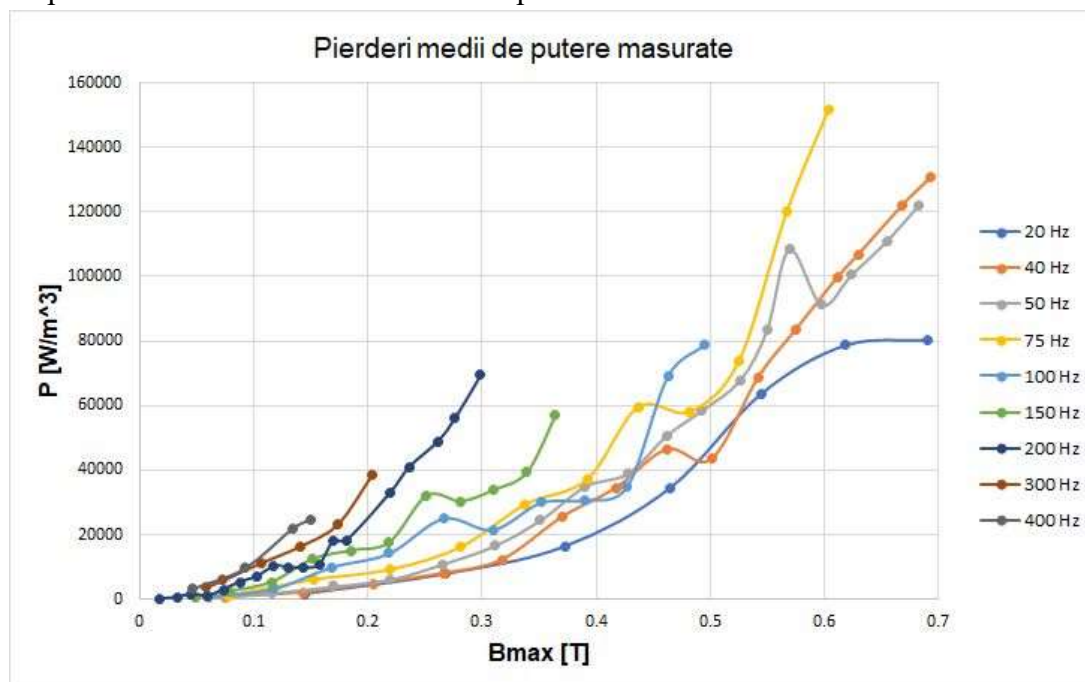


Fig. 2. Pierderi experimentale de putere pentru Distaloy

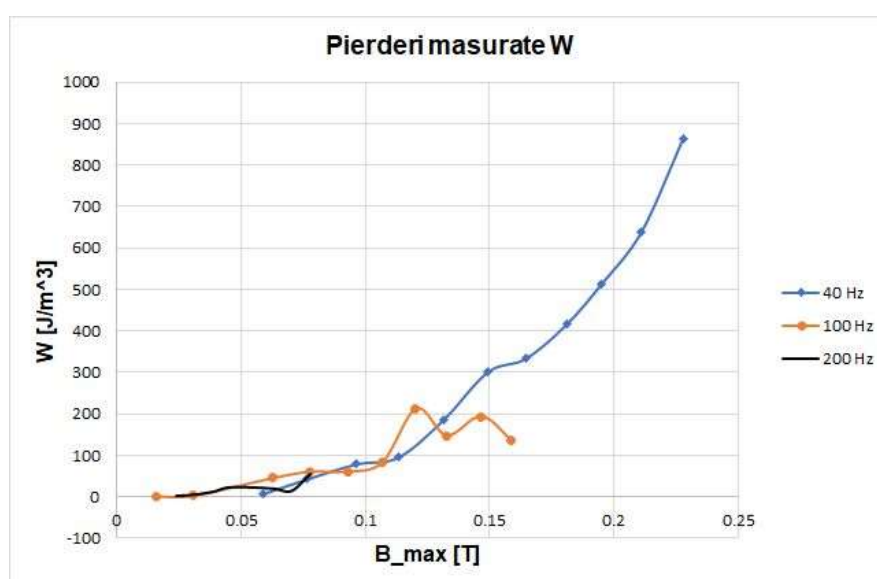


Fig. 3. Pierderi experimentale pentru FeNi

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.

Coordonatorul CO-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. 4 sunt prezentate pierderile totale rezultate din măsurătorile efectuate pe un miez sinterizat din nanopulbere de FeCo, iar în fig. 5 sunt prezentate pierderile rezultate din măsurători pentru miezul laminat de FeSi.

