

Simulacija rada elektromagneta sa „E – I“ jezgrom

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

Sažetak—Program kojim je rešavan problem prikazan u ovom radu je razvijen za određivanje magnetskih polja posebnih struktura, ali je u ovom slučaju, zbog predviđenog iterativnog postupka, korišćen da bi se ispitala mogućnost rešavanja nelinearnih problema. Zbog toga je koncipiran elektromagnet na nelinearnom „E-I“ transformatorskom jezgri, pri čemu je namotaj elektromagneta bio postavljen na paket „E“ limova, a kotvu je predstavljao paket „I“ limova. Prvobitna kriva magnetčenja materijala od koga su napravljeni limovi je snimljena pomoću balističkog galvanometra. Korišćenjem programa razvijenog na bazi metode konačnih elemenata (MKE) i iterativnog postupka, određeno je magnetsko polje u feromagnetskom jezgri i van njega, a zatim je, na osnovu tih rezultata, određena sila koja deluje na kotvu, pri različitim rastojanjima kotve od jezgra. Rezultati proračuna su verifikovani merenjima i cela istraživanja su opisana u ovom radu.

Gljučne riječi—nelinearan elektromagnet; iterativni postupak; MKE; računanje sile;

I. UVOD

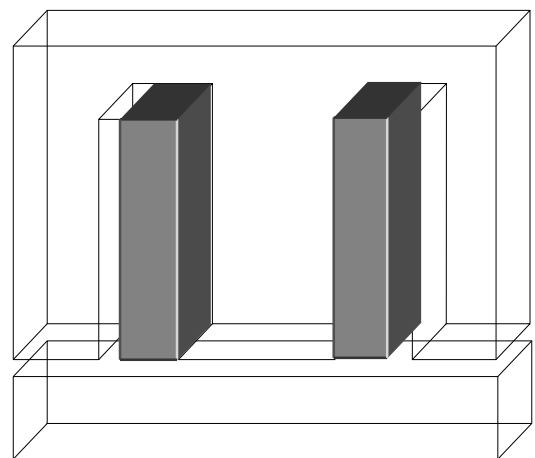
