

ODREĐIVANJE ELEKTRIČNIH I MAGNETSKIH KARAKTERISTIKA ALUČEL UŽADI

K. Kasaš-Lažetić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

M. Prša, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

D. Herceg, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

N. Đurić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

UVOD

Električne i magnetske karakteristike Alučel užadi obično nisu na raspolaganju. Čak ni u katalogima proizvođača Alučel provodnika nema tih podataka, tako da te karakteristike moraju da budu određene merenjima i proračunima. S druge strane, električne i magnetske karakteristike su od suštinskog značaja za ponašanje samih provodnika, kao i celih prenosnih i distributivnih sistema.

Pod pojmom električne karakteristike, podrazumevaju se specifične provodnosti materijala od koga je napravljen aluminijumski plašt i materijala od koga je napravljeno čelično jezgro Alučel užeta. Magnetske karakteristike podrazumevaju permeabilnost materijala čeličnog jezgra, pri čemu je čelik nelinearan feromagnetski materijal, tako da njegova permeabilnost nije konstantna, već je funkcija intenziteta vektora magnetske indukcije. Aluminijum spada u paramagnetske materijale, pa može da se smatra da je njegova permeabilnost približno jednaka permeabilnosti vakuuma ($\mu_r = 1,000021$).

Električne i magnetske karakteristike Alučel užadi su određene kombinacijom merenja i numeričke obrade izmerenih rezultata. Određivanje specifičnih provodnosti materijala nije zahtevalo korišćenje komplikovanog matematičkog aparata, dok su za određivanje permeabilnosti čeličnog jezgra morale da budu primenjene određene procedure numeričke analize.

TEORIJSKE OSNOVE RADA

Poprečni presek realnog Alučel užeta je prikazan na Sl. 1.



Sl. 1. Poprečni presek realnog Alučel užeta.

Podužna otpornost Alučel užeta može vrlo tačno da se izmeri korišćenjem preciznog mernog mosta (1). Takva merenja su obavljena ranije i rezultati merenja, poređeni sa rezultatima proračuna, prikazani su u (2), za 7 različitih standardizovanih Alučel užadi. Specifična provodnost, kako aluminijuma tako i čelika, može da se odredi i iz tih rezultata, ali je, kao precizniji, izabran drugi pristup. Odlučeno je da se Alučel uže rasplete i da se meri podužna otpornost samo jednog aluminijumskog, odnosno, čeličnog provodnika, kružnog poprečnog preseka. Podužna otpornost pravog provodnika, napravljenog od homogenog materijala, konstantnog kružnog poprečnog preseka, definisana je izrazom (3),

$$R_{\Sigma} = \frac{\ell}{\sigma S}, \quad R' = \frac{R_{\Sigma}}{\ell} = \frac{1}{\sigma S} = \frac{4}{\sigma d^2 \pi}, \quad 1)$$

gde je σ specifična provodnost ispitivanog materijala, S površina poprečnog preseka, a d prečnik provodnika.

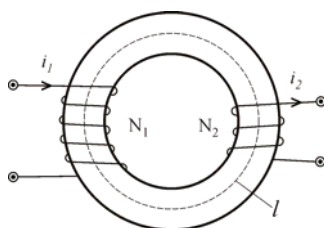
Na osnovu izmerenih vrednosti podužne otpornosti, određuju se specifične provodnosti aluminijuma i čelika,

$$\sigma_{Al} = \frac{4}{R'_{=Al} d_{Al}^2 \pi}, \quad \sigma_{Fe} = \frac{4}{R'_{=Fe} d_{Fe}^2 \pi}. \quad 2)$$