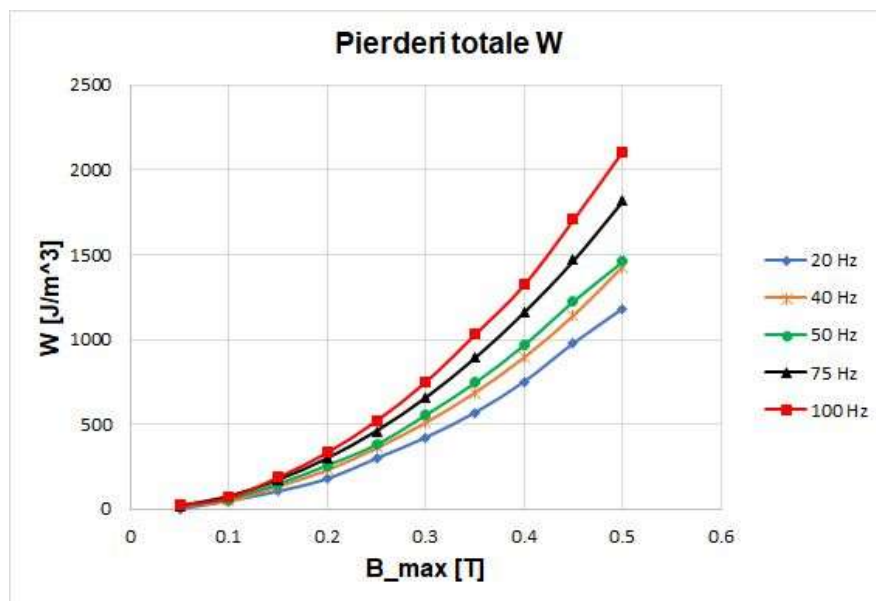


Fig. 4. Pierderi experimentale pentru miez nanocompozit de FeCo

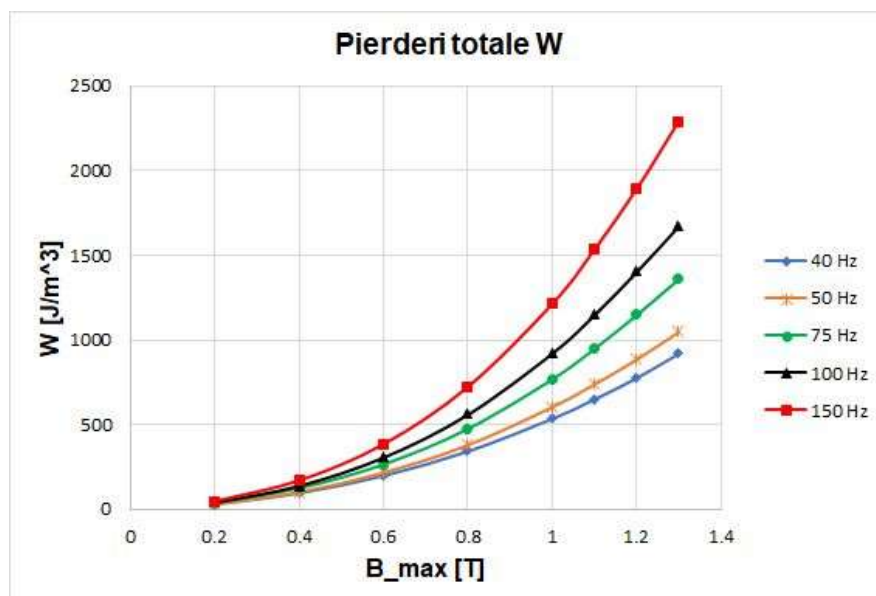


Fig. 5. Pierderi experimentale pentru miez laminat de FeSi-NO

Totodată, au fost efectuate măsurători pentru **frecvențe mai ridicate**: 150 Hz pentru FeCo, respectiv 200 Hz și 300 Hz pentru FeSi. Aceste date vor fi folosite pentru testarea metodei de predeterminare a pierderilor.

D.II.2.2. Identificarea valorilor parametrilor energetici caracteristici miezurilor SMnC pentru frecvențele de masura.

Procedura de predeterminare a pierderilor folosește separarea pierderilor măsurate în cele 3 componente (histerezis, clasice și excedentare) și identificarea parametrilor energetici specifici materialului: funcția numerică Everett E_v (pentru modelul de histerezis static Preisach) și cei doi parametri microscopici n_0 și V_0 necesari estimării pierderilor excedentare.

Valorile normate ale funcției numerice Everett pe triunghiul din planul Preisach discretizat conform celor 20, respectiv 28, cicluri simetrice de histerezis măsurate pentru miezul compozit de FeCo, respectiv pentru miezul laminat de FeSi, sunt prezentate în fig. 1

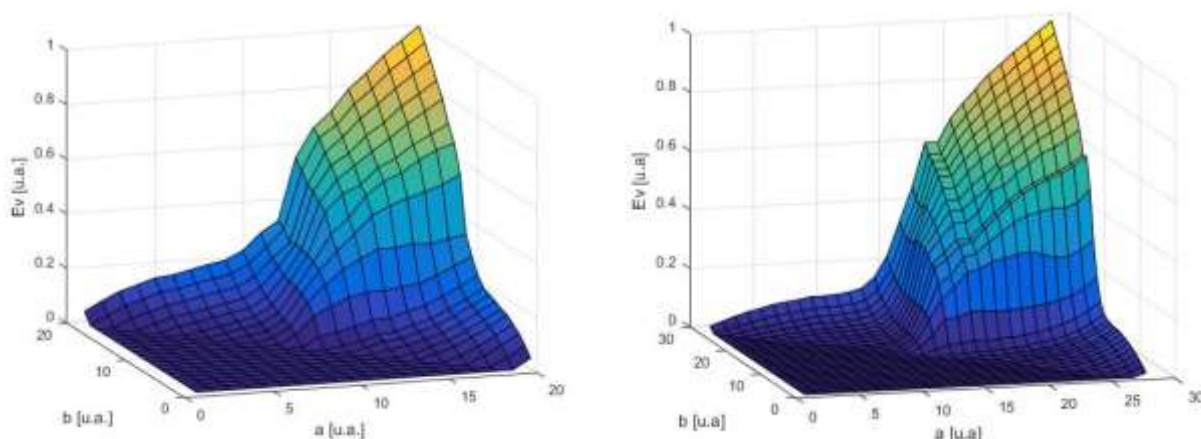


Fig. 1. Distribuția Everett pentru miezul nanocompozit de FeCo (stânga) și pentru miezul laminat de FeSi-NO (dreapta)

Separarea pierderilor pentru **miezul nanocompozit din FeCo**, respectiv pentru **miezul laminat de FeSi**, conduce la componentele prezentate în fig. 2 și fig. 3. 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). Valorile calculate și cele aproximative (fitate) pentru miezul nanocompozit de FeCo sunt reprezentate în figurile 4 și 5 pentru n_0 , respectiv în figurile 6 și 7 pentru V_0 . Fitările pentru miezul laminat de FeSi sunt redată în figurile 8, 9 (pentru n_0) și 10, 11 (pentru V_0).

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 histerezis poate modela mai precis dependența $B-H$. În abordarea noastră, am utilizat modelul static Preisach; de exemplu, figura 12 prezintă un ciclu de histerezis calculat pentru miezul nanocompozit de FeCo, având amplitudinea de 0.5 T.

