Određivanje magnetskih karakteristika nekih feromagnetskih struktura

Dejana Herceg, Karolina Kasaš-Lažetić, Miroslav Prša

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, R. Srbija <u>vuletic@uns.ac.rs, kkasa@uns.ac.rs, prsa@uns.ac.rs</u>

Sadržaj— Magnetske karakteristike nekih često korišćenih feromagnetskih struktura uglavnom nisu dostupne, te se moraju odrediti merenjima. U radu su opisani i diskutovani postupci i problemi nastali prilikom merenja histerezisnih krivih, određivanja normalnih krivih magnećenja i srednje relativne permeabilnosti. Polazeći od konstrukcije uzoraka za merenja, preko određivanja jačina struja i broja zavojaka u namotajima uzoraka, do konstrukcije merne opreme, sva uspešna rešenja su prikazana u ovom radu. Neki matematički postupci za određivanje normalne krive magnećenja i srednje relativne permeabilnosti su posebno razvijeni i prikazani u radu. Rezultati merenja su obrađeni u programskom paketu *Mathematica*. Na kraju rada su grafički prikazane neke od snimljenih histerezisnih petlji i neke od izračunatih normalnih krivih magnećenja.

Ključne riječi- Merenje histerezisne krive; određivanje normalne krive magnećenja; određivanje srednje relativne permeabilnosti

I. Uvod

Feromagnetske strukture nepoznatih magnetskih karakteristika se vrlo često sreću i koriste u elektrotehničkoj praksi. Na primer, crne i pocinkovane cevi, kao i pocinkovani limovi mogu relativno uspešno da se koriste kao magnetski štitovi, dok su magnetske osobine čeličnog jezgra Alučel užeta značajne za ponašanje celog užeta. Nažalost, ove podatke najčešće ne poznaju ni proizvođači tih struktura, tako da je jedina mogućnost određivanja tih karakteristika merenje.

Merenje magnetskih karakteristika feromagnetskih struktura je uglavnom poznato i detaljno je opisano u [1], kao i u [2], [3] i [4]. Međutim, svako takvo merenje iziskuje pripremu uzoraka za merenje, kao i konstrukciju uređaja za merenje konkretnih struktura. Osim toga, izmereni rezultati moraju da se obrade matematički, kako bi se iz njih izvukle tražene magnetske karakteristike.

U ovom radu će biti prikazano određivanje magnetskih karakteristika pet različitih struktura; dve crne cevi različitih prečnika, standardni pocinkovani lim debljine 0,5mm i dve žice pocinkovanog čeličnog jezgra Alučel užeta, prečnika 2,25mm. Svih pet struktura je formirano u obliku tankog torusa i na te toruse je namotan određen broj zavojaka lakiranog bakarnog provodnika. Određivanje broja zavojaka i debljine bakarnog provodnika će takođe biti prikazano u radu.

Nikola Mučalica

Elektroenergetika – Južna Bačka Novi Sad, R. Srbija <u>nikola499288@gmail.com</u>

Elektronika neophodna za merenje histerezisne krive je takođe morala da bude razvijena specijalno za ovaj problem, pa će i o tome će biti reči u nastavku ovog rada.

Da bi se izmerila histerezisna kriva, neophodno je bilo konstruisati transformator, sa određenim brojem zavojaka primara i sekundara i sa uzorkom u obliku torusa, koji predstavlja feromagnetsko jezgro transformatora. Šematski prikaz takvog transformatora je dat na Sl. 1.

II. TEORIJSKA OSNOVA

A. Određivanje broja zavojaka primara i jačine struje primara

Da bi mogla da se odredi normalna kriva magnećenja u celom domenu H-B dijagrama do zasićenja, amperzavojci primara moraju da budu dovoljni da materijal jezgra dovedu u zasićenje.

Poznatom metodom za rešavanje magnetskih kola [5], primenjenom na primar transformatora prikazanom na Sl. 1, određeni su amperzavojci primara,

$$N_1 i_1 = H\ell = \frac{B}{\mu}\ell, \qquad (1)$$

gde je *B* intenzitet vektora magnetske indukcije u jezgru, dovoljan da dovede jezgro u zasićenje, μ je permeabilnost materijala od koga je napravljeno jezgro, a ℓ dužina ose torusnog jezgra.



