

Simulacija histerezisnih petlji interpolacijom harmonijskih komponenti magnetskog polja

Srđan Divac, Branko Koprivica

Apstrakt—Cilj ovog rada je prikaz postupka simulacije histerezisnih petlji feromagnetskog uzorka koja je sprovedena simulacijom vremenskih oblika jačine magnetskog polja (u nastavku magnetskog polja) i magnetske indukcije. Podaci za magnetsko polje i indukciju su dobijeni merenjem, pri kontrolisanom obliku magnetske indukcije, za dva razmatrana oblika - sinusni i trougaoni. Na osnovu izmerenih podataka su određeni harmonici magnetskog polja za poznate amplitude magnetske indukcije. Nove vrednosti ovih harmonika se određuju interpolacijom prethodno izračunatih vrednosti, za amplitudu magnetske indukcije od interesa. Na osnovu ovih harmonika se vrši simulacija novog vremenskog oblika magnetskog polja. Nova histerezisna petlja se simulira korišćenjem ovog magnetskog polja i nove simulirane magnetske indukcije odgovarajućeg oblika. U radu je opisan navedeni postupak simulacije, dato je poređenje interpoliranih i izračunatih amplituda harmonika i vremenskih oblika magnetskog polja, kao i histerezisnih petlji. Takođe, u radu je data odgovarajuća analiza i diskusija rezultata.

Ključne reči — Magnetsko polje; Histerezisna petlja; Harmonijska analiza; Interpolacija; Simulacija.

I. UVOD

Modelovanje ili simulacija procesa magnećenja feromagnetskog uzorka zahteva veliki broj izmerenih podataka od značaja za dati proces [1-8], kako bi se odredili parametri modela (Preisach [1], Jiles-Atherton [2], Tellinen [3], Milovanović-Koprivica [4] i drugi) ili izvršilo treniranje neuronske mreže [6-7]. Proces magnećenja feromagnetskog materijala se može uspešno modelovati pomoću harmonijskih komponenti [9]. Određivanje parametara modela, treniranje neuronske mreže i drugi simulacioni postupci su neretko zahtevni u matematičkom i vremenskom pogledu. Dodatno, njihova tačnost i mogućnosti šire primene su ograničeni. Za prevazilaženje navedenih problema su potrebni alternativni postupci simulacije magnetskih veličina i histerezisa.

U ovom radu izložen je jedan alternativni postupak simulacije histerezisnih petlji baziran na interpolaciji amplituda i faza konačnog broja harmonika izmerenih magnetskih polja za magnetsku indukciju poznatog oblika i amplitude.

Podaci potrebni za proračun dobijeni su merenjem magnetskog polja i indukcije torusnog uzorka, napravljenog od orijentisanog feromagnetskog lima, primenom merne

Srđan Divac – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija, (e-mail: divacsrdjan@gmail.com) – Student doktorskih studija - Stipendista Ministarstva.

Branko Koprivica – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija, (e-mail: branko.koprivica@ftn.kg.ac.rs).

metode bazirane na personalnom računaru [10]. Pri merenjima su korišćena dva oblika magnetske indukcije - sinusni i trougaoni. U kontrolisanom merenju su postignute amplitude u opsegu od 0,2 T do 1,6 T sa korakom od 0,2 T, za oba razmatrana oblika. Merni podaci za verifikaciju rezultata proračuna dobijeni su pri istim oblicima magnetske indukcije za amplitude 0,5 T, 0,9 T i 1,5 T.

U radu su predstavljene izmerene histerezisne petlje za oba razmatrana oblika magnetske indukcije, kao i amplitude i faze harmonika odgovarajućih magnetskih polja. Takođe, prikazana su poređenja interpoliranih i izračunatih amplituda harmonika magnetskih polja, vremenskih oblika magnetskog polja i histerezisnih petlji za sve razmatrane slučajeve. Izvršena je analiza odstupanja amplituda harmonika i površina histerezisnih petlji i mogućnosti primene predloženog simulacionog postupka, uz odgovarajuću diskusiju.

