

# Uticaj zavarivanja na magnetske karakteristike feromagnetskih materijala

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

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](mailto:prsa@uns.ac.rs)

**Sažetak**—Magnetske karakteristike feromagnetskih materijala uvek zavise od temperature materijala. Značaj te zavisnosti je ispitivana i prikazana u ovom radu. Da bi se to postiglo, konstruisana su dva torusna feromagnetska jezgra; prvo od njih je napravljeno zavarivanjem, dok su kod drugog krajevi spojeni pomoću mesingane spojnice. Na oba jezgra su namotani primarni i sekundarni namotaj, tako da su dobijeni torusni transformatori. Koristeći prethodno razvijen i već prikazan merni postupak na oba torusna transformatora, određene su familije histerezisnih petlji, normalna kriva magnećenja, kao i statička i dinamička permeabilnost ispitivanog materijala. Dobijeni rezultati su pokazali značajno smanjenje vrednosti permeabilnosti u slučaju zavarenog jezgra, naglašavajući time uticaj veoma visokih temperatura, dostignutih prilikom procesa zavarivanja.

**Cljučne reči** - zavarivani feromagnetski materijali; magnetske karakteristike; upoređivanje permeabilnosti;

## I. UVOD

U elektrotehničkoj teoriji i praksi se, za formiranje magnetskih kola, često koriste feromagnetski materijali, koji se ne zavaruju. Međutim, osim takvih materijala, koji obično imaju velike vrednosti permeabilnosti, u određenim situacijama se koriste i razni čelici, koji imaju manje permeabilnosti i vrlo često se takvi materijali spajaju zavarivanjem. Vrlo često su takvi sklopovi sastavni delovi električnih uređaja, pa je važno poznavanje njihovih magnetskih parametara. U teoriji i praksi postoji više načina određivanja magnetskih karakteristika materijala [1]-[6], a neki od tih načina su već korišćeni, 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 su ispitivane karakteristike čeličnog jezgra Alučel provodnika u dva slučaja; u prvom slučaju je feromagnetski materijal bio zavaren, da bi se konstruisalo torusno jezgro za proces merenja, a u drugom slučaju je torusno jezgro sastavljeno pomoću neferomagnetske mesingane spojnice. Na oba jezgra su namotana dva namotaja, tako da su oba sklopa predstavljala transformatore sa torusnim jezgrom, odnosno, tzv. „prstenasti uzorak“, kako bi mogli da se koriste za snimanje familije histerezisnih petlji i normalne krive magnećenja [1], [7]-[9].

Određivanje magnetskih karakteristika ispitivanog materijala je bilo obavljeno na više različitih frekvencija, a u oba slu-

čaja određivanja normalnih krivih magnećenja je bila neophodna dodatna numerička obrada izmerenih vrednosti.

## II. TEORIJSKE OSNOVE, MERNI SKLOP I NUMERIČKA OBRADA PODATAKA

Za određivanje normalne krive magnećenja ispitivanog materijala moguće je koristiti naponski ili strujni transformator, čije je jezgro napravljeno od ispitivanog materijala. Oba postupka imaju svoje prednosti i nedostatke, a u ovom slučaju je odlučeno da se za merenje primeni metod sa naponskim transformatorom i elektronskim integratorom, koji je prikazan na Sl. 1 [7]. Da bi mogla da se odredi normalna kriva magnećenja u celom domenu BH dijagrama do zasićenja, amperzavojci primara moraju da budu dovoljni da materijal jezgra dovedu u zasićenje. Potreban broj amperzavojaka je određen po postupku detaljno objašnjenom u [7] i [8].