Slika 1. Torusni transformator sa feromagnetskim jezgrom

Već u ovom koraku nastupa prvi problem. Jedan od konačnih ciljeva ovog rada je određivanje permeabilnosti materijala, koja, međutim, nastupa u izrazu (1). Zbog toga u izrazu (1) mora da se pretpostavi neka vrednost permeabilnosti, dovoljno mala da, pri izračunatoj vrednosti amperzavojaka, materijal sigurno ode u zasićenje.

Sledeći korak je određivanje jačine struje i broja zavojaka iz njihovog proizvoda, N_1i_1 . Jačina struje i broj zavojaka su određeni na osnovu zahteva korišćene elektronike da ulazna impedansa transformatora bude u željenom opsegu.

B. Snimanje histerezisne krive

Da bi se odredila normalna kriva magnećenja, neophodno je snimiti više histerezisnih krivih, za različite vrednosti jačine struje primara i zatim povezati vrhove tih histerezisa. Efektivna vrednost jačine prostoperiodične struje primara, koja je, prema izrazu (1), proporcionalna intenzitetu vektora jačine magnetskog polja, *H*, meri se preciznim ampermetrom. Šema uređaja za snimanje histerezisa je data na Sl. 2.

Na horizontalne priključke osciloskopa dovodi se napon na otporniku poznate otpornosti R_1 , koji je proporcionalan jačini struje primara,

$$u_{R1} = R_1 i_1 = k_H H$$
, gde je $k_H = \frac{R_1 \ell}{N_1}$. (2)

Napon na izlazu operacionog pojačivača, koji predstavlja elektronski integrator po vremenu, je

$$u_2 = k_B B$$
, gde je $k_B = \frac{N_2 S}{R_2 C}$. (3)

Ovaj napon se vodi na elektrode osciloskopa za vertikalni otklon. Na taj način se na osciloskopu dobija odgovarajuća histerezisna kriva u određenoj razmeri. Ovi izmereni podaci se direktno snimaju u datoteku na perifernu USB memoriju osciloskopa. Iz memorisanih podataka se određuju histerezisne krive koje čine skup parova vrednosti intenziteta vektora H i B

$$H = \frac{u_{R1}}{k_H} \text{ i } B = \frac{u_2}{k_B} .$$
 (4)

U programskom paketu *Mathematica*, potebno je izvršiti fitovanje svake histerezisne krive splajn funkcijom.



Slika 2. Šema uređaja za merenje histerezisne krive



Slika 3. Histerezisne petlje (levo), kriva magnećenja i permeabilnosti (desno)

Potom se za svaku histerezisnu petlju određuje tačka sa maksimalnim vrednostima, H_{max} i B_{max} , koja je istovremeno i tačka normalne krive magnećenja. Za različite jačine struje primara se dobijaju drugačije vrednosti H_{max} i B_{max} . čijim spajanjem se, u H-B dijagramu, dobija normalna kriva magnećenja, prikazana isprekidanom linijom na Sl. 3 levo.

Iz normalne krive magnećenja može da se odredi srednja statička permeabilnost, linearnim fitovanjem normalne krive magnećenja (prava *a* na Sl. 3 desno), ili početna dinamička permeabilnost, provlačenjem prave kroz prve dve tačke normalne krive magnećenja (prava *b* na Sl. 3 desno),

$$\mu_{st.sr} = \left(\frac{B}{H}\right)_{sr} = tg\alpha_1 \quad i \quad \mu_{din.poc} = \left(\frac{dB}{dH}\right)_{poc} = tg\alpha_2.$$
(5)

Zbog niskog napona napajanja transformatora i niskih napona dobijenih na izlazu iz integratora, histerezisne petlje snimljene na osciloskopu sadrže znatnu količinu šuma. Taj šum je bio delimično filtriran prilikom merenja, ali je dobar deo ostao i morao je da bude eliminisan numeričkim postupkom, fitovanjem krive histerezisa.

III. MODELI

Kao što je prethodno rečeno, snimanja krivih histerezisa je urađeno na pet različitih uzoraka. Prva dva uzorka su bile crne šavne cevi, unutrašnjeg prečnika Φ 44mm i Φ 56mm, debljine zida 2mm i visine 20mm. Pocinkovani lim, kao treći uzorak, standardne debljine 0,5mm (debljina feromagnetskog materijala je 0,4mm) je bio savijen i zalemljen u torus prečnika Φ 47,75mm (ℓ = 150mm), visine 20mm. Još dva uzoraka su dobijena savijanjem žice pocinkovanog čeličnog jezgra Alučel provodnika, prečnika Φ 2,25mm, u torus prečnika Φ 40,05mm (ℓ = 125,82mm). Krajevi jednog od Alučel provodnika su bili zavareni, a krajevi drugog obrađeni i spojeni odgovarajućom spojnicom.