II. SIMULACIONI POSTUPAK

Magnetsko polje $H(t)$ je fizička veličina koja se može predstaviti pomoću neparnih harmonijskih komponenti u obliku sume konačnog broja harmonika [11], i to:

$$H(t) = \sum_{i=1}^N (H_i \cos((2i-1)\omega t + \alpha_i)), \quad (1)$$

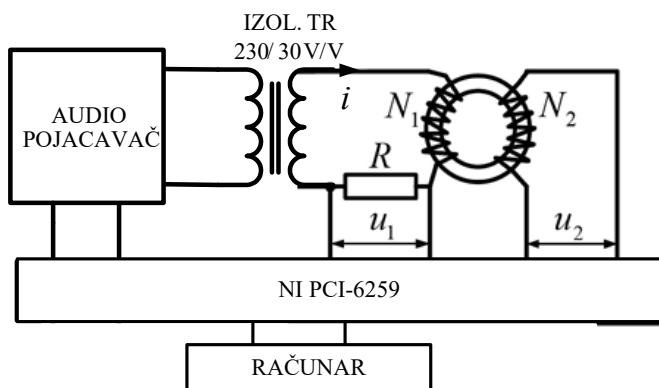
gde su H_i i α_i amplituda i faza i -tog harmonika, respektivno, i je red harmonika, N je najviši red, ω je kružna učestanost osnovnog harmonika i t je vreme.

Simulacija histerezisne petlje od značaja izvodi se kroz postupak sa sledećim koracima:

1. proračun N amplituda i faza neparnih harmonika izmerenih magnetskih polja za odgovarajući opseg amplituda magnetske indukcije,
2. interpolacija novih amplituda i faza harmonika polja za amplitude magnetske indukcije od interesa,
3. proračun vremenskog oblika magnetskog polja primenom (1) i simulacija vremenskog oblika magnetske indukcije i
4. simulacija histerezisnih petlji na osnovu rezultata iz prethodnog koraka.

III. MERNI METODA I APARATURA

Vremenski oblici magnetskog polja i indukcije dobijeni su primenom metode merenja bazirane na personalnom računaru i akviziciji podataka [10]. Merenja su sprovedena sa namotanim torusnim uzorkom od feromagnetskog lima oznake 27PH100, proizvođača POSCO. Blok šema merno-akvizicionog sistema je prikazana na Sl. 1.



Sl. 1. Blok šema merno-akvizicionog sistema za merenje magnetskih karakteristika.

Merno-akvizicioni sistem se sastoji od naponski kontrolisanog izvora naizmeničnog napona, šant otpornika od $R=0,5 \Omega$, torusnog uzorka, akvizicione kartice i računara.

Naponski kontrolisan izvor čini audio pojačavač CROWN XLi 2500 i izolacioni transformator 230/30 V/V, zajedno sa analognim izlazom akvizicione kartice NI PCI-6259. Ova kartica se koristi i za merenje napona u_1 na šant otporniku i indukovano napona u_2 na krajevima indukcionog namotaja torusnog uzorka. Za potrebe merenja napravljena je aplikacija u programskom paketu LabVIEW koja vrši obradu i čuvanje izmerenih podataka. Takođe, ova aplikacija se koristi za kontrolu vremenskog oblika magnetske indukcije, određene na osnovu izraza (3) - integrala po vremenu izmerenog napona u_2 , prema zadatom vremenskom obliku indukcije. Kontrola amplitude i oblika magnetske indukcije je sprovedena uspostavljanjem digitalne (programske) povratne sprege [12]. Kroz iterativni postupak kontrole se menja napon izvora sve dok se ne ostvari zadati vremenski oblik indukcije.

Merenje napona u_1 i u_2 je realizovano sa 1000 mernih podataka po periodu signala. Sve ostale veličine koje se računaju na osnovu ovih napona takođe sadrže ovaj broj podataka.

Struja $i(t)$ kroz pobudni namotaj meri se indirektno, kao količnik izmerenog napona šant otpornika u_1 i njegove otpornosti R . Ova struja se koristi za proračun trenutne vrednosti magnetskog polja prema Amperovom zakonu [13]:

$$H(t) = \frac{N_1 i(t)}{l} \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right], \quad (2)$$

gde je N_1 broj navojaka pobudnog namotaja, a l dužina srednje linije jezgra.

Napon u_2 koji se indukuje na indukcionom namotaju torusnog uzorka proporcionalan je brzini promene ukupnog fluksa u jezgru, a magnetska indukcija se može proračunati pomoću izraza:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A} \int_0^t u_2(\tau) d\tau \quad [\text{T}], \quad (3)$$

gde je N_2 broj navojaka indukcionog namotaja i A je površina poprečnog preseka jezgra.