Određivanje magnetskih karakteristika, odnosno, permeabilnosti čelika, je mnogo zahtevniji zadatak. U ovom slučaju su određivane statička i dinamička permeabilnost, kao i srednja vrednost statičke i početna vrednost dinamičke permeabilnosti. Da bi se odredile ove vrednosti, neophodno je napraviti uzorke za merenje histerezisnih krivih, za različite maksimalne vrednosti intenziteta vektora jačine magnetskog polja, H_{max} , u jezgru uzorka. Posle toga se pristupa snimanju histerezisnih krivih, a povezivanjem vrhova histerezisnih krivih se dobija normalna kriva magnećenja. Iz krive magnećenja se računskim putem, dobijaju sve gore pomenute permeabilnosti,

$$\mu_{st} = \frac{B}{H}, \quad \mu_{din} = \frac{dB}{dH}, \quad \mu_{st.sr} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mu_{st_k}, \quad \mu_{din.poc} = \frac{B_1}{H_1}. \quad 3)$$

Uzorci za merenje histerezisa su bili napravljeni od jednog čeličnog provodnika, savijenog u obliku torusa. Da bi permeabilnosti mogle što preciznije da se odrede, napravljena su dva torusna jezgra. Kod prvog su krajevi provodnika zavareni, dok su kod drugog, krajevi posebno obrađeni i spojeni spojnicom. Na tako formirana torusna jezgra, namotana su dva namotaja, tako da je dobijen torusni transformator, prikazan na Sl. 2.



Sl. 2. Torusni transformator sa jezgrom od jednog čeličnog provodnika.

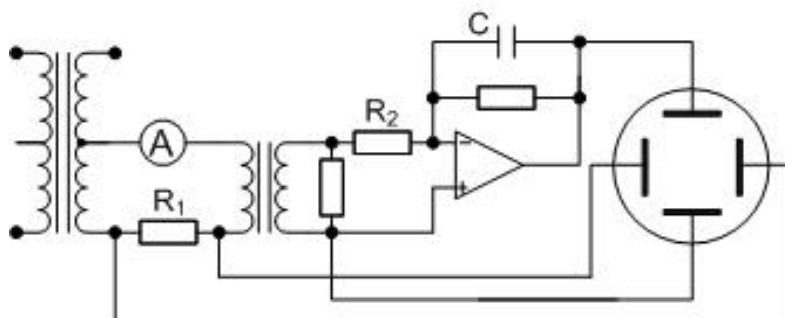
Kod određivanja broja zavojaka primara, pojavio se prvi problem. Jednačina po II Kirhofovom zakonu za posmatrano magnetsko kolo glasi (4),

$$N_1 i_1 = H \ell = \frac{B}{\mu} \ell, \quad (4)$$

gde je N_1 broj zavojaka primara, i_1 vremenski konstantna jačina struje u primarnom namotaju, a ℓ dužina srednje linije (ose) torusnog jezgra. Da bi materijal sigurno dostigao zasićenje, procenjeno je da intenzitet vektora magnetske indukcije treba da bude veći od 1,5T. Kao što može da se vidi iz gornjeg izraza, da bi se odredio potreban broj zavojaka i jačina struje primara, neophodno je poznavanje permeabilnosti materijala, a to je konačan cilj ovog istraživanja. Drugim rečima, neophodno je pretpostaviti neku vrednost permeabilnosti, na osnovu nje odrediti potrebne amperzavojke primara, namotati ih na jezgro, pa izmeriti da li se u jezgru zaista ostvaruje zahtevana vrednost vektora magnetske indukcije. Ukoliko ta vrednost ne može da se dostigne, potrebno je primarnom namotaju dodati još određen broj zavojaka.

Iz izračunatih amperzavojaka, $N_1 i_1$, broj zavojaka primara, N_1 i jačina struje primara, i_1 su određeni na osnovu zahteva korišćene elektronike, da ulazna impedansa transformatora bude u željenom opsegu. Broj zavojaka sekundara određuju performanse merne metode, za merenje napona.

Za snimanje histerezisnih krivih na osciloskopu je korišćena metoda prikazana u (5), (6) i (7), s tim što je, umesto analognog, korišćen elektronski integrator, na bazi operacionog pojačavača. Električna šema za snimanje histerezisnih krivih je prikazana na Sl. 3.



Sl. 3. Šema za snimanje histerezisnih krivih.