Primarni namotaj svih uzoraka se sastojao od po 1000 zavojaka lakiranog bakarnog provodnika, Cul Φ 0,3mm. Brojevi zavojaka sekundara su se, zbog različite geometrije i time različitih potrebnih amperzavojaka neophodnih da se materijal dovede u zasićenje, razlikovali od uzorka do uzorka. Brojevi zavojaka sekundara, zajedno sa brojevima uzoraka, kojima su uzorci obeležavani skraćeno u ovom radu, su prikaza-ni su u Tabeli I.

TABELA I. BROJEVI ZAVOJAKA SEKUNDARNOG NAMOTAJA

Broj uzorka							
1	2	3	4	5			
Uža cev Φ 44mm	Šira cev Φ 56mm	Pocinko- vani lim	Čelična žica zavarena	Čelična žica i spojnica			
265	343	453	317	347			

Merenja su izvršena u Laboratoriji za električna merenja, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, na temperaturi 22°C. Uzorci su bili napajani iz električne mreže, preko rastavnog regulacionog transformatora. Jačina struje primara je bila merena preciznim univerzalnim instrumentom, FLUKE 87 True RMS Multimeter, integrator je izrađen u istoj laboratoriji, snimanja su vršena na osciloskopu TEKTRONIX TDS 5032 Digital Phosphor Oscilloscope, a vrednosti elemenata označenih na Sl. 2 su, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 15k\Omega$ i $C = 2\mu$ F. Izlazni naponi na integratoru su bili takođe izmereni na svim merenjima, multimetrom VOLCRAFT VC 150.

IV. DOBIJENI REZULTATI

Merenja na svih 5 uzoraka su izvršena za 12 različitih efektivnih vrednosti jačine struje primara frekvencije 50Hz. Te vrednosti su bile od 0,1A do 1A sa korakom 0,1A, a zatim su merenja izvršena i za vrednosti 1,2A i 1,5A. Pri svakoj od tih jačina struja je određen napon na izlazu integratora i ti naponi su, kao primer, za uzorak broj 3, prikazani u Tabeli II.

TABELA II. NAPONI NA IZLAZU INTEGRATORA

i1 [A]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
u ₂ [V]	0,025	0,051	0,066	0,078	0,083	0,087
i1 [A]	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5
u ₂ [V]	0,091	0,093	0,097	0,100	0,103	0,106

Posle toga je, za svaki od uzoraka i za sve jačine struja, kriva proporcionalana histerzisnoj krivoj prikazana na osciloskopu i snimljena sa 5000 odbiraka u fajl na eksternoj memoriji priključenoj na osciloskop. Tipičan oblik histerzisne krive prikazan je na Sl. 4 za uzorak broj 3, pri $i_1 = 1,0A$.

Kao što može da se vidi sa Sl. 4, histerezisna kriva je na osciloskopu prikazana debelom linijom, što je posledica šuma, odnosno, uticaja nepoznatih elektromagnetskih polja prisutnih za vreme merenja. Rešenje tog problema je jedan od ključnih doprinosa ovog rada. U ovom radu je, za rešavanje problema, izabrana matematička obrada izmerenih rezultata, odnosno, provlačenje krive kroz rezultate dobijene u toku jedne periode.

Na taj način su dobijeni histerezisi, prikazani na Sl. 5, a na istoj slici su obeležene i tačke koje formiraju normalnu krivu magnećenja.

Tačke koje predstavljaju normalnu krivu magnećenja su dobijene kao maksimalno rastojanje od koordinatnog početka normiranih vrednosti H i B.

Povezivanjem tih tačaka je određena normalna kriva magnećenja, prikazana na Sl. 6. Na Sl. 6 su prikazane i prave čiji uglovi, prema Sl. 3 i izrazu (5), određuju statičku i početnu dinamičku permeabilnost.