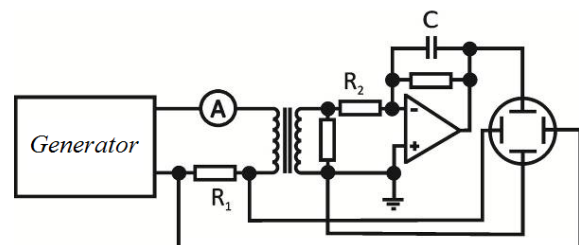
Na priključke osciloskopa se dovodi napon na otporniku  $R_1$ , koji je proporcionalan jačini struje primarnog namotaja. Intenzitet vektora jačine magnetskog polja u torusnom jezgru zavisi od jačine struje i broja zavojaka primara. Mereni napon  $u_{R1}$  je srazmeran intenzitetu vektora jačine magnetskog polja u torusu,

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

gde je  $\ell$  dužina srednje linije jezgra, a  $N_1$  je broj zavojaka primara.

Napon na izlazu elektronskog integratora je

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



Slika 1. Merni sklop sa naponskim transformatorom.

gde je  $S_{pp}$  površina poprečnog preseka feromagnetskog torusnog jezgra, a  $B$  je intenzitet vektora magnetske indukcije u jezgru. Kompletan opis postupka merenja mernim sklopom sa naponskim transformatorom i elektronskim integratorom, kao i numerička obrada rezultata merenja, prikazani su u [7], [8] i [9].

Teorijski, način određivanja permeabilnosti je dobro poznat. Na izabranoj frekvenciji se, korišćenjem mernog sklopa prikazanog na Sl. 1, za različite vrednosti jačine struje primara, snima se familija histerezisnih petlji, kao što je prikazano na levoj strani Sl. 2

Povezivanjem vrhova histerezisnih petlji se dobija normalna kriva magnećenja, prikazana isprekidanom linijom na levoj strani Sl. 2, odnosno, punom linijom na desnoj strani Sl. 2. Iz krive magnećenja se, zatim, određuju statička i dinamička permeabilnost.

Statička permeabilnost se definiše kao odnos intenziteta vektora magnetske indukcije i vektora jačine magnetskog polja, za svaku tačku normalne krive magnećenja,

$$\mu_{st,i} = \frac{B_i}{H_i} = \text{tg } \alpha_1, \quad (3)$$

pri čemu je definisana i srednja vrednost statičke permeabilnosti za ispitivani uzorak,

$$\mu_{st,sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{st,i}. \quad (4)$$

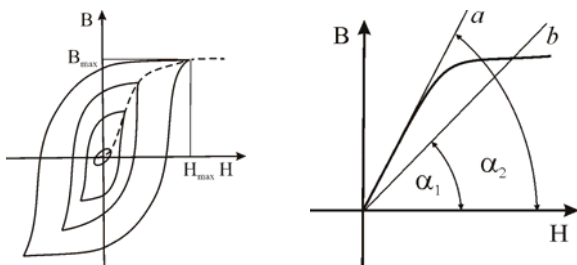
Dinamička permeabilnost se definiše kao izvod intenziteta vektora magnetske indukcije po intenzitetu vektora jačine magnetskog polja, odnosno, kao odnos prirastaja intenziteta vektora magnetske indukcije i vektora jačine magnetskog polja, u nekoj tački normalne krive magnećenja,

$$\mu_{din} = \frac{dB}{dH} = \text{tg } \alpha_2, \quad (5)$$

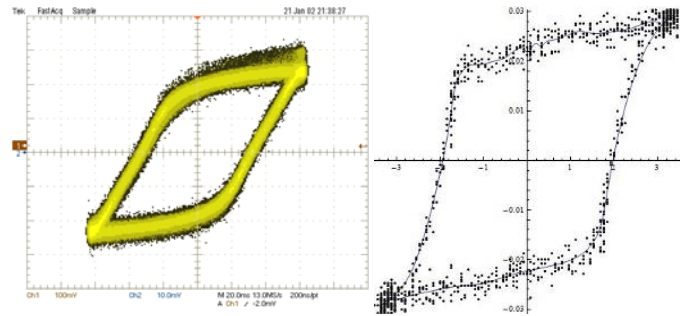
a definisana je i početna vrednost dinamičke permeabilnosti za ispitivani uzorak,

$$\mu_{din,poc} = \left( \frac{dB}{dH} \right)_{poc} = \frac{B_1}{H_1}. \quad (6)$$

Međutim, prilikom merenja histerezisnih petlji, usled nepoznatih spoljašnjih smetnji, histerezisne petlje nisu imale oblik prikazan na Sl. 2, već je prikaz na ekranu digitalnog osciloskopa sa pamćenjem izgledao kao na levoj strani Sl. 3.