Kao što može da se uoči sa Sl. 3, efektivna vrednost jačine prostoperiodične struje primara, koja je, prema izrazu 4), proporcionalna intenzitetu vektora jačine magnetskog polja, H , meri se preciznim ampermetrom. Na horizontalne priključke osciloskopa dovodi se napon na otporniku poznate otpornosti R_1 , koji je proporcionalan jačini struje primara,

$$u_{R1} = R_1 i_1 = k_H H, \quad \text{gde je,} \quad k_H = \frac{R_1 \ell}{N_1}. \quad (5)$$

Napon sa izlaza operacionog pojačavača, povezanog kao elektronski integrator po vremenu,

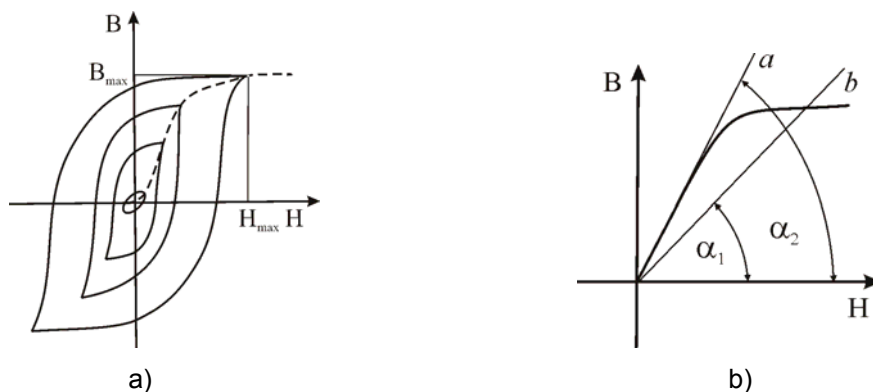
$$u_2 = k_B B, \quad \text{gde je,} \quad k_B = \frac{N_2 S}{R_2 C}, \quad (6)$$

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 indirektno, za svaku histerezisnu petlju, određuju parovi intenziteta vektora H i B ,

$$H = \frac{u_{R1}}{k_H}, \quad B = \frac{u_2}{k_B}. \quad (7)$$

Tipični oblici histerezisnih petlji, za različite jačine struje primara, prikazani su na Sl. 4.a), a normalna kriva magnećenja, kao i prave i uglovi na osnovu kojih se određuju permeabilnosti, dati su na Sl. 4.b).



Sl. 4. Histerezisne petlje a), kriva magnećenja i permeabilnosti b).

Povezivanjem tačaka maksimalnih vrednosti H_{max} i B_{max} , dobija se normalna kriva magnećenja, prikazana isprekidanom linijom na Sl. 4.a)

Iz normalne krive magnećenja mogu da se odrede sve permeabilnosti, definisane izrazom 3). Srednja statička i početna dinamička permeabilnost, izražene preko uglova α_1 i α_2 , su,

$$\mu_{st.sr} = \left(\frac{B}{H} \right)_{sr} = \operatorname{tg} \alpha_1, \quad \mu_{din.poc} = \left(\frac{dB}{dH} \right)_{poc} = \operatorname{tg} \alpha_2. \quad 8)$$

Zbog niskih napona merenih na izlazu 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 numeričkom obradom rezultata.