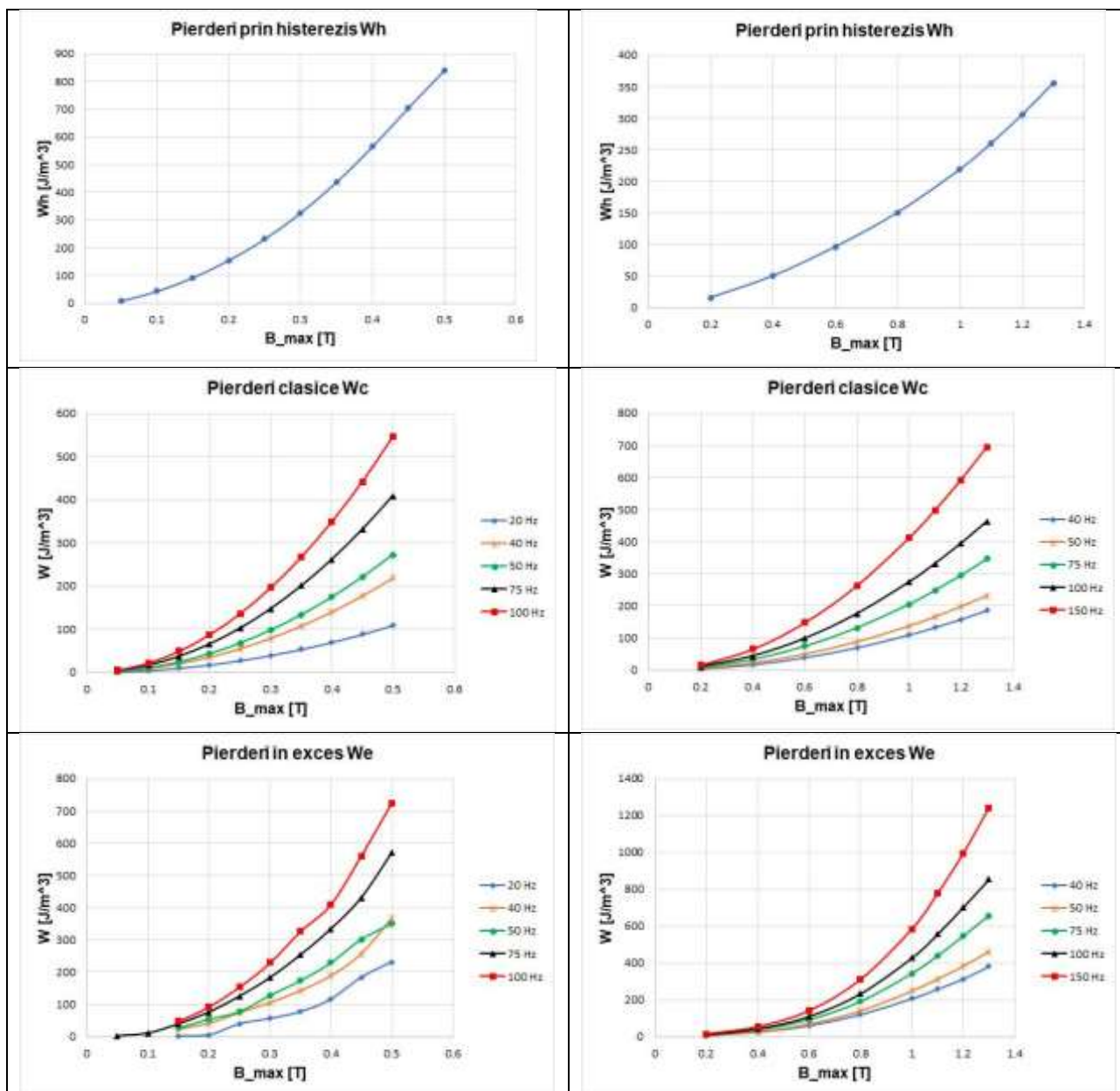


Fig. 2. Separarea pierderilor pentru miezul nanocompozit de FeCo

Fig. 3. Separarea pierderilor pentru miezul laminat de FeSi-NO

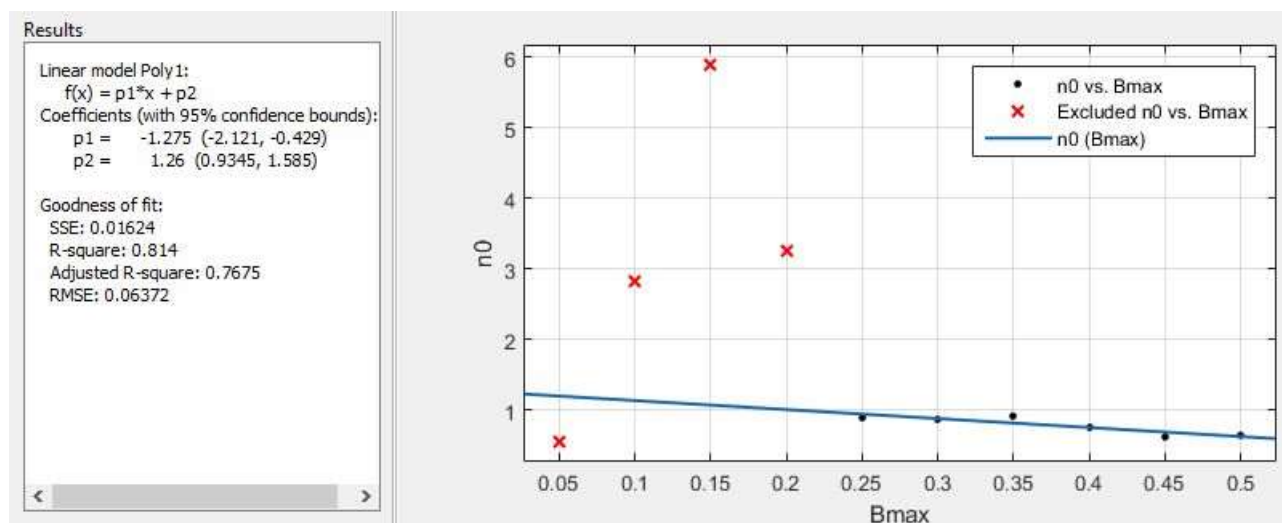


Fig. 4. Valorile lui n_0 și fitarea sa liniară pentru miezul nanocompozit de FeCo