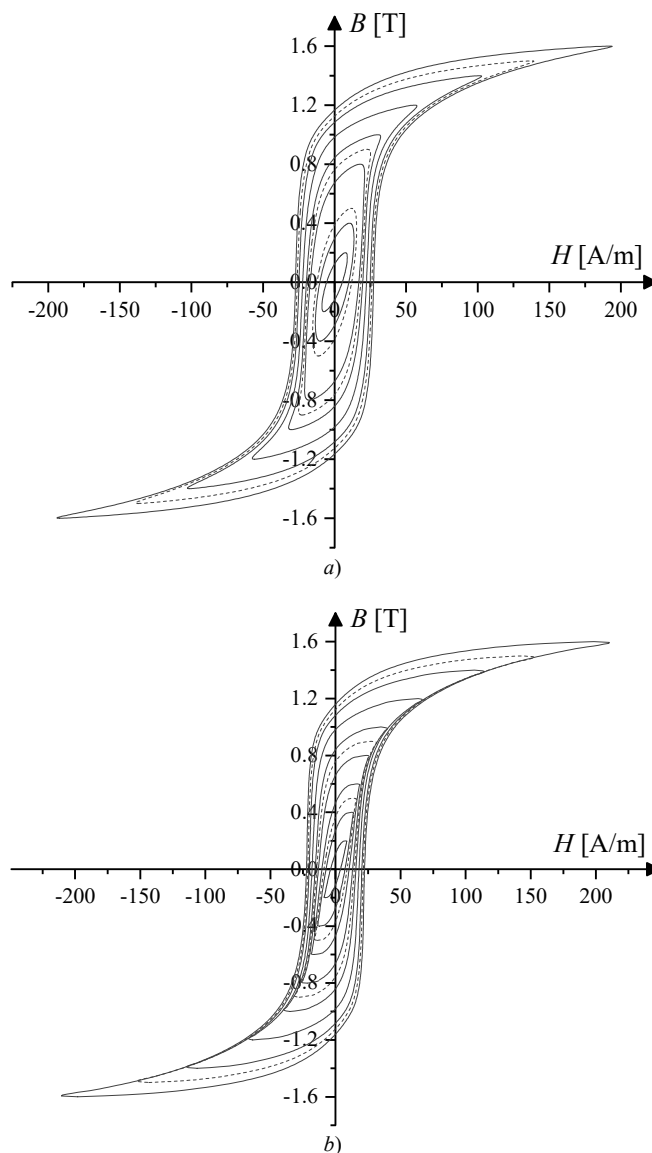
Podaci o broju pobudnih i indukcionih navojaka, dužini srednje linije i površini poprečnog preseka jezgra su dati u Tabeli I.

TABELA I
PODACI O TORUSNOM UZORKU

Veličina	Vrednost
N_1	175
N_2	60
l [m]	0,306
A [mm ²]	102,80

IV. REZULTATI MERENJA

Rezultati merenja su prikazani u obliku histerezisnih petlji. Na Sl. 2 su prikazane histerezisne petlje dobijene merenjima pri kontrolisanoj magnetskoj indukciji sinusnog i trougaonog oblika, respektivno. Merenja su izvršena pri frekvenciji od 50 Hz za opseg magnetskih indukcija amplituda od 0,2 T do 1,6 T sa korakom od 0,2 T. Takođe, isprekidanom linijom su prikazane i histerezisne petlje za verifikaciju simulacije za amplitude magnetske indukcije od 0,5 T, 0,9 T i 1,5 T.

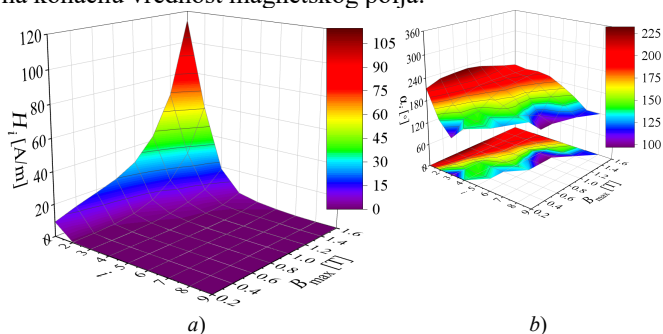


Sl. 2. Izmerene histerezisne petlje pri a) sinusnom i b) trougaonom obliku magnetske indukcije.

V. REZULTATI PRORAČUNA I ANALIZA

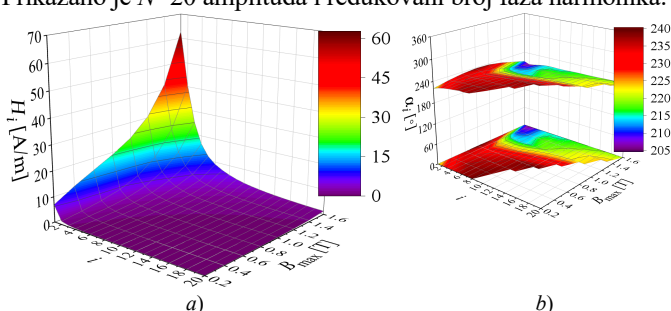
Na Sl. 3 i 4 su prikazani rezultati proračuna harmonijskih komponenti magnetskog polja dobijenih merenjima.