REZULTATI ISPITIVANJA

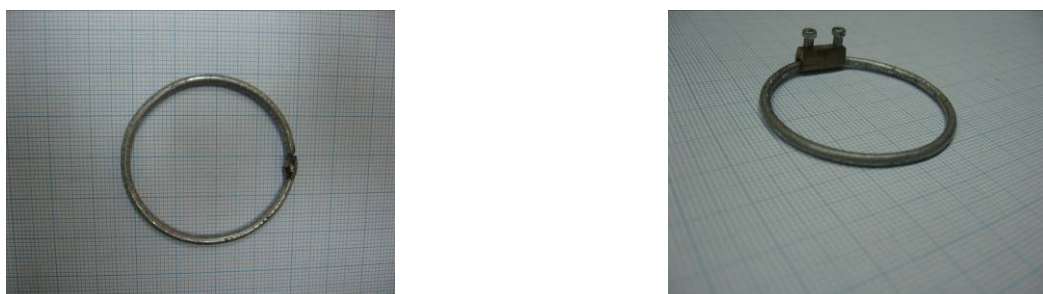
Kao što je rečeno, da bi se izmerila podužna otpornost i preko nje odredila specifična provodnost aluminijuma i čelika, jedno uže, nazivnog preseka $25/4 \text{ mm}^2$, dužine 1,4 m, je bilo raspleteno i time je dobijen aluminijumski provodnik kružnog poprečnog preseka, prečnika 2,25 mm, i jedan čelični provodnik istih dimenzija. Merenje otpornosti provodnika na dužini od tačno 1m je bilo izvršeno u mernoj laboratoriji fabrike kablova „NOVKABEL“ u Novom Sadu, pomoću preciznog mernog mosta „WHEATSTONE AND THOMSON (KELVIN) BRIDGE“, TETTEX A0.

Uz merenje otpornosti uzorka dužine 1 m, izmerena je i temperatura, koja je, za vreme merenja, iznosila $23,2^\circ\text{C}$. Nakon toga je izračunata otpornost pri 20°C .

Koristeći izraz 2), određene su sledeće vrednosti specifičnih provodnosti aluminijuma i čelika,

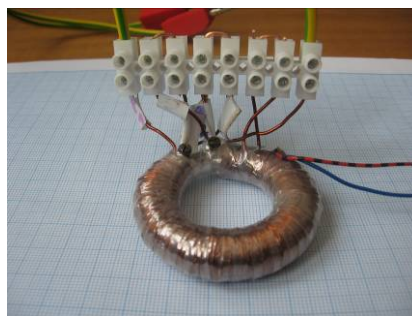
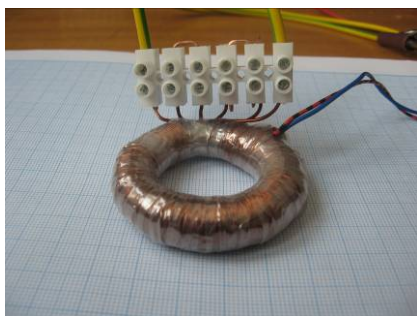
$$\sigma_{Al} = 3.55 \cdot 10^7 \text{ S/m}, \quad \sigma_{Fe} = 0.559 \cdot 10^7 \text{ S/m}.$$

Određivanje permeabilnosti čeličnog materijal je počelo izradom torusnog jezgra, prikazanog na Sl.5.



Sl. 5. Izgled torusnih jezgara, napravljenih na dva načina.

Sledilo je namotavanje torusnih jezgara i izgled gotovih torusnih transformatora je prikazan na Sl. 6.



Sl. 6. Izgled gotovih torusnih transformatora.

Kao što može da se vidi sa Sl. 6, transformatori imaju više otcepa, što je posledica domotavanja objašnjenog ispod Sl. 2.

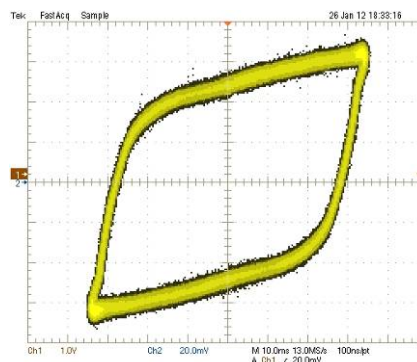
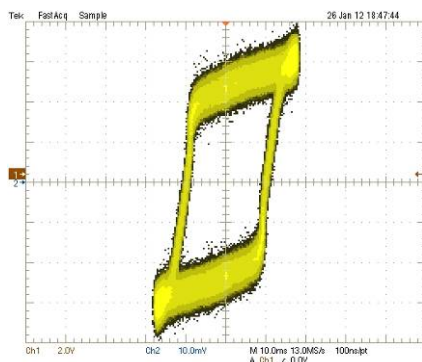
Konačan broj zavoja primara i sekundara je bio,

$$N_1 = 1000 \text{ zav.}$$

$$N_2 = 347 \text{ zav.}$$

Snimanja histerezisnih petlji 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, a snimanja su vršena na osciloskopu TEKTRONIX TDS 5032 Digital Phosphor Oscilloscope. Vrednosti elemenata označenih na Sl. 3 su, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 15k\Omega$ i $C = 2\mu F$. Izlazni naponi na integratoru su izmereni korišćenjem multimetra VOLCRAFT VC 150.