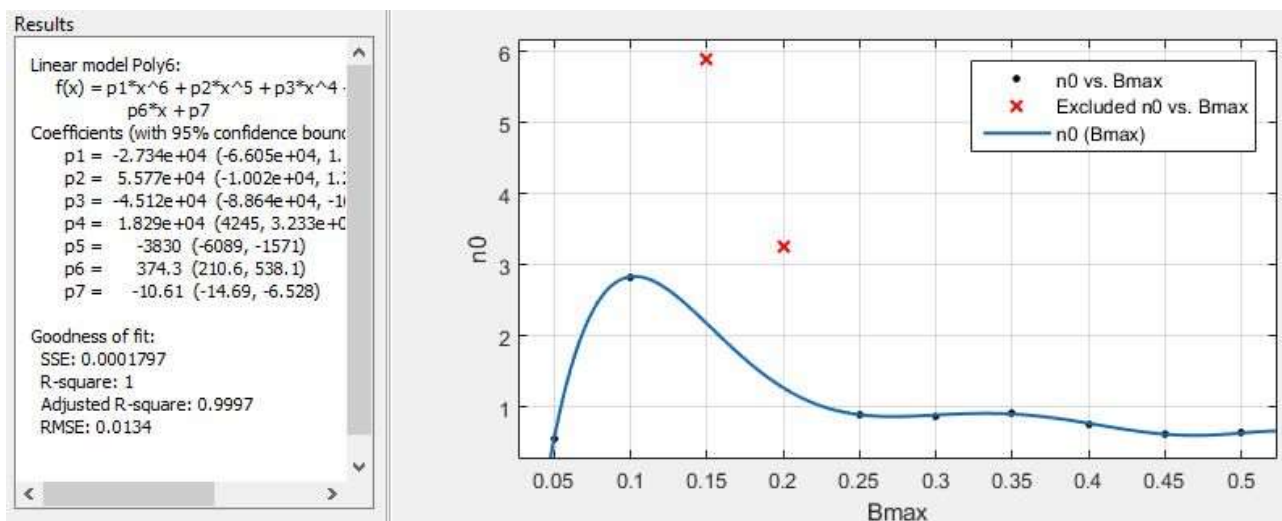


Fig. 5. Valorile lui n_0 și fitarea sa cu polinom de gradul 6 pentru miezul nanocompozit de FeCo

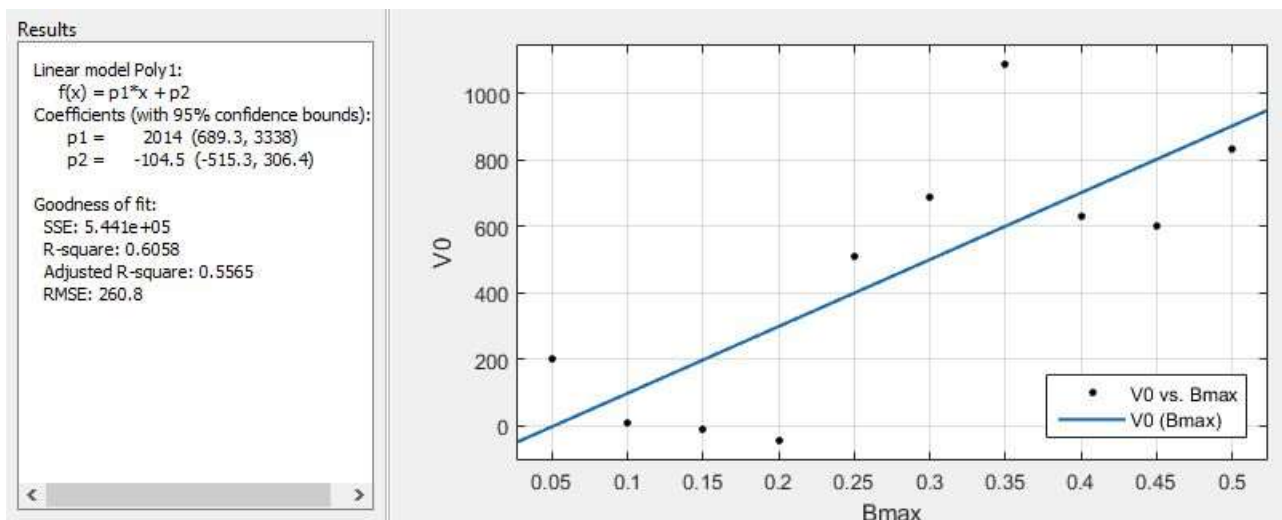


Fig. 6. Valorile lui V_0 și fitarea sa liniară pentru miezul nanocompozit de FeCo