Na Sl. 3 je prikazana promena amplituda i faza harmonika magnetskog polja za magnetsku indukciju oblika sinusoide. Od prikazanih $N=9$ amplituda, koliko je od značaja za veće amplitude magnetske indukcije, samo 3 do 5 amplituda ima vrednost veću od 1 % od osnovnog harmonika. Shodno tome, radi preglednijeg prikaza, sa Sl. 3b su ukonjene faze viših harmonika, koje značajno osciluju, a koje nemaju veći uticaj na konačnu vrednost magnetskog polja.



Sl. 3. Promena a) amplituda i b) faza harmonika magnetskog polja pri sinusnom obliku magnetske indukcije.

Na Sl. 4 je prikazana promena amplituda i faza harmonika magnetskog polja za magnetsku indukciju trougaonog oblika. Prikazano je $N=20$ amplituda i redukovani broj faza harmonika.



Sl. 4. Promena a) amplituda i b) faza harmonika magnetskog polja pri trougaonom obliku magnetske indukcije.

Proračun harmonijskih komponenti magnetskog polja metodom interpolacije izvršen je za amplitude magnetske indukcije od 0,5 T, 0,9 T i 1,5 T. Usvojena vrednost najvišeg reda neparanih harmonika je $N=15$, za magnetsku indukciju sinusnog, i $N=75$, za magnetsku indukciju trougaonog oblika. Vrednosti za N usvojene su prema kriterijumu najmanjih oscilacija u vremenskom obliku magnetskog polja izračunatog primenom (1). Povećanje vrednosti N iznad usvojenih ne doprinosi značajnijem poboljšanju rezultata, a zadovoljavajući rezultati (sa minimalnim oscilacijama) se postižu i sa dva puta manjim brojem harmonika. Proračun harmonika je izvršen u programskom paketu *Mathematica* primenom funkcije *Fourier*, a interpolacija primenom funkcije *Interpolation*, čijom primenom se ceo postupak sprovodi bez dodatnog programiranja složenih matematičkih proračuna. Vremenski oblik magnetske indukcije je simuliran u istom programu kao idealna sinusna ili trougaona funkcija. Svaki signal je predstavljen nizom vrednosti sa ukupno 1000 članova niza. Deo korišćenog programskog koda koji pokazuje kako su

određeni harmonici polja i kako je izvršena njihova interpolacija je dat u Dodatku.

U Tabelama II i III date su vrednosti prvih $N=5$ amplituda harmonika magnetskog polja dobijenih interpolacijom $H_{i,i}$ i njihova odstupanja $\Delta H_{i-0,5}$, $\Delta H_{i-0,9}$ i $\Delta H_{i-1,5}$ od izračunatih amplituda harmonika izmerenih magnetskih polja H_i , gde je $\Delta H_i = H_{i,i} - H_i$. Amplitude i odstupanja su dati za oba razmatrana oblika magnetske indukcije. Na osnovu rezultata prikazanih u Tabelama II i III je zaključeno da opisani postupak interpolacije harmonika ima zadovoljavajuću tačnost. Shodno tome, moguće je izvršiti simulaciju magnetskog polja korišćenjem izraza (1).

TABELA II
AMPLITUDE HARMONIKA MAGNETSKOG POLJA DOBIJENE INTERPOLACIJOM I NJIHOVA ODSUPANJA OD AMPLITUDA DOBIJENIH IZRAČUNAVANJEM PRI MAGNETSKOJ INDUKCIJI SINUSNOG OBLIKA

i	$H_{i,i-0,5}$ [A/m]	$H_{i,i-0,9}$ [A/m]	$H_{i,i-1,5}$ [A/m]	$\Delta H_{i-0,5}$ [A/m]	$\Delta H_{i-0,9}$ [A/m]	$\Delta H_{i-1,5}$ [A/m]
1	16,08	25,42	86,78	0,00	-0,07	0,09
2	0,86	4,93	41,51	0,00	-0,05	-0,03
3	0,16	1,29	12,23	0,02	-0,02	-0,07
4	0,03	0,27	2,84	0,01	0,02	-0,08
5	0,02	0,10	1,38	0,01	0,02	-0,03

TABELA III
AMPLITUDE HARMONIKA MAGNETSKOG POLJA DOBIJENE INTERPOLACIJOM I NJIHOVA ODSUPANJA OD AMPLITUDA DOBIJENIH IZRAČUNAVANJEM PRI MAGNETSKOJ INDUKCIJI TROUGAONOG OBLIKA