Primer izgleda histerezisnih petlji na ekranu digitalnog fosforog osciloskopa, za oba ispitivana uzorka, pri jačini struje primara, $I_1 = 1A$, prikazan je na Sl. 7.

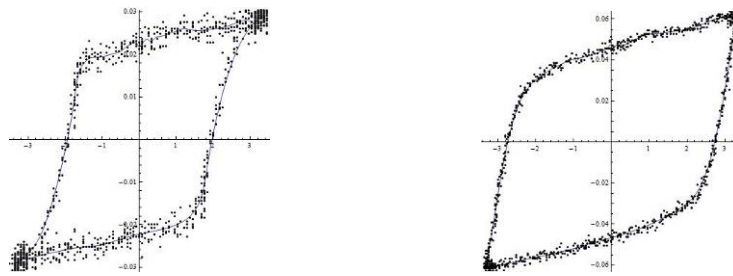


Sl. 7. Prikaz primera histerezisnih petlji na osciloskopu.

Kao što može da se vidi sa Sl. 7, histerezisne petlje su dosta razmazane, što je posledica šuma, odnosno, prisutnih, nepoznatih spoljnjih elektromagnetskih polja. Na levom prikazu Sl. 9 može da se primeti i dodatna izobličenost histerezisne petlje, što je posledica promene strukture materijala prilikom zavarivanja.

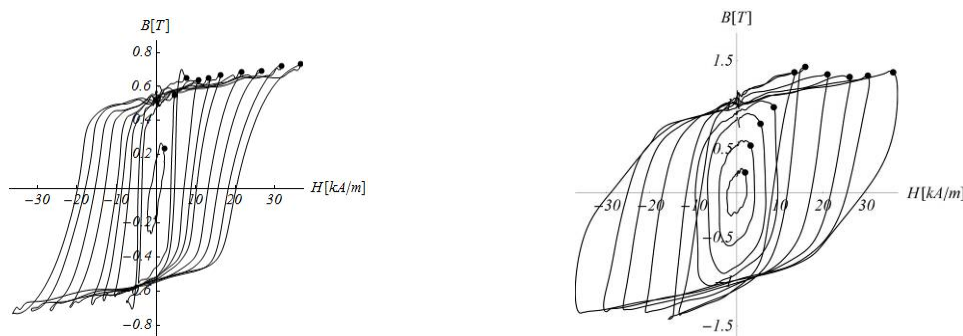
Zbog takvog oblika histerezisnih petlji, vrh histerezisa (H_{max} , B_{max}) nije jednoznačno definisan, pa je određivanje normalne krive magnećenja zahtevalo dodatnu matematičku obradu snimljenih histerezisnih krivih. Snimljene histerezisne krive su fitovane kubnim interpolacionim splajnom i to posebno gornji deo krive, a posebno donji, jer dvoznačna kriva, kao što je histerezisna kriva, ne može da se fituje.

Primer rezultata snimanja histerezisne krive (prikazano tačkicama) i fitovane krive, prikazane punom linijom, dat je na Sl. 8, za obe varijante čeličnog jezgra, pri jačini struje primara, $I_1 = 1A$.



Sl. 8. Rezultati merenja (tačkice) i fitovana histeresisna kriva (puna linija).