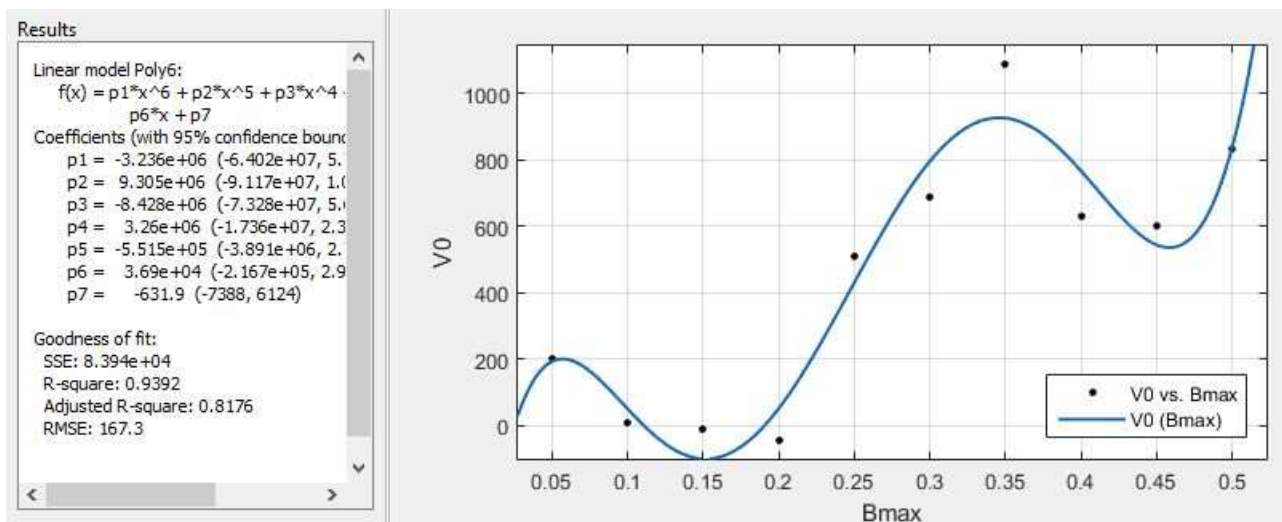


Fig. 7. Valorile lui V_0 și fitarea sa cu polinom de gradul 6 pentru miezul nanocompozit de FeCo

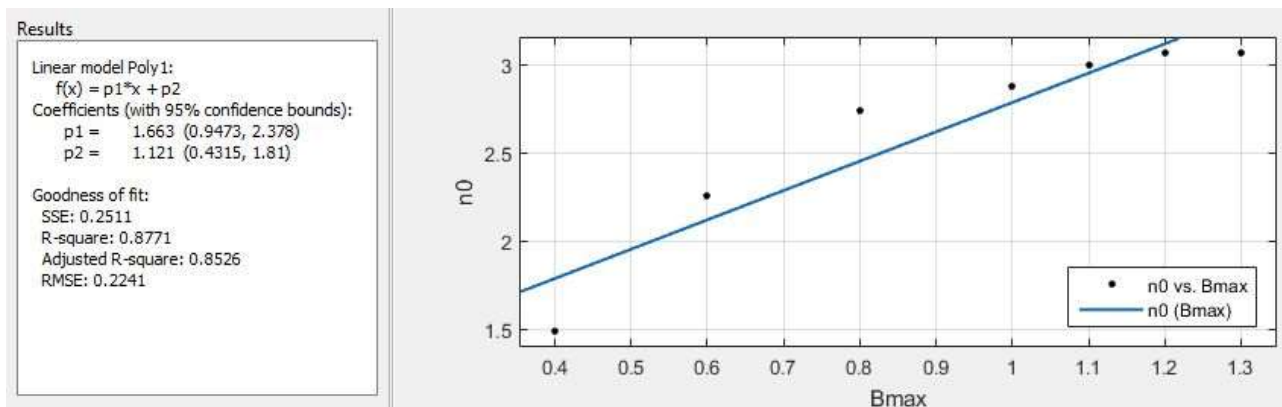


Fig. 8. Valorile lui n_0 și fitarea sa liniară pentru miezul laminat de FeSi-NO

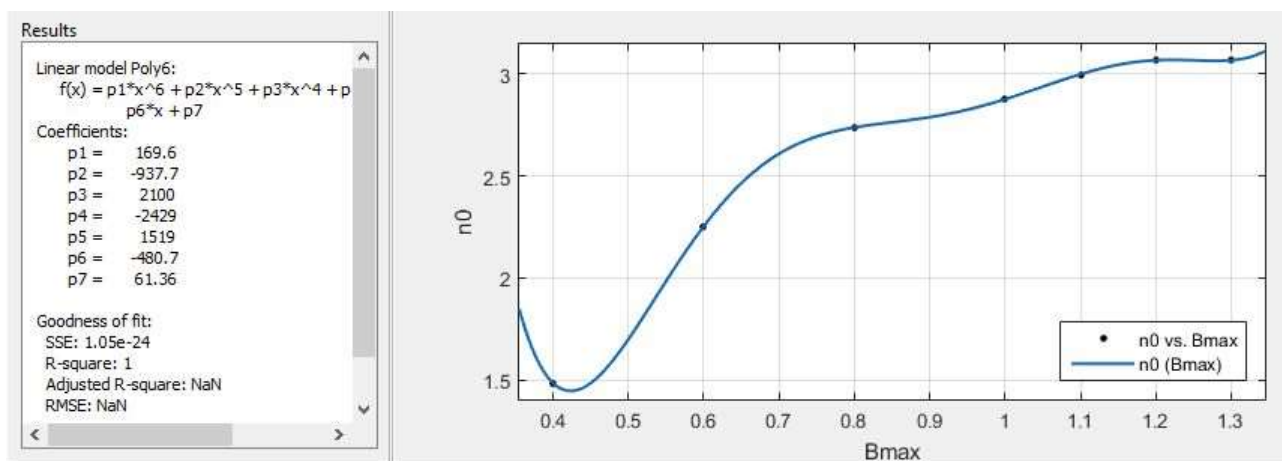


Fig. 9. Valorile lui n_0 și fitarea sa cu polinom de gradul 6 pentru miezul laminat de FeSi-NO

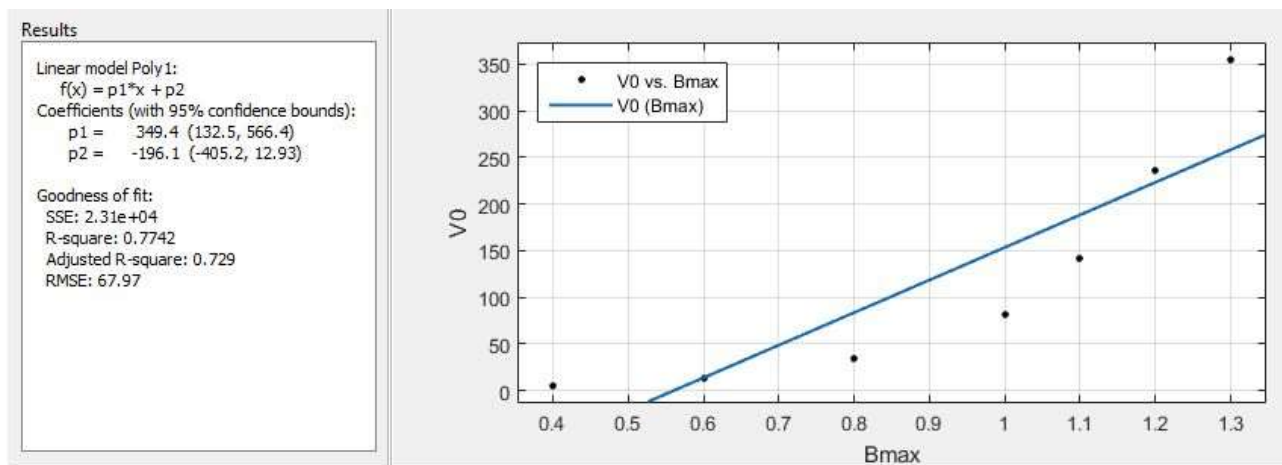


Fig. 10. Valorile lui V_0 și fitarea sa liniară pentru miezul miezul laminat de FeSi-NO