Slika 2. Određivanje statičke i dinamičke permeabilnosti.



Slika 3. Primeri izmerenih histerezisnih petlji.

U H-B dijagramu na desnoj strani Sl. 3 je, tačkicama, prikazan primer izmerenih rezultata i iz tog prikaza se vidi da je, za kasniju obradu, bila neophodna naknada obrada izmerenih rezultata. U konkretnom primeru je to urađeno fitovanjem kubnim splajnom, posebno gornjeg, a posebno donjeg dela histerezisne petlje i tako fitovana kriva je prikazana punom linijom na Sl. 3 desno.

Neophodna numerička obrada rezultata je najiscrpnije opisana u [7].

### III. ISPITIVANI MODELI

Da bi mogao da se ispita uticaj zavarivanja na magnetske osobine feromagnetskih materijala, napravljena su dva torusna jezgra od čelične žice koja se koristi u Alučel užadima. Torusna jezgra su formirana na dva načina, kao što je prikazano na Sl. 4.

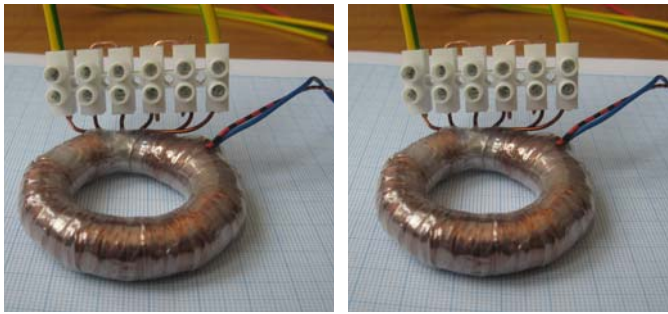
U prvom slučaju, prikazanom na levoj strani Sl. 4, je prikazano jezgro kod koga su krajevi žice spojeni zavarivanjem, pri čemu je zavarivanje bilo autogeno, odnosno, za spajanje je korišćen isti materijal. U drugom slučaju je za spajanje krajeva čelične žice korišćena neferomagnetska, mesingana spojnica, uz prethodno precizno obrađene površi spajanja.

Na tako konstruisana jezgra su zatim namotani primarni i sekundarni namotaji, tako da su dobijeni torusni transformatori prikazani na Sl. 5.

Kao što može da se uoči na Sl. 5, oba transformatora su namotana sa otepcima na sekundaru, kako bi mogli da se prilagode korišćenoj mernoj opremi.



Slika 4. Načini formiranja torusnog jezgra.



Slika 5. Izgled gotovih torusnih transformatora.

Osim toga, i na primar oba transformatora je, na prvobitnih 1000 zavojava, dodato još 1000 zavojava, kako bi se, na svim frekvencijama, postiglo zasićenje feromagnetskog jezgra. Broj namotaja primara je, prema tome, u oba slučaja bio isti, 2000 zavojava, dok je broj zavojava sekundara bio 317 zavojava za zavareni torus, odnosno 347 zavojava za torus sa spojnicom.