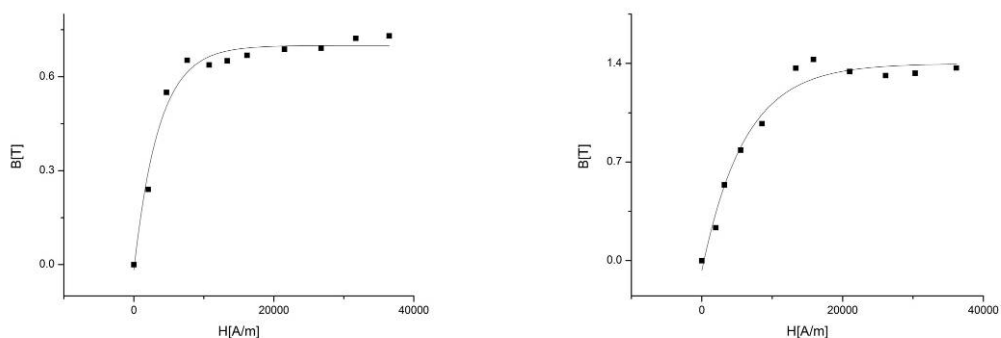
Na osnovu fitovanih histeresisnih petlji, dobijene su familije histeresisnih krivih, za različite jačine struje primara, prikazane, za oba uzorka, na Sl. 9.



Sl. 9. Familije histeresisnih petlji i tačke koje pripadaju normalnoj krivoj magnećenja.

Na istoj slici su prikazane i tačke vrhova histeresisnih petlji, određene iz uslova da je, za svaku histeresisnu petlju, proizvod $H_{\max} \cdot B_{\max}$ maksimalan.

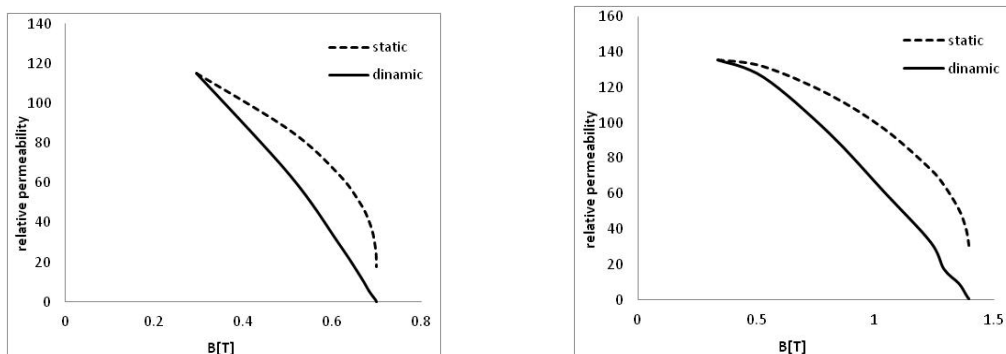
Da bi se kriva magnećenja dobila kao glatka kriva, vrednosti prikazane tačkama na Sl. 9 su morale takođe da budu fitovane i to fitovanje je ponovo urađeno kubnim interpolacionim splajnom. Prikaz fitovanih krivih magnećenja za oba uzorka je dat na Sl. 10.



Sl. 10. Normalne krive magnećenja oba uzorka – fitovanje kroz određene tačke.

Iz normalne krive magnećenja se određuju statička i dinamička permeabilnost, kao funkcije intenziteta vektora magnetske indukcije, B . Pomoću izraza 3), određuju se i srednja statička permeabilnost i početna dinamička permeabilnost, kao i odgovarajuće relativne permeabilnosti.

Izgled funkcijske zavisnosti permeabilnosti od intenziteta vektora magnetske indukcije, prikazane su na Sl. 11, a izračunate vrednosti srednje statičke relativne permeabilnosti i početne dinamičke relativne permeabilnosti, date su u Tabeli 1.



Sl. 11. Normalne krive magnećenja oba uzorka.

TABELA 1 – RELATIVNE PERMEABILNOSTI ISPITIVANIH UZORAKA

	$\mu_{st.sr.rel}$	$\mu_{din.poc.rel}$
Torusno jezgro zavareno	46,90	114,95
Torusno jezgro sa spojnicom	77,94	135,67

Prema očekivanjima, početne vrednosti relativnih permeabilnosti su dosta veće od srednjih vrednosti relativnih statičkih permeabilnosti. Obzirom da je u praksi čelično jezgro daleko od zasićenja, te početne vrednosti su najmerodavnije za proračune elektromagnetskih polja i strujne raspodele unutar Alučel provodnika.