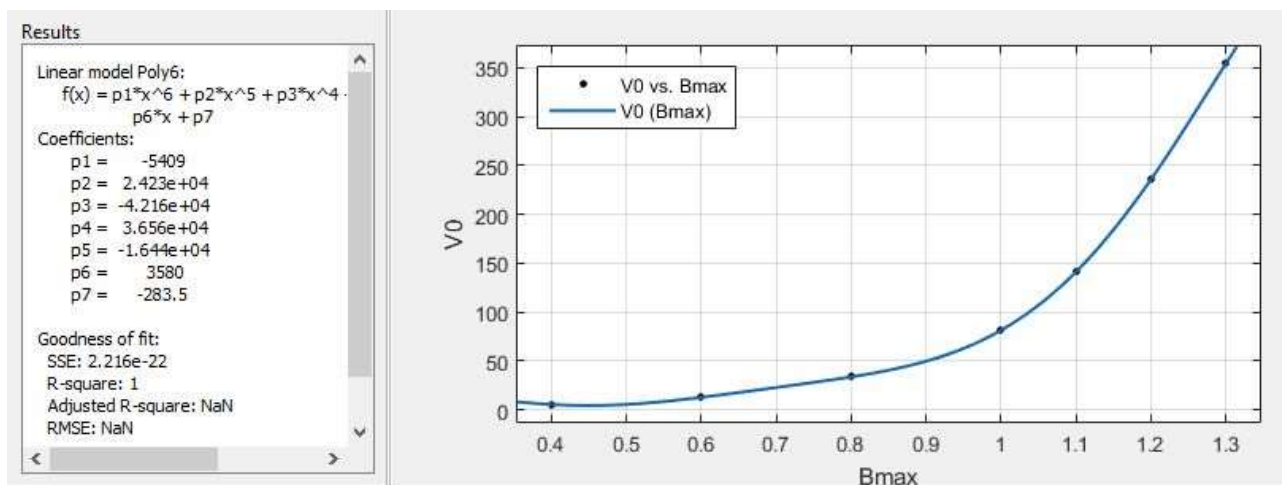


Fig. 11. Valorile lui V_0 și fitarea sa cu polinom de gradul 6 pentru miezul laminat de FeSi-NO

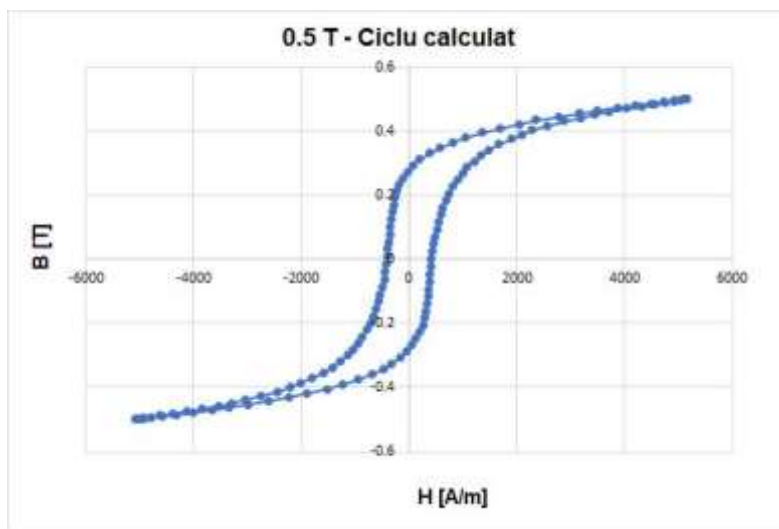


Fig. 12. Exemplu de ciclu de histerezis generat de modelul Preisach pentru miezul nanocompozit de FeCo

D.II.2.3. Estimarea pierderilor în miezul SMnC pentru game extinse de frecvență, identificarea condițiilor de aplicabilitate a conceptului formulat și enunțarea concluziilor.

Parametrii energetici de material identificați pe baza unui set de măsurători permit 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.

Astfel, pentru miezul nanocompozit de FeCo testele au vizat frecvența de 150 Hz și 2 amplitudini (0.3 T și 0.5 T), rezultatele fiind prezentate în fig. 1. Parametrii de material identificați permit 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:

$$B(t) = 1.5 \cdot \sin(2\pi f t + \varphi_1) + 0.2 \cdot \sin(6\pi f t + \varphi_3) + 0.05 \cdot \sin(10\pi f t + \varphi_5)$$

Coeficientul de deformare total (THD) este de 13.74%, semnalul fiind scalat pentru diverse amplitudini. Fazele inițiale ale armonicilor impun forma semnalului. Am considerat $\varphi_1 = \pi/2$, $\varphi_5 = -\pi/2$ și 2 cazuri: $\varphi_3 = \pi/2$ (“în fază” cu fundamentală), respectiv $\varphi_3 = -\pi/2$ (“în antifază” cu fundamentală). Formele de undă astfel generate sunt prezentate în fig. 2.