Nakon formiranja torusnih jezgara se pristupilo merenjima, prema mernom sklopu prikazanom na Sl. 1, u Kalibracionoj laboratoriji na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. U toku merenja su korišćeni sledeći uređaji:

Primarni namotaj je bio napajan pomoću preciznog dvokanalnog funkcijskog generatora, GF-1, a jačina primarne struje je merena univerzalnim instrumentom FLUKE 87 True RMS Multimeter. Elektronski integrator je konstruisan u istoj laboratoriji i napajan posebnim akumulatorom,  $\pm 6$  V. Za prikaz i pamćenje histerezisnih krivih je korišćen digitalni osciloskop s pamćenjem, TEKTRONIX TDS 5032 Digital Phosphor Oscilloscope, a napon na izlazu elektronskog integratora je meren univerzalnim instrumentom VOLCRAFT VC 150 Multimeter. Vrednosti elektronskih elemenata sa Sl. 1 su bile:  $R_1 = 1 \Omega$ ,  $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$  i  $C = 2 \mu\text{F}$ . Temperatura ambijenta je iznosila  $22^\circ\text{C}$ .

Sva merenja su izvršena za do 10 različitih vrednosti jačine struje primara, pri čemu su te vrednosti birane tako, da je prvo izmerena jačina struje pri kojoj dolazi do potpunog zasićenja feromagnetskog jezgra, a zatim je ta vrednost deljena sa 10. Merenja su vršena na mrežnoj frekvenciji, 50 Hz, kao i na još šest frekvencija, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 350 Hz i 450 Hz.

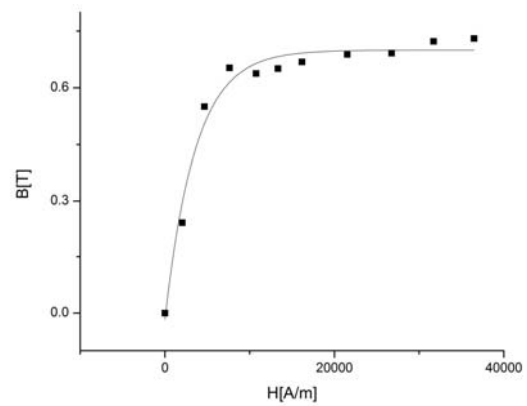
#### IV. REZULTATI

Rezultati dobijeni ovim merenjima i korekcijama izmerenih rezultata korišćenjem metoda numeričke analize, prikazani su grafički i tabelarno, dijagramima i tabelama koje slede.

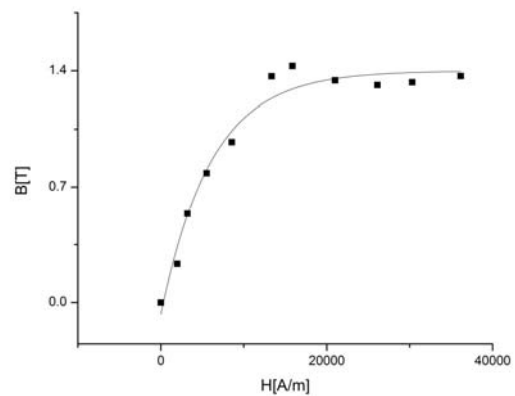
Iz obrađenih familija histerezisnih petlji, za oba torusna transformatora, na frekvenciji 50 Hz, dobijene su normalne krive magnećenja, prikazane na slikama 6 i 7.

Na Sl. 6 je prikazana normalna kriva magnećenja za slučaj kada je torusno jezgro dobijeno zavarivanjem, dok je na Sl. 7 prikazana normalna kriva magnećenja za slučaj kada je torusno jezgro dobijeno spajanjem krajeva žice spojnicom.

Prvo što može da se zapazi iz gornjih slika je da ni vrhovi histerezisa, obeleženi kvadratićima, nisu mogli da budu određeni sasvim tačno, uprkos korekciji izmerenih rezultata. Zbog



Slika 6. Normalna kriva magnećenja zavarenog jezgra.



Slika 7. Normalna kriva magnećenja jezgra sa spojnicom.

toga su i normalne krive magnećenja određene, ne spajanjem vrhova histerezisnih petlji, već fitovanjem kroz te tačke, principi pom najmanjih kvadrata odstupanja.