Osim toga, upravo zbog malih vrednosti relativnih permeabilnosti, nelinearnost čeličnog jezgra može da se zanemari i da se čelik tretira kao linearan, homogen materijal konstantne permeabilnosti, te, zahvaljujući tome, u proračunima može da se koristi kompleksna notacija.

ZAKLJUČAK

Električne i magnetske karakteristike (specifična provodnost i permeabilnost) nekog materijala mogu da se odrede merenjima i matematičkom obradom mernih rezultata.

Određivanje specifične provodnosti materijala je relativno lak zadatak, ukoliko postoji odgovarajuća, kvalitetna merna oprema. Matematička obrada mernih rezultata nije neophodna, odnosno, vrlo jednostavnim računom se dolazi do traženih vrednosti.

Merenje permeabilnosti nelinearnog, feromagnetskog materijala je zahtevalo mnogo više sredstava i vremena. Za ta merenja je prvo trebalo napraviti odgovarajuće uzorke, a zatim i osmisлити mernu opremu, izvršiti odgovarajuća merenja i na kraju merne rezultate dodatno obraditi postupcima numeričke analize. Problemi koji su nastupili tokom merenja, opisani u ovom radu, su uspešno rešavani i rešenja su takođe prikazana u ovom radu. Kao rezultat prikazanih istraživanja, dobijene su funkcijske zavisnosti permeabilnosti čelika od koga je napravljeno jezgro Alučel užeta, od intenziteta vektora magnetske indukcije i time je omogućeno tačnije određivanje ponašanja takvih užadi u praksi. Izračunate električne i magnetske karakteristike Alučel užeta omogućavaju precizno određivanje, kako raspodele struje po poprečnom preseku užeta, tako i elektromagnetsko polje koje takvo uže stvara u svojoj neposrednoj okolini.

Sledeći korak u ovim istraživanjima će biti određivanje frekvencijske zavisnosti izračunatih električnih i magnetskih karakteristika Alučel užeta, što će biti značajno za istraživanje ponašanja užeta u prisustvu viših harmonika u mreži.

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 iz fabrike kablova „NOVKABEL“ iz Novog Sada i kolegama sa Katedre za električna merenja, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, za svesrdnu pomoć pri obavljanju prikazanih merenja.

LITERATURA

1. Bego V, 1981, "Mjerenja u elektrotehnici", 5. dopunjeno izdanje, "Tehnička knjiga", Zagreb, str. 391.
2. Kasaš-Lažetić K, Prša M, Bajović V, Vukobratović B, 2011, "Determination of ACSR's Electrical Characteristics", 10th International Conference on Applied Electromagnetics, ПЕC 2011, Niš, Serbia, Session O2 03.
3. Popović B D, 2000, "Elektromagnetika", "Gradjevinska knjiga", Beograd, str. 176.
4. Popović B D, 1981, "Osnovi elektrotehnike 2", drugo izdanje, "Gradjevinska knjiga", Beograd, str. 100-129.
5. Bego V, 1981, "Mjerenja u elektrotehnici", 5. dopunjeno izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, str. 465-466.
6. Polik Z, Kuczmann M, 2008, "Measuring and Control the Hysteresis Loop by Using Analog and Digital Integrators", Journal of optoelectronics and advanced materials, vol. 10, No7, str. 1861–1865.
7. Anderson J, Blotzer R, 1999, Permeability and Hysteresis Measurement, The Measurement, Instrumentation and Sensors, Handbook, Chapter VII/49, Boca Raton, FL, USA: CRC Pres with IEEE Press, str. 49-57.

¹Email: kkasas@uns.ac.rs, ²Email: prsa@uns.ac.rs, ³Email: vuletic@uns.ac.rs, ⁴Email : ndjuric@uns.ac.rs