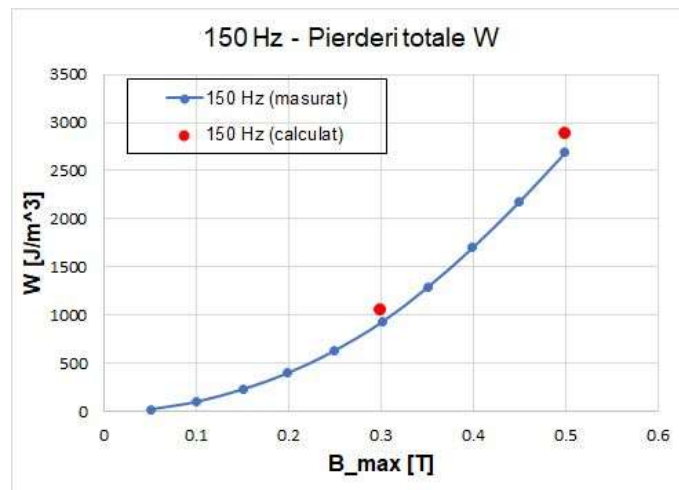


Fig. 1. Pierderi măsurate și estimate (calculate) la 150 Hz pentru miezul nanocompozit de FeCo

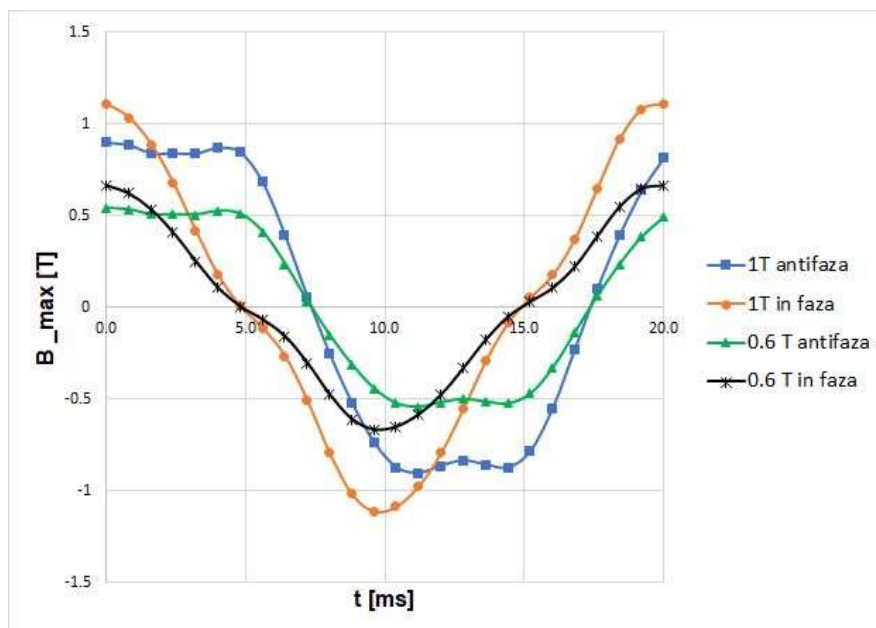


Fig. 2. Forme de undă distorsionate (armonicile 1, 3 și 5, THD=13.74%) utilizate.

Pierderile estimate pentru aceste regimuri nesinusoidale sunt comparate cu pierderile măsurate în regim sinusoidal (50 Hz) pentru aceeași amplitudine a fundamentalei (vezi fig. 3).

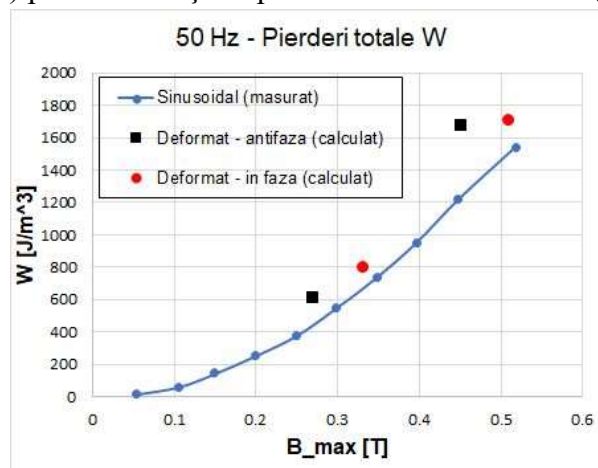


Fig. 3. Pierderi estimate pentru regim nesinusoidal în miezul nanocompozit de FeCo.

Pentru miezul laminat de FeSi-NO, pierderile estimate pentru frecvențele de 200 Hz, 300 Hz și 2 amplitudini (0.6 T și 1 T) au fost comparate cu cele măsurate – fig. 4. Estimarea pierderilor în regim deformant, pentru aceleași forme de undă ca în fig. 2, au furnizat valorile prezentate în fig. 5 alături de pierderile măsurate la 50 Hz.

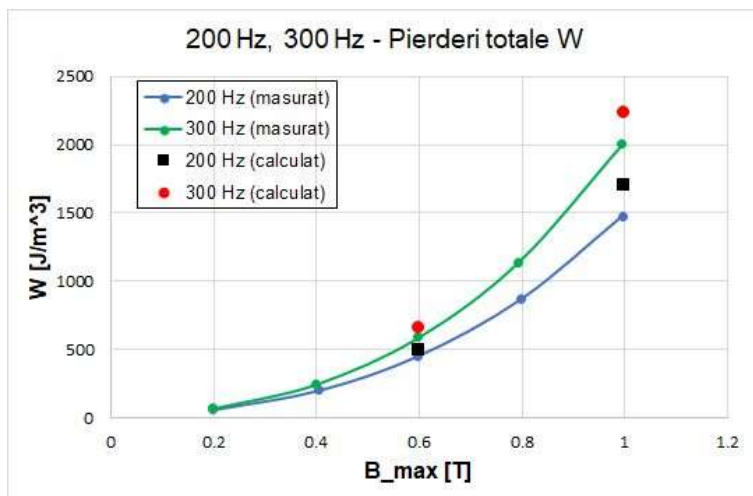


Fig. 4. Pierderi măsurate și estimate (calculate) la 200 Hz și 300 Hz pentru miezul laminat de FeSi-NO.