Važnija činjenica, koja takođe može da se uoči sa prethodnih slika, su maksimalne vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, koje su približno dvostruko manje kod zavarenog jezgra, u odnosu na jezgro sa spojnicom. To već na ovom mestu ukazuje na to, da kod jezgra sa spojnicom mogu da se očekuju znatno veće vrednosti permeabilnosti, odnosno, da je zagrevanje feromagnetskog materijala tokom zavarivanja značajno smanjilo magnetske parametre zavarenog materijala

Fitovanjem vrhova histerezisnih petlji se dobijaju normalne krive magnećenja, prikazane u Tabeli I, koje se koriste za određivanje permeabilnosti uzoraka.

Iz krivih magnećenja sa slika 6 i 7 i iz Tabele I se određuju statičke i dinamičke relativne permeabilnosti, prema izrazima (3) i (5), čije su vrednosti prikazane u Tabeli II.

Iz Tabele II može da se odredi srednja vrednost relativne statičke permeabilnosti jezgra konstruisanog zavarivanjem, koja iznosi,  $\mu_{r \text{ st sr}} = 43,161$ , dok je početna vrednost relativne dinamičke permeabilnosti,  $\mu_{r \text{ din poc}} = 64,920$ . Srednja vrednost relativne statičke permeabilnosti jezgra konstruisanog spojnicom, iznosi,  $\mu_{r \text{ st sr}} = 81,233$ , a početna relativna dinamička permeabilnost je,  $\mu_{r \text{ din poc}} = 118,679$ .

TABELA I. KRIVE MAGNEĆENJA

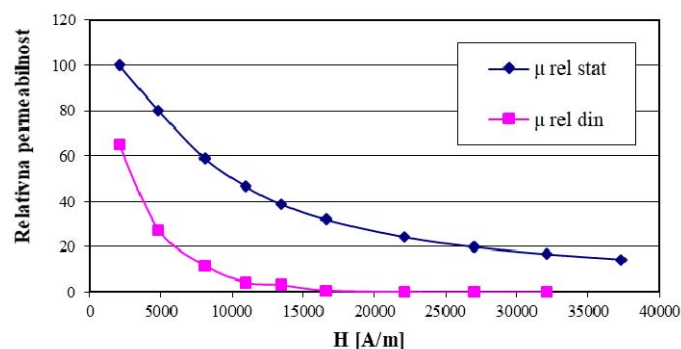
Jezgro konstruisano zavarivanjem		Jezgro konstruisano spojnicom	
$H$ [A/m]	$B$ [T]	$H$ [A/m]	$B$ [T]
0,00	0,000	0,00	0,000
2074,69	0,261	1799,16	0,352
4854,76	0,488	3012,55	0,533
8091,29	0,599	5230,13	0,797
10954,36	0,642	8284,52	1,017
13443,99	0,655	13096,23	1,213
16597,52	0,668	15564,85	1,269
22116,20	0,673	20836,82	1,331
26970,97	0,674	25815,90	1,352
32116,20	0,674	29916,32	1,354
37344,42	0,674	35732,21	1,356

TABELA II. RELATIVNE PERMEABILNOSTI

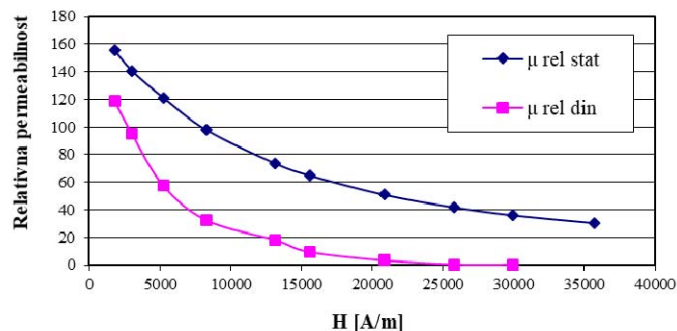
Jezgro konstruisano zavarivanjem		Jezgro konstruisano spojnicom	
$\mu_{r\text{ stat}}$	$\mu_{r\text{ din}}$	$\mu_{r\text{ stat}}$	$\mu_{r\text{ din}}$
100,110	64,920	155,478	118,679
79,959	27,440	140,656	94,794
58,951	11,757	121,211	57,443
46,616	4,315	97,700	32,336
38,783	3,180	73,684	18,104
32,018	0,779	64,869	9,419
24,223	0,148	50,840	3,324
19,889	0,000	41,675	0,404
16,702	0,000	36,019	0,285
14,364		30,202	