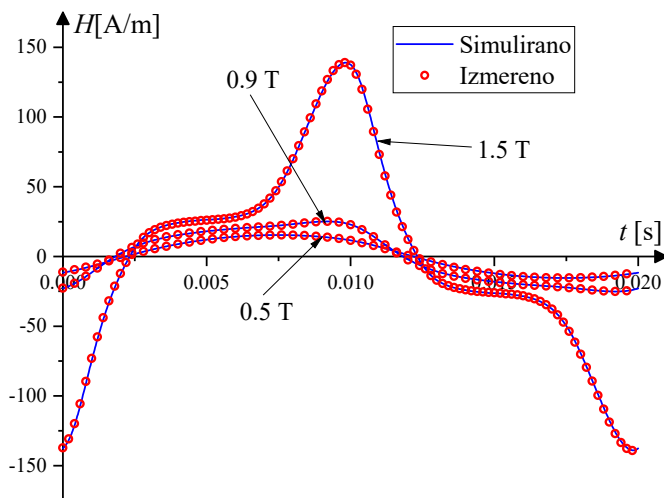
i	$H_{i,i-0,5}$ [A/m]	$H_{i,i-0,9}$ [A/m]	$H_{i,i-1,5}$ [A/m]	$\Delta H_{i-0,5}$ [A/m]	$\Delta H_{i-0,9}$ [A/m]	$\Delta H_{i-1,5}$ [A/m]
1	13,36	21,18	50,94	0,13	-0,04	0,01
2	2,95	6,83	30,65	0,02	-0,05	-0,03
3	1,45	3,71	18,95	0,01	-0,04	-0,04
4	0,93	2,37	12,17	0,01	-0,02	-0,04
5	0,67	1,67	8,40	0,01	-0,01	-0,07

Na Sl. 5 i 6 prikazana su poređenja vremenskih oblika simuliranih i izmerenih magnetskih polja za razmatrane amplitude magnetske indukcije sinusnog i trougaonog oblika, respektivno. Mogu se uočiti dobra slaganja simuliranih i izmerenih magnetskih polja za oba razmatrana slučaja. Blaga odstupanja se uočavaju u trenucima kada magnetsko polje menja znak.

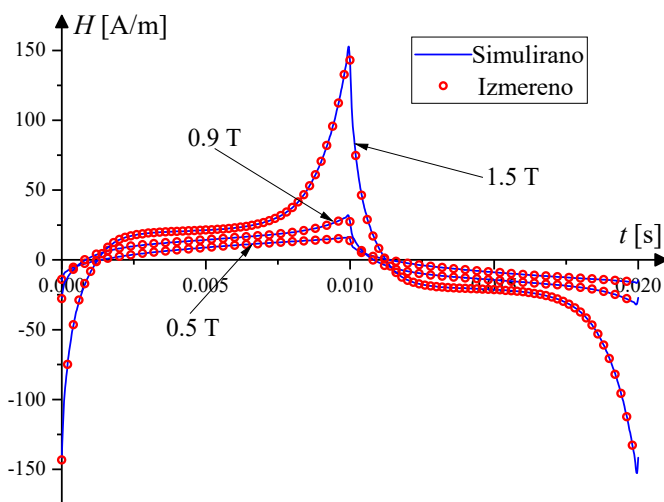
Kako je za merenje i proračun magnetskog polja korišćeno ukupno 1000 podataka, a slaganje izmerenih i simuliranih signala je veoma dobro, radi bolje preglednosti rezultata je simulirano polje prikazano punom linijom, a izmereno polje je prikazano tačkama, uz redukovani broj tačaka (jer 1000 tačaka takođe nije pregledno). Smanjenje broja tačaka je izvršeno bez brisanja podataka pomoću ugrađene opcije Skip Points u programu OriginLab. Na ovaj način je postignut željeni vizuelni efekat, bez uticaja na tačnost rezultata. Broj tačaka je odabran u skladu sa amplitudom polja.

Na Sl. 7 i 8 prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih histerezisnih petlji (zbog preglednosti rezultata, prikazan je manji broj tačaka za izmerene petlje). Uočava se dobro slaganje svih prikazanih petlji. Minimalna odstupanja

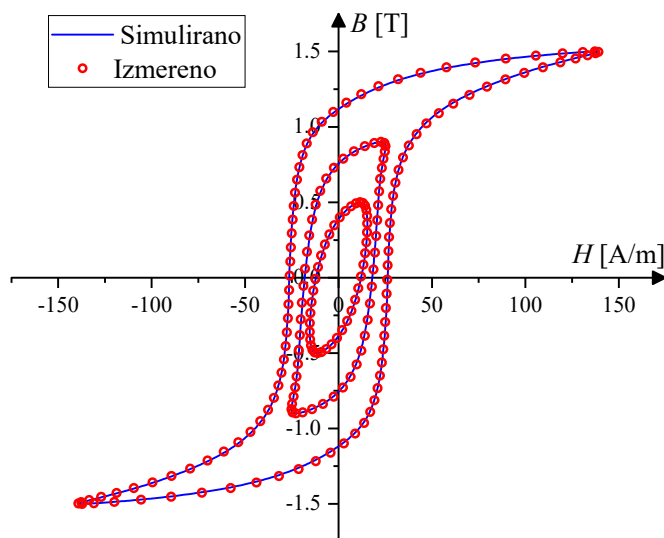
simuliranih petlji mogu se pripisati kako odstupanjima kod magnetskih polja tako i odstupanjima izmerenih i simuliranih (idealnih) oblika magnetske indukcije.



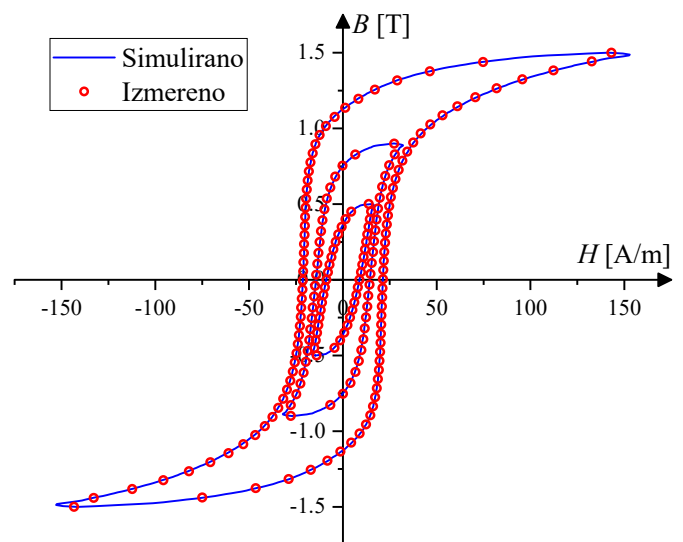
Sl. 5. Poređenje simuliranih i izmerenih trenutnih vrednosti magnetskog polja pri sinusnom obliku magnetske indukcije.



Sl. 6. Poređenje simuliranih i izmerenih trenutnih vrednosti magnetskog polja pri trougaonom obliku magnetske indukcije.



Sl. 7. Poređenje simuliranih i izmerenih histerezisnih petlji pri sinusnom obliku magnetske indukcije.



Sl. 8. Poređenje simuliranih i izmerenih histerezisnih petlji pri trougaonom obliku magnetske indukcije.

Dodatno, radi provere tačnosti kompletnog simulacionog postupka izvršeno je izračunavanje površina histerezisnih petlji i njihova analiza. U Tabeli IV je prikazano poređenje relativnih odstupanja površina histerezisnih petlji dobijenih simulacijom S_{sim} i merenjem S_{izm} za sinusni, δS_s , i trougaoni, δS_t , oblik indukcije, gde je $\delta S [\%] = 100(S_{sim} - S_{izm}) / S_{izm}$.

TABELA IV
POREĐENJE RELATIVNIH ODSTUPANJA POVRŠINA HISTEREZISNIH PETLJI

B_{max} [T]	δS_s [%]	δS_t [%]
0,5	-0,24	0,06
0,9	-1,50	-0,71
1,5	-1,21	0,69

Relativna odstupanja površina petlji su mala – reda veličine procenta i za sinusni i za trougaoni oblik magnetske indukcije.

Može se zaključiti da je tačnost predloženog postupka simulacije histerezisnih petlji zadovoljavajuća u svim razmatranim aspektima, pa se može očekivati i zadovoljavajuća tačnost u primeni istog u složenijim proračunima sa magnetskim kolima. Primenom prikazane harmonijske analize i postupka simulacije pri različitim frekvencijama pobudnog polja može se dobiti kompletnija slika o karakteristikama magnetskog materijala ili jezgra. Dodatno, ovaj postupak omogućava rešavanje i analizu magnetskih problema u vremenskom domenu.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan postupak simulacije histerezisnih petlji za određene amplitude i oblike magnetske indukcije. Postupak se zasniva na interpolaciji amplituda i faza harmonika, a zatim i simulaciji magnetskog polja i magnetske indukcije od interesa.