Slika 4. Prikaz na osciloskopu histerezisne petlje uzorka broj 3, pri jačini struje primara 1,0A



Slika 5. Familija histerezisnih petlji uzorka broj 3, pri svim jačinama struja



Slika 6. Normalna kriva magnećenja uzorka broj 3, sa definisanim uglovima α_1 i α_2

Na osnovu određenih uglova, α_1 i α_2 , izračunate su srednja statička i početna dinamička permeabilnost, kao i odgovarajuće relativne permeabilnosti. Za uzorak broj 3, te vrednosti su,

$$\mu_{st.sr} = tg\alpha_1 = 7,96.10^{-5} H/m$$
 $\mu_{st.sr.rel} = \frac{\mu_{st.sr}}{\mu_0} = 63,44$

$$\mu_{din.poc} = tg\alpha_2 = 2,52.10^{-4} H/m$$
 $\mu_{din.poc.rel} = \frac{\mu_{din.poc}}{\mu_0} = 201,40$

TABELA III.

IZRAČUNATE VREDNOSTI RELATIVNIH PERMEABILNOSTI

11	Broj uzorka					
μ	1	2	3	4	5	
$\mu_{{}_{st.sr.rel}}$	59,82	72,36	63,44	44,96	85,08	
$\mu_{din.poc.rel}$	398,34	309,30	201,40	186,96	188,72	

Na isti način su određene i permeabilnosti ostalih uzoraka, a sve izračunate vrednosti relativnih permeabilnosti su prikazane u Tabeli III.

V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan način određivanja obično nedostupnih magnetskih karakteristika nekih feromagnetskih struktura, koje se već koriste u praksi ili mogu da posluže kao zaštita od neželjenih magnetskih polja.

Da bi mogle da se odrede magnetske karakteristike, bilo je neophodno, prvo, od istraživanih materijala napraviti uzorke, u obliku tankog torusnog jezgra, na kome su kasnije namotana dva namotaja, sa određenim brojevima zavojaka. Na taj način je dobijen torusni transformator sa jezgrom od ispitivanog feromagnetskog materijala.

Određivanje magnetskih osobina su pratili neki neočekivani problemi, koji su, u toku istraživanja, uspešno rešavani. Način rešavanja svih nastalih problema je detaljno opisan u ovom radu.

Tokom prikazanih istraživanja se pokazalo da poznate merne metode nisu bile dovoljne za predviđena merenja, već su mereni rezultati morali dodatno da se obrade odgovarajućim matematičkim postupcima, što je takođe prikazano u ovom radu.

Kao konačni rezultati rada na prikazanoj problematici su dobijene nelinearne histerezisne krive svih ispitanih materijala, za više različitih maksimalnih vrednosti intenziteta jačine magnetskog polja i intenziteta vektora magnetske indukcije. Iz tako određenih histerezisnih petlji su određene i nelinearne normalne krive magnećenja, značajne za dalji rad na problemima u kojima ispitivani materijali nastupaju.

U nekim jednostavnijim situacijama je moguća linearizacija ispitivanih materijala, što je omogućeno određivanjem srednje statičke ili dinamičke permeabilnosti datog materijala. I ovaj problem je uspešno rešen i izračunate vrednosti tih permeabilnosti za konkretne materijale su takođe prikazane u ovom radu.

Pokazano je da ovakvo određivanje magnetskih karakteristika feromagnetskih materijala može uspešno da se

koristi za sve materijale koji mogu da se formiraju u obliku tankog torusa.

ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektima broj TR32055 i TR32019, finansiranim od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, 2011-2014.

Autori se zahvaljuju kolegama sa Katedre za električna merenja, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, za svesrdnu pomoć pri obavljanju prikazanih merenja.

LITERATURA

- V. Bego, Mjerenja u elektrotehnici, 5. dopunjeno izdanje, Zagreb: Tehnička knjiga, 1981, pp 465-466.
- [2] E. Della Torre, Magnetic Hysteresis, IEEE Press, New York, 1999.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Branko Popović, Osnovi elektrotehnike 2, drugo izdanje, Beograd: Građevinska knjiga, 1981, pp 100-129.

ABSTRACT

Magnetic characteristics of some commonly applied ferromagnetic structures are often not available and are therefore determined by measurements. The main goal of this paper is to describe and discuss procedures and problems appearing in hysteresis loops measurements, as well as normal magnetization curve and average relative permeability determination. Starting from the construction of measurement samples, through the current and the sample winding turns determination to the measurement equipment construction, all successful solutions are presented in this paper. Experimental results were processed in *Mathematica*. At the end of the paper, some of determined hysteresis loops and calculated normal magnetization curves are presented graphically.

DETERMINATION OF MAGNETIC CHARACTERISTICS OF SOME FERROMAGNETIC STRUCTURES

Dejana Herceg, Karolina Kasaš-Lažetić, Miroslav Prša, Nikola Mučalica