Grafički prikaz promena relativnih permeabilnosti u zavisnosti od intenziteta vektora jačine magnetskog polja, je dat na Sl. 8 za zavareno jezgro, odnosno, na Sl. 9 za jezgro sa spojnicom.

Kao što može da se zapazi u Tabeli II i na dijagramima sa Sl. 8 i Sl. 9, a prema očekivanjima, vrednosti permeabilnosti su značajno manje kod zavarenog feromagnetskog jezgra u odnosu na jezgro koje nije bilo izloženo ekstremno visokim temperaturama.



Slika 8. Relativne permeabilnosti zavarenog jezgra.



Slika 9. Relativne permeabilnosti jezgra sa spojnicom.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano poređenje magnetskih karakteristika (normalnih krivih magnećenja i relativnih permeabilnosti) dva feromagnetska jezgra od istog materijala, koji je, u jednom slučaju, bio izložen visokim temperaturama prilikom zavarivanja, dok drugi uzorak nije. Pokazano je da su se magnetske karakteristike zavarenog materijala smanjile u odnosu na slučaj kada materijal nije bio zagrevan, bez obzira što je materijal spojen autogenim zavarivanjem, odnosno, spajanje je izvršeno istim materijalom. To znači da je zagrevanje feromagnetskog materijala do tačke topljenja izazvalo smanjenje svih permeabilnosti materijala, kojima se prikazuju njegove magnetske karakteristike.

U ovom slučaju je posmatran materijal relativno malih permeabilnosti, koji se ne koristi za konstrukciju magnetskih kola, pošto se kod takvih materijala spajanje u praksi često vrši upravo zavarivanjem, što nije slučaj sa specijalnim feromagnetskim materijalima za magnetska kola, koja se nikada ne zavaruju.

## ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju kolegama 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, 1990, Tehnička knjiga, Zagreb.
- [2] E. Della Torre, Magnetic Hysteresis, 1999, IEEE Press, New York.
- [3] D. Herceg, Đ. Herceg and M. Prša, "Using Padé Approximation in Takács Hysteresis Model", IEEE Transactions on Magnetics, vol, 51, no, 7, 2015.
- [4] Z. Polik and M. Kuczmann, "Measuring and Control the Hysteresis Loop by Using Analog and Digital Integrators" Journal of optoelectr. and advanced materials, vol, 10, No7, pp, 1861-1865, July 2008.
- [5] J. Anderson and 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] H. Czichos, T. Saito and L. E. Smith, Handbook of Metrology and Testing, 2011, 2rd ed, Springer, pp.556.
- [7] D. Herceg, K. Kasaš-Lažetić, V. Bajović and 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] D. Herceg, K. Kasaš-Lažetić, M. Prša i N. Mučalica: “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.

#### ABSTRACT

Magnetic characteristics of ferromagnetic materials depend always on the material temperature. The significance of this dependence is explored and presented in this paper. For this reason, two toroidal ferromagnetic cores are constructed; the first ferromagnetic torus was made by welding and the other was connected applying a brass clamp. On both cores primary

and secondary windings are placed, forming toroidal transformers. Applying previously developed and already presented measurement procedure on both toroidal transformers, the hysteresis families, normal magnetization curves and static and dynamic permeability values are determined. The obtained results have shown a significant decrease of permeability in the case of welded core, emphasizing the influence of very high temperature during welding process.

#### **IMPACT OF WELDING ON MAGNETIC CHARACTERISTICS OF FERROMAGNETIC MATERIALS**

Karolina Kasaš-Lažetić, Dejana Herceg, Danka Antić,  
Miroslav Prša