U radu je ukratko opisana metoda merenja magnetskih karakteristika i predstavljene su izmerene histerezisne petlje za sinusni i trougaoni oblik magnetske indukcije sa amplitudama od 0,2 T do 1,6 T sa korakom od 0,2 T. Rezultati harmonijske analize odgovarajućih magnetskih polja

su takođe prikazani i analizirani. Na osnovu tako dobijenih harmonika je izvršena simulacija novih magnetskih polja i histerezisnih petlji. Rezultati simulacije su analizirani kroz poređenje interpoliranih i izračunatih amplituda harmonika, trenutnih vrednosti magnetskog polja, oblika histerezisnih

petlji i njihovih površina. Utvrđeno je vrlo dobro slaganje svih simuliranih i izmerenih rezultata.

Na osnovu prikazane analize rezultata je zaključeno da se opisani postupak može primeniti za kvalitetniju karakterizaciju feromagnetskih materijala i za rešavanje problema sa magnetskim kolima u vremenskom domenu.

DODATAK

Deo programskog koda za učitavanje merenih podataka, simulaciju magnetske indukcije, proračun harmonika magnetskog polja i njihovu interpolaciju je prikazan na Sl. 9. Prikazan je najvažniji deo koda u kojem se vidi način primene funkcija *Fourier* i *Interpolation*. Ostatak koda za proračun veličina od interesa i njihov numerički ili grafički prikaz je izostavljen jer prevazilazi obim rada, pri čemu su ti rezultati već prikazani u samom radu.

Unos podataka - Sinus

```
Podaci = Import["F:\\Desktop\\RADOVI\\RADOVI ETRAN 2021\\Divac\\50Hz-Sin-Loops.txt", "Table"];
PodaciProvere = Import["F:\\Desktop\\RADOVI\\RADOVI ETRAN 2021\\Divac\\50Hz-1_5T-Sin.txt", "Table"];

Bzeljeno = 1.5;
Nh = 5; (*Broj neparnih harmonika*)
```

Simulacija B

```
Bvr = Table[Bzeljeno*Sin[2*50*Pi*t+3*Pi/2], {t, 0, (0.02 - 0.02/1000), (0.02/1000)}];
```

Interpolacija - Pojedinačni Harmonici

```
PodaciPolja = Table[Podaci[[All, i]], {i, 2, Length[Podaci[[1, All]]], 2};
PodaciIndukcije = Table[Podaci[[All, i]], {i, 3, Length[Podaci[[1, All]]], 2};
PodaciPolja = Transpose[PodaciPolja];
PodaciIndukcije = Transpose[PodaciIndukcije];

AmplitudeHarmonika = Table[0, {i, Nh}, {j, Length[PodaciPolja[[1, All]]]};
FazeHarmonika = Table[0, {i, Nh}, {j, Length[PodaciPolja[[1, All]]]};

For[j = 1, j <= Length[PodaciPolja[[1, All]]], j++, Hvr = Table[{Podaci[[i, 1]], PodaciPolja[[i, j]]}, {i, 1000}];
ft = Fourier[Hvr[[All, 2]], FourierParameters -> {-1, -1}];
pom1 = 2 * Abs[ft];
pom2 = Arg[ft] * 180 / Pi;
FazPolja = Table[pom2[[i]], {i, 2, Nh*2, 2};
APolja = Table[pom1[[i]], {i, 2, Nh*2, 2};
For[i = 1, i < Nh, i++, If[FazPolja[[i]] < 0, FazPolja[[i]] = FazPolja[[i]] + 360, FazPolja[[i]] = FazPolja[[i]]];
For[i = 1, i <= Nh, i++, AmplitudeHarmonika[[i, j]] = APolja[[i]];
  FazeHarmonika[[i, j]] = FazPolja[[i]]];

AmplitudeHarmonika = Transpose[AmplitudeHarmonika];
FazeHarmonika = Transpose[FazeHarmonika];

Bmax = Table[Max[PodaciIndukcije[[All, i]]], {i, Length[PodaciIndukcije[[1, All]]]};

Ampl = Table[0, {i, Nh}];
Faz = Table[0, {i, Nh}];

For[k = 1, k <= Nh, k++, PodaciInterpolacijeAmplituda = Table[{Bmax[[i]], AmplitudeHarmonika[[i, k]]}, {i, 1, Length[Bmax]}];
PodaciInterpolacijeFaza = Table[{Bmax[[i]], FazeHarmonika[[i, k]]}, {i, 1, Length[Bmax]}];
FunkcijaA = Interpolation[PodaciInterpolacijeAmplituda, InterpolationOrder -> 6];
FunkcijaF = Interpolation[PodaciInterpolacijeFaza, InterpolationOrder -> 1];
Ampl[[k]] = FunkcijaA[Bzeljeno];
Faz[[k]] = FunkcijaF[Bzeljeno];
(*-----*)
```

Sl. 9. Deo programskog koda za simulaciju magnetskog polja i indukcije.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja RS, Ugovor br. 451-03-9/2021-14/200132, čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA

- [1] C. Grech, M. Buzio, M. Pentella, M. Sammut, "Dynamic Ferromagnetic Hysteresis Modelling Using a Preisach-Recurrent Neural Network Model", *Materials*, vol. 13, no. 11, Spec. issue: *Model. and Char. of Magn. Mat.*, June 2020.

- [2] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, R. G. Harrison, K. Chwastek, "On physical aspects of the Jiles-Atherton hysteresis models", *J. of Appl. Phys.*, vol. 112, no. 8, Aug. 2012.
- [3] Y. Li, R. Chen, Z. Cheng, C. Zhang, L. Liu, "Dynamic Hysteresis Lops Modeling of Electrical Steel with Harmonic Components", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 56, no. 5, pp. 4804-4811, Sept.-Oct. 2020.
- [4] A. Milovanović, B. Koprivica, "Mathematical Model of Major Hysteresis Loop and Transient Magnetizations", *Electromagnetics*, vol. 35, no. 3, pp. 155-166, March 2015.
- [5] Y. Hane, K. Nakamura, "Dynamic Hysteresis Modeling for Magnetic Circuit Analysis by Incorporating Play Model and Cauer's Equivalent Circuit Theory", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 56, no. 8, Aug. 2020.
- [6] Q. Antonio, R. Fulginei, H. P. Rimal, A. M. Ghanim, "On the Use of Feedforward Neural Networks to Simulate Magnetic Hysteresis in Electrical Steels", *20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, Italy, 16th-18th June 2020.
- [7] S. Q. Antonio, F. R. Fulginei, K. Nakamura, A. Laudani, A. Faba, E. Cardelli, "An Effective Neural Network Approach to Reproduce Magnetic Hysteresis in Electrical Steel under Arbitrary Excitation Waveforms", *J. of Magn. and Magn. Mat.*, vol. 528, June 2021.
- [8] G. Bramerdorfer, D. Andessner, "Accurate and Easy to Obtain Iron Loss Model for Electric Machine Designs", *IEEE Trans. on Indu. Electr.*, vol. 64, no. 3, pp. 2530-2537, March 2017.
- [9] B. Koprivica, I. Dumitru, A. Milovanović and O. Caltun, "Harmonic Analysis and Modelling of Magnetisation Process in Soft Ferromagnetic Material", *FACTA Universitatis, Electronics and Energetics*, vol. 30, no. 1, pp. 121 – 136, March 2017.
- [10] B. Koprivica, A. Milovanović and M. Đekić, "Effects of Wound Toroidal Core Dimensional and Geometrical Parameters on Measured Magnetic Properties of Electrical Steel", *Serb. J. of Electr. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 459-471, Oct. 2013.
- [11] W. Cheng and Y. Saito, "Modeling and Analysis of Hysteresis by Harmonic Balance Method", *J. of Appl. Phys.*, vol. 117, no. 17, May 2015.
- [12] S. Zurek, P. Marketos, T. Meydan, and A.J. Moses, "Use of Novel Adaptive Digital Feedback for Magnetic Measurements Under Controlled Magnetizing Conditions", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 41, no. 11, pp. 4242-4249, Nov. 2005.
- [13] J. V. Surutka, "Elekromagnetika", *osmo izdanje*, Akademska misao, Beograd, 2006.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present a procedure for simulation of hysteresis loops of a ferromagnetic sample which is performed by simulation of waveforms of the magnetic field strength (further magnetic field) and flux density. The data for magnetic field and flux density are obtained by measurement, under controlled shape of magnetic flux density, for two considered shapes - sinusoidal and triangular. The harmonics of the magnetic field for the known amplitudes of the magnetic flux density were determined according to these data. New values of these harmonics are calculated by interpolating ones previously calculated, for the amplitude of magnetic flux density of interest. Simulation of the new magnetic field waveform is performed using these harmonics. The new hysteresis loop is simulated using this magnetic field and new simulated magnetic flux density. Description of this simulation procedure, comparison of calculated and measured amplitudes of harmonics and magnetic field waveforms, as well as hysteresis loops, is given in this paper. Appropriate analysis and discussion of the results is also given.

Simulation of hysteresis loops by interpolation of harmonic components of magnetic field

Srđan Divac, Branko Koprivica