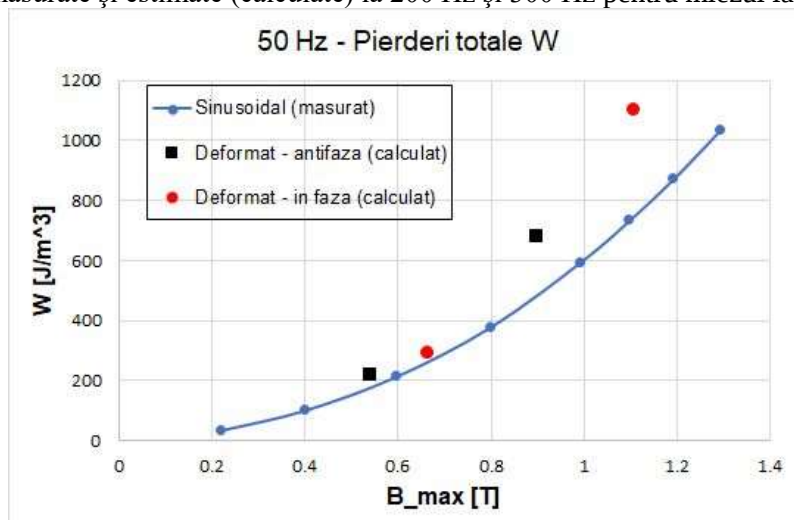


Fig. 5. Pierderi estimate pentru regim nesinusoidal în miezul laminat de FeSi-NO.

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.

Creșterea pierderilor în cazul apariției armonicilor este estimată suficient de precis pentru a fi folosită în proiectarea și dimensionarea echipamentelor electrice ce funcționează în regimuri reale de tip nesinusoidal. Caracterizarea acestor forme de undă doar prin THD este insuficientă pentru estimarea corectă a pierderilor suplimentare, deoarece defazajul între armonici schimbă forma semnalului periodic și influențează pierderile, așa cum se observă în figurile 3, 5.

D.II.2.4. Analiza eficienței și preciziei demonstratorului experimental în validarea conceptului de determinare a pierderilor în miezuri SMnC.

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 (cadru 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 redirectionarea 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.

În concluzie, 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.

D.II.3. DISEMINAREA REZULTATELOR PRIVIND UTILIZAREA SI VALORIFICAREA DEMONSTRATORULUI EXPERIMENTAL (RAPORT DE DISEMINARE)

(Raport de diseminare, CO+P1)

Raportul conține rezultatele activității A.II.4 din Planul de realizare.

În cadrul proiectului, membrii echipelor de cercetare au realizat **6 lucrări științifice, 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 **4 articole ISI**, două au fost publicate, unul este acceptat pentru a fi publicat în ultimul număr din 2018 și unul este în curs de recenzare.

Totodată, echipa proiectului a fost reprezentată la **1 conferință internațională de prestigiu** (18-th IEEE PES Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2018), Ljubljana (Slovenia), May 13-16, 2018), prezentând **1 lucrare** având precizat suportul (acknowledgment) prezentului contract de finanțare. Lucrarea este indexată IEEE, urmând a fi indexată și ISI, conform istoricului conferinței. Mai trebuie menționat că **alte 3 lucrări din 2017** (prezentate la MPS 2017 și OPTIM 2017) **au fost indexate ISI**. Lista lucrărilor științifice de diseminare a rezultatelor proiectului ELIDEF, cu acknowledgment, este prezentată în continuare, iar lucrările detaliate pot fi consultate în Anexă.

Reviste indexate ISI



Revue roumaine des sciences techniques, Série Électrotechnique et Énergétique, ISSN: 0035-4066

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



COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, ISSN: 0332-1649

2. 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 (acceptată la publicare)



Advances in Electrical and Electronic Engineering, ISSN 1336-1376 (Print), ISSN 1804-3119 (Online)

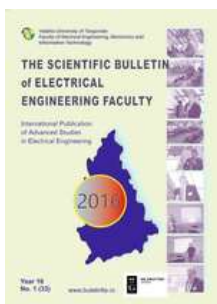
3. E. Cazacu, V. Ioniță, L. Petrescu - Thermal aging of power distribution transformers operating under nonlinear and balanced load conditions, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, ISSN 1336-1376 (Print), ISSN 1804-3119 (Online), vol. 16, no. 1, pp. 92-100, 2018, DOI: 10.15598/aece.v16i1.2701, WOS:000429160100009



Revista de Chimie, ISSN 0034-7752, factor de impact ISI-WOS 1.232

4. 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, în evaluare.

Reviste indexate BDI (Index-Copernicus)



Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty – SBEEF, p-ISSN 1843-6188, e-ISSN 2286-2455

5. 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, DOI : 10.1515/sbief-2017-0017

Conferințe indexate ISI



18-th IEEE PES Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2018), Ljubljana (Slovenia), May 13-16, 2018

(<http://www.ichqp2018.org/>)

6. 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, DOI: 10.1109/ICHQP.2018.8378843

A fost actualizată **pagina WEB** a proiectului (<http://elidef.elth.pub.ro>), având incluse raportul științifico-tehnic (RST) și lista lucrărilor de diseminare corespunzătoare etapei II (2018), așa cum se observă în fig. 1. Totodată, a fost adăugată și secțiunea dedicată raportului final al proiectului.

Descriere	Obiective	Parteneriat	Etape	Contact
Etapa	Obiective	Raport	Diseminare	
I / 2017	- Stabilirea cerințelor performanțelor impuse demonstratorului experimental - Proiectare experiențelor - Proiectare module de producere și măsurare a câmpului magnetic - Realizare module de producere și măsurare a câmpului magnetic - Proiectare miezuri magnetice moi nanocompozite (SMnC) - Realizare miezuri SMnC dedicate demonstratorului experimental	Raport I	Diseminare I	
II / 2018	- Testare funcționalitate demonstrator experimental - Efectuarea experimentelor pentru identificarea valorilor parametrilor energetici de material la diferite frecvențe - Validarea experimentală a pierderilor în SMnC, predeterminate numeric pentru domeniul extins de funcționare a miezului magnetic	Raport II	Diseminare II	
Raport final		Raport		

Fig. 1. Pagina WEB actualizată a proiectului.