

Određivanje normalnih krivih magnećenja feromagnetskih materijala male permeabilnosti

Dejana Herceg, Karolina Kasaš-Lažetić, Danka Antić
Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, R. Srbija
vuletic@uns.ac.rs, kkasas@uns.ac.rs, danka.antic@uns.ac.rs

Nenad Petrović, Marko Krstajić
Energobull doo
Novi Sad, R. Srbija
npsmajli@gmail.com

Miroslav Prša, penzionisan sa
Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, R. Srbija
prsa@uns.ac.rs

Sažetak—Ispitivana je primena mernih metoda za određivanje magnetskih karakteristika feromagnetskih materijala male permeabilnosti, na frekvenciji 50Hz, koje koriste strujni ili naponski transformator. Prikazan je postupak numeričke obrade eksperimentalnih podataka za određivanje normalne krive magnećenja. Izvršena su merenja na dva uzorka, upoređeni rezultati i na osnovu njih su izvedeni zaključci o prednostima i nedostacima navedenih metoda. Na osnovu naših ranijih ispitivanja magnetskih karakteristika feromagnetskih materijala velike permeabilnosti, koristeći iste metode, uočene su razlike u performansama metoda, koje su komentarisane.

Ključne reči: feromagnetski materijali; male permeabilnosti; normalne krive magnećenja;

I. UVOD

Osim materijala velikih vrednosti permeabilnosti, u elektrotehničkoj teoriji i praksi se često sreću i materijali malih permeabilnosti. Kako su takvi materijali često sastavni delovi električnih uređaja, važno je poznavanje njihovih magnetskih karakteristika. Postoji više načina određivanja magnetskih parametara materijala [1]-[6], od kojih su neki već korišćeni i prikazani, kako za materijale velikih vrednosti permeabilnosti (najčešće trafo i dinamo limovi, kao i neki magnetski tvrdi materijali), tako i za materijale manjih vrednosti permeabilnosti, kao što su čelici u Alučel provodnicima, pocinkovani lim i razne gvozdene i čelične cevi. U ovom radu ispitivane su dve vrste čelika (feromagnetski materijali male permeabilnosti) koji se najčešće koriste kao građevinski materijali, ali mogu naći primenu u izradi električnih i mehaničkih uređaja, poput magnetoreološke kočnice. Zbog toga postoji potreba poznavanja magnetskih karakteristika takvih materijala.

U dosadašnjim radovima, međutim, nije izvršena analiza koja od korišćenih metoda je najpovoljnija za pojedine slučajeve i tom problemu je posvećen ovaj rad. Pri tome su izučavane metode merenja, bilo prvobitne krive magnećenja, bilo familije histerezisnih petlji, iz kojih su se kasnije određivale normalne krive magnećenja; dinamička i statička.

Iako smo se bavili određivanjem svih navedenih oblika krive magnećenja [7]-[9], u ovom radu su prikazane i upoređene dve metode za određivanje normalne krive magnećenja, na frekvenciji 50Hz, za materijale malih permeabilnosti. Kod obe metode je korišćen prstenasti uzorak ispitivanog feromagnetskog materijala na kome je bio namotan odgovarajući broj zavojaka bakarne žice. U slučajevima kada je merenje bilo zasnovano na primeni naponskog transformatora, na feromagnetsko jezgro su bila namotana dva namotaja, dok je prilikom primene strujnog transformatora na jezgru bio samo jedan namotaj.

Metodi za merenje normalnih krivih magnećenja su se razlikovali i po načinu vremenske integracije napona na krajevima namotaja, pri čemu je taj integral proporcionalan intenzitetu vektora magnetske indukcije u jezgru uzorka. U jednom slučaju je vremenska integracija bila elektronska, pomoću posebno konstruisanog elektronskog integratora, a u drugom slučaju je direktno registrovan napon na krajevima namotaja, pa je zatim izvršena numerička integracija po vremenu.

Pokazalo se da je, za merenje magnetskih parametara materijala velikih permeabilnosti, podjednako korisiti strujni transformator, na koji treba da se namota samo jedan namotaj, sa relativno malim brojem zavojaka. Pri tome je irelevantno da li se koristi elektronski integrator, ili se, nakon merenja, primenjuje numerička integracija. Prednost korišćenja elektronskog integratora je u tome što se histerezisne krive vide direktno na korišćenom osciloskopu, dok kod numeričke integracije to nije slučaj. Ovaj zaključak je izveden na osnovu činjenice da, kod takvih materijala, zasićenje jezgra prouzrokuju već relativno male jačine struja u provodniku strujnog transformatora, ili u primaru naponskog transformatora.

S druge strane, za merenja magnetskih osobina feromagnetskih materijala male permeabilnosti su potrebne značajno veće jačine struja u provodniku strujnog transformatora, kao što je prikazano u ovom radu. Pošto magnetsko polje u jezgru uzorka stvara proizvod broja zavojaka i jačine struje u njima, u ovom slučaju

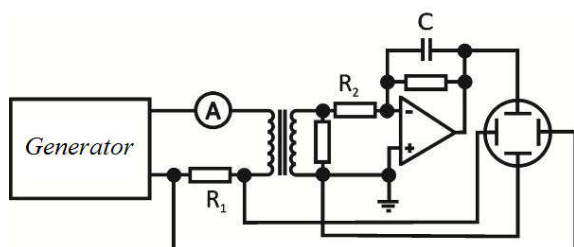
je naponski transformator predstavljao bar jednako dobro rešenje, posebno u slučajevima kada su se merenja izvodila na različitim frekvencijama.

U oba slučaja određivanja normalnih krivih magnećenja je bila neophodna dodatna numerička obrada izmerenih vrednosti.

II. TEORIJSKE OSNOVE: MERNI SKLOP I NUMERIČKA OBRADA PODATAKA

A. Merni sklop sa naponskim mernim transformatorom i elektronskom integracijom

Za određivanje normalne krive magnećenja ispitivanog materijala potrebno je napraviti tanko torusno jezgro i namotavanjem primarnog i sekundarnog namotaja formirati naponski torusni transformator. Da bi mogla da se odredi normalna kriva magnećenja u celom domenu BH dijagrama do zasićenja, amperzavojski primara moraju da budu dovoljni da materijal jezgra dovedu u zasićenje. Način određivanja potrebnih amperzavojaka je detaljno objašnjen u [8]. Šema uređaja za merenje histerezisnih krivih je prikazana na Sl. 1.



Slika 1. Merni sklop sa naponskim transformatorom.

Prema šemi prikazanoj na Sl. 1, meri se napon na otporniku R_1 koji je proporcionalan jačini struje primarnog namotaja, a magnetsko polje u torusnom jezgru zavisi od te jačine struje. Mereni napon, u_{R1} , je srazmeran intenzitetu vektora jačine magnetskog polja u torusu,

$$u_{R1} = \frac{R_1 l}{N_1} H = k_H H, \quad (1)$$

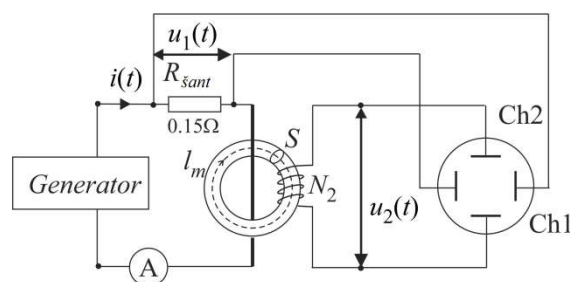
gde je l dužina srednje linije jezgra, a N_1 broj zavojaka primara. Napon na izlazu elektronskog integratora je,

$$u_2 = \frac{N_2 S_{pp}}{R_2 C} B = k_B B, \quad (2)$$

gde je S_{pp} površina poprečnog preseka torusa, a B intenzitet vektora magnetske indukcije u jezgru. Kopletan opis postupka merenja mernim sklopom sa naponskim transformatorom i elektronskim integratorom, kao i numerička obrada rezultata merenja, dat je u [7], [8] i [9].

B. Merni sklop sa strujnim transformatorom

Merni sklop se sastoji od strujnog transformatora sa jezgrom od ispitivanog materijala. Na torusnom jezgru nalazi se namotaj sa nekoliko zavojaka. Provodnik sa strujom prolazi kroz jezgro i priključen je, na red sa šant otpornikom, na strujni generator, kao što je prikazano na Sl. 2.



Slika 2. Merni sklop sa strujnim transformatorom.

Trenutne vrednosti napona na šant otporniku, $u_1(t)$, i na krajevima namotaja, $u_2(t)$, izmerene su i snimljene pomoću digitalnog osciloskopa. Za prikazivanje krivih magnećenja (BH krivih) su neophodne vrednosti intenziteta vektora jačine magnetskog polja i intenziteta vektora magnetske indukcije u torusu, koje se dobijaju numeričkom obradom izmerenih napona $u_1(t)$ i $u_2(t)$.

Struja primara stvara magnetsko polje u torusnom jezgru. Napon na šant otporniku je proporcionalan jačini struje u provodniku, a intenzitet vektora jačine magnetskog polja je,

$$H(t) = \frac{i(t)}{l_m} = \frac{u_1(t)}{R_s l_m} = k_H u_1(t), \quad (3)$$

gde je $i(t)$ jačina struje u provodniku, l_m dužina srednje linije torusa, $u_1(t)$ je napon na šant otporniku, R_s je otpornost šanta, a k_H je konstanta proporcionalnosti koja iznosi, $k_H = 1/R_s l_m$.

Druga veličina neophodna za određivanje BH krive je intenzitet vektora magnetske indukcije. Elektromotorna sila na krajevima namotaja je proporcionalna izvodu magnetskog fluksa u jezgru uzorka po vremenu. Kod metode sa vremenskim elektronskim integratorom, izmereni napon je direktno proporcionalan intenzitetu vektora magnetske indukcije, a kod merne metode bez elektronske integracije se meri napon na sekundaru naknadno numerički integrali po vremenu. Trenutna vrednost intenziteta vektora magnetske indukcije se određuje integracijom napona na krajevima namotaja, $u_2(t)$,

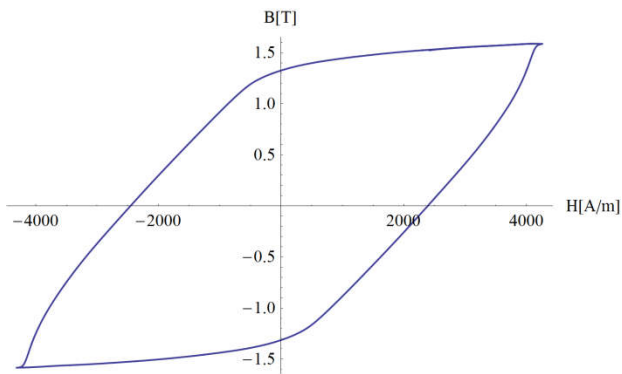
$$B(t) = -\frac{1}{N_2 \cdot S} \int_0^t u_2(t) dt = -k_B \int_0^t u_2(t) dt, \quad (4)$$

gde je N_2 broj zavojak namotaja, S poprečni presek jezgra, a k_B konstanta proporcionalnosti koja iznosi $k_B = 1/N_2 S$. Numerička integracija se vrši primenom trapeznog pravila.

C. Određivanje normalne krive magnećenja

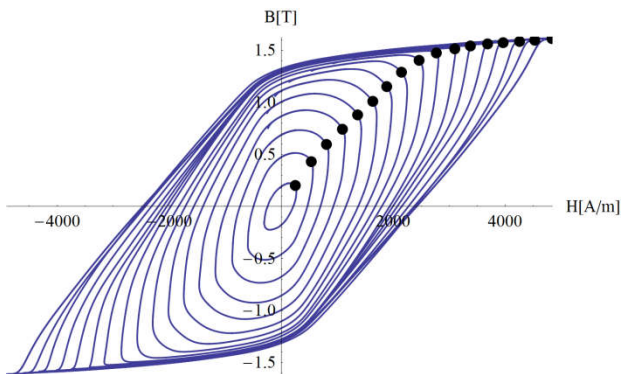
Zbog rezolucije uzorkovanja osciloskopa, nepoznatih i neželjenih, ali prisutnih stranih elektromagnetskih polja, kao i zbog drugih spoljašnjih uticaja na merene vrednosti, oba merena napona sadrže neželjena izobličenja. Da bi se smanjio uticaj tih izobličenja, na merene podatke je primenjen Gausov filter.

Nakon numeričke obrade izmerenih podataka, dobijaju se vrednosti $H(t)$ i $B(t)$, odnosno histerezisne krive. Kao primer, na Sl. 3 je prikazana histerezisna petlja za uzorak Č-1221, pri efektivnoj vrednosti jačine struje u provodniku od 150A.



Slika 3. Primer histerezisne krive u toku jednog ciklusa.

Na Sl. 4 je prikazana familija histerezisnih petlji dobijenih numeričkom obradom izmerenih podataka, za niz vrednosti intenziteta struje $i(t)$, iste frekvencije. Prikazan je slučaj sa uzorkom Č-1221, na frekvenciji 50Hz, za niz različitih intenziteta struje, maksimalne efektivne vrednosti do 170A. Daljom obradom histerezisnih petlji, izdvojeni su njihovi vrhovi, obeleženi tačkicama na Sl. 4. Povezivanjem tih vrhova se dobija normalna kriva magnećenja ispitivanog uzorka.



Slika 4. Familija histerezisnih petlji

Normalna kriva magnećenja određena je fitovanjem tačaka – vrhova histerezisnih petlji, primenom sigmoidne Grompertzove funkcije [10],

$$B = a \cdot e^{-e^{-k(H-c)}}, \quad (5)$$

pri čemu se, za svaku krivu, određuju parametri a , c i k .

III. MERENJA



Slika 5. Torusno jezgro od ispitivanog materijala i namotan naponski transformator

Ispitivana su dva materijala, čelik Č-1220 i čelik Č-3990, u obliku cevi i istih dimenzija. Debljina cevi je 2,5 mm, dužina srednje linije cevi je 100,48 mm, a visina uzorka je 20 mm. Na

jezgro je namotano 60 zavojska primara i 600 zavojska sekundara sa otcepima na 200 i 400 zavojska (Sl. 5). Korišćena je Cul žica prečnika 0,35 mm. Sva merenja su izvršena na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.

A. Merenja – metoda sa naponskim transformatorom

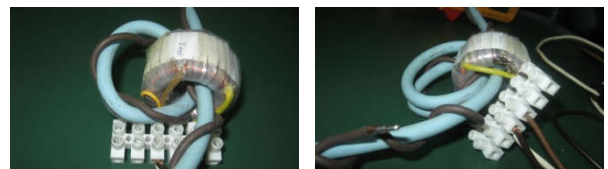
Merno kolo je sastavljeno prema šemi sa Sl. 1. Primar transformatora je napajan iz preciznog dvokanalnog funkcijskog generatora, a efektivna vrednost jačine struje primara je merena instrumentom FLUKE 8846A Multimeter. Elektronski integrator po vremenu je konstruisan u laboratoriji i napajan je akumulatorom vremenski konstantne elektromotorne sile, $\pm 12V$. Histerezisne petlje su prikazivane i snimane na digitalnom osciloskopu, TEKTRONIX TDS 5032, a napon na izlazu integratora je meren instrumentom FLUKE 8846A Multimeter. Otpornost otpornika u primaru transformatora je $R_1 = 1 \Omega$. Relevantni elementi elektronskog integratora imaju vrednosti, $R_2 = 100 k\Omega$ i $C = 1 \mu F$.

Merenja su izvršena za do 10 različitih jačina struja primara na frekvenciji 50Hz.

B. Merenja – metoda sa strujnim transformatorom

Merno kolo je sastavljeno prema šemi sa Sl. 2. Merna oprema sastoji se od strujnog transformatora, šant otpornika 150mV/100A, strujnog generatora na 50Hz, digitalnog osciloskopa Tektronix TDS 5032, strujnih klešta Maxwell MC-25 603 i voltmetara DT9208A i MS8226T DMM. Provodnik kroz strujni transformator je priključen na red sa šant otpornikom i generatorom. U primarnom delu kola generisana je jačina struje, frekvencije 50Hz i efektivne vrednosti od 10A do 170A, u koracima od po 10A. Napon na krajevima šant otpornika, $u_1(t)$ i napon na krajevima sekundarnog namotaja, $u_2(t)$ izmereni su osciloskopom i voltmetrom, a intenzitet struje kroz provodnik, $i(t)$ je izmeren strujnim kleštima.

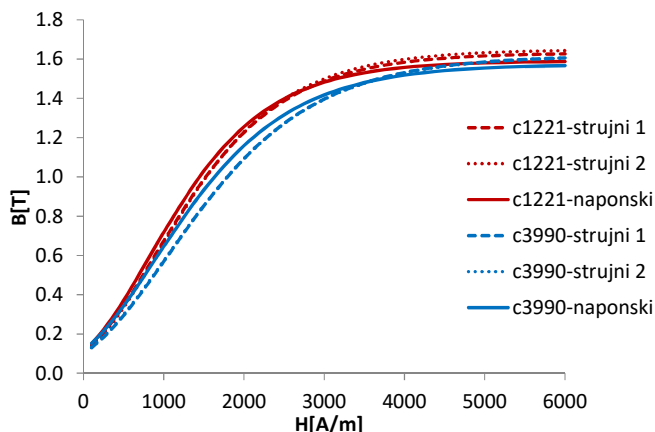
Merenja su izvršena na dva transformatora sa dva jezgra; prvo od čelika Č-1221, a drugo od čelika Č-3990. Za svako jezgro izvršena su po tri seta merenja. U prvom setu merenja je provodnik samo provučen kroz torus strujnog transformatora. Ispostavilo se da jačina struje u provodniku, iako velika (oko 170A), nije dovoljna da u jezgru formira magnetsko polje koje bi moglo da jezgro odvede u zasićenje. Pošto dalje povećanje intenziteta struje nije bilo moguće, u naredna dva seta merenja provodnik je provučen je kroz torus dva puta, Sl. 6a, odnosno, u poslednjem setu merenja tri puta, Sl. 6b. Ovim je postignuto veće magnetsko polje u torusu, koje je bilo dovoljno da se jezgra od oba materijala odvedu u zasićenje.



Slika 6. Transformator sa jednim zavojkom (a) i dva zavojska (b).

IV. REZULTATI

Podaci snimljeni na digitalnom osciloskopu su numerički obrađeni prikazanim postupkom. Na Sl. 7 su, crvenom bojom, prikazane normalne krive magnećenja za čelik Č-1222, a plavom bojom normalne krive magnećenja za čelik Č-3990. Isprekidanim linijama su prikazani rezultati merenja sa strujnim transformatorom, a punim linijama rezultati merenja sa naponskim transformatorom. Isprekidana linija sa crticama odgovara slučaju sa strujnim transformatorom sa jednim zavojkom primara, a isprekidana linija sa tačkicama odgovara slučaju sa strujnim transformatorom sa dva zavojka primara.



Slika 7. Normalne krive magnećenja za čelike Č-1222 i Č-3990

U tabeli I su prikazani parametri a , c i k dobijeni fitovanjem vrhova histerezisnih petlji za slučajeve sa Sl. 7.

TABELA I. PARAMETRI FITOVANE NORMALNE KRIVE MAGNEĆENJA DEFINISANI IZRAZOM (5)

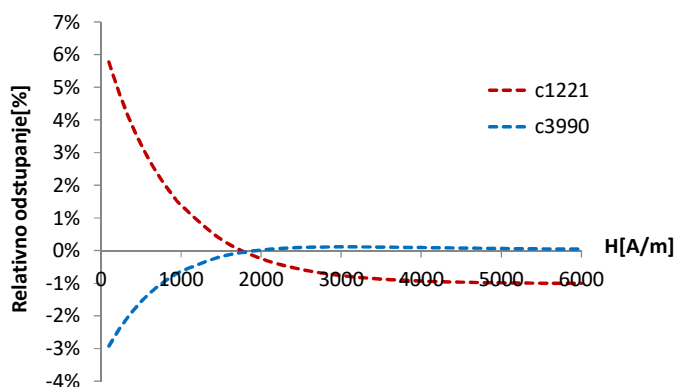
Slučaj	Parametri		
	a	c	k
c1222-strujni 1	1,632	890,3	0,001130
c1222-strujni 2	1,648	914,0	0,001130
c1222-naponski	1,591	809,8	0,001210
c3990-strujni 1	1,619	104,9	0,000978
c3990-strujni 2	1,618	1038,6	0,000972
c3990-naponski	1,574	892,3	0,001070

Da bi se ustanovila razlika između merenja sa strujnim transformatorom, kada je provodnik primara provučen kroz torusni transformator jedan, dva ili tri puta, upoređene su krive magnećenja, pomoću relativnog odstupanja tih krivih,

$$\delta_{rB} = \frac{B_{strujni 1} - B_{strujni 2}}{B_{strujni 2}} \cdot 100. \quad (6)$$

Oznaka „strujni 1“, u izrazu (6), odgovara metodi sa strujnim transformatorom, kada je provodnik provučen dva puta i formira jedan zavojak, a „strujni 2“ kada je provodnik provučen tri puta i formira dva zavojka. Na Sl. 8 prikazano je relativno odstupanje između krivih za oba uzorka. Sa slike se

vidi da, za $H > 1000$ A/m, odstupanje nije veće od 1%, dok je za $H < 1000$ A/m nešto veće. Pri relativno malim vrednostima H je odstupanje maksimalno i iznosi 6% za Č-1222 i 3% za Č-3990.

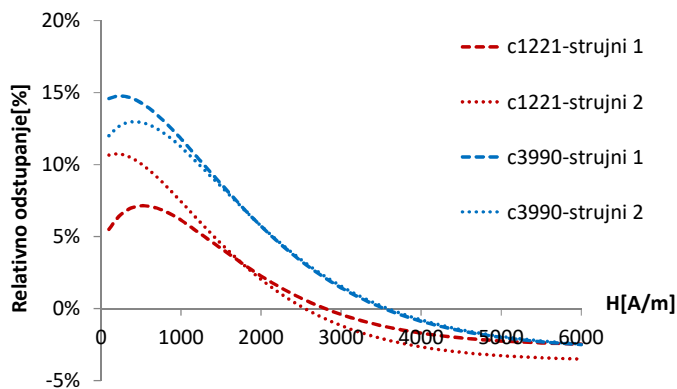


Slika 8. Relativno odstupanje krive magnećenja, definisano izrazom (6), za merenja pomoću strujnog transformatora

Na sličan način mogu da se porede i krive dobijene merenjem pomoću strujnog transformatora sa krivama dobijenim merenjem pomoću naponskog transformatora. Poređenje je moguće izvršiti pomoću relativnog odstupanja definisanog kao,

$$\delta_{rB} = \frac{B_{naponski} - B_{strujni}}{B_{naponski}} \cdot 100, \quad (7)$$

gde oznaka „strujni“ odgovara strujnom transformatoru, a „naponski“ naponskom mernom transformatoru. Odstupanja su prikazana na Sl. 9. Kao što može da se uoči, odstupanja su veća za manje vrednosti intenziteta vektora jačine magnetskog polja (linearni režim rada jezgra), nego za veće vrednosti te veličine (jezgro je u režimu zasićenja). Maksimalno odstupanje u linearnom režimu je u opsegu od 7% do 15%, dok je u zasićenju manje od 3%, što se vidi sa Sl. 9.



Slika 9. Relativno odstupanje krivih magnećenja za merenja pomoću strujnog transformatora u odnosu na merenja pomoću naponskog transformatora, definisano izrazom (7)

V. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani načini određivanja normalne krive magnećenja i izvršena su poređenja korišćenih metoda. Strujni transformator je jednostavniji za izradu u odnosu na naponski, ali su, u slučaju jezgra male permeabilnosti, potrebne jako

velike vrednosti jačine struje, da bi se postiglo zasićenje jezgra. Pošto magnetsko polje u jezgru zavisi od proizvoda broja zavojaka i jačine struje u njima, u ovom slučaju je naponski transformator predstavljao bar jednako dobro rešenje. Pokazano je da se, pri korišćenju strujnog transformatora sa jednom žicom, ne može postići zasićenje, ali da se dodavanjem još jedne ili dve žice može postići zasićenje, uz zadovoljavajuće malo relativno ostupanje merenih rezultata.

Za razliku od ovih ispitivanja, a na osnovu ranijih merenja, prikazanih u radovima [9] i [7], pri ispitivanju feromagnetskih materijala velikih permeabilnosti, podesnije je koristiti strujni transformator u odnosu na naponski transformator.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju osoblju iz kompanije „Doo Energo-bull“ iz Novog Sada i osoblju sa Katedre za električna merenja na FTN u Novom Sadu, na pomoći i podršci prilikom merenja.

Rad predstavlja deo istraživanja na projektima broj TR32055 i TR32019, finansiranim od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, 2011-2017.

LITERATURA

- [1] V. Bego, Mjerenja u elektrotehnici, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.
- [2] E. Della Torre, Magnetic Hysteresis, IEEE Press, New York, 1999.
- [3] D. Herceg, Đ. Herceg, M. Prša, “Using Padé Approximation in Takács Hysteresis Model”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 7, 2015.
- [4] Z. Polik, M. Kuczmann, “Measuring and Control the Hysteresis Loop by Using Analog and Digital Integrators” Journal of optoelectronics and advanced materials, vol. 10, No7, pp. 1861–1865, July 2008.
- [5] J. Anderson, R. Blotzer, Permeability and Hysteresis Measurement, The Measurement, Instrumentation and Sensors, Handbook, Chapter VII/49, Boca Raton, FL, USA: CRC Pres with IEEE Press, 1999, pp 49-57.
- [6] Horst Czichos, Tetsuya Saito, Leslie E. Smith, Handbook of Metrology and Testing, 2nd ed., Springer, 2011, pp.556

- [7] Herceg D., K. Kasaš-Lažetić, V. Bajović, M. Prša, “Measurements of all three magnetisation curves”, 18th International symposium on power electronics – Ee 2015, Novi Sad, Serbia, October 28-30, 2015, Paper, No. T4.2-1, pp. 1-4
- [8] Herceg D., Kasaš-Lažetić K., Prša M., Mučalica N.: “Određivanje magnetskih karakteristika nekih feromagnetskih struktura”, XI Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infoteh-Jahorina 2012, Jahorina, 21-23. mart 2012, Vol 11. Ref ENS 1.8 pp. 104-107.
- [9] K. Kasaš-Lažetić, D. Herceg, A. Poznić, I. Župunski and M. Prša: “Some experiences in initial magnetization curve measurement”, IIEC 2015, Niš, Serbia, Aug. 31 – Sep. 2, 2015. Session O2 05 pp. 1-4. ISBN 978-86-6125-145-0
- [10] L. Petrescu, E. Cazacu, C. Petrescu, “Sigmoid Functions Used in Hysteresis Phenomenon Modeling”, The 9th International Symposium On Advanced Topics In Electrical Engineering, Bucharest, Romania, 2015.

ABSTRACT

Measuring methods for determination of magnetic characteristics of low permeability ferromagnetic materials, based on current and voltage transformers at 50Hz, are examined. A numerical procedure for obtaining normal magnetization curve from experimental data is presented. Measurements were performed on two samples, the results were compared and conclusions about advantages and disadvantages of both methods were drawn. Based on our previous experiments, using the same methods for determination of magnetic characteristics of high permeability ferromagnetic materials, the difference in performance was observed and commented.

DETERMINATION OF MAGNETIC CHARACTERISTICS OF LOW PERMEABILITY FERROMAGNETIC MATERIALS

Dejana Herceg, Karolina Kasaš-Lažetić, Danka Antić,
Nenad Petrović, Marko Krstajić, Miroslav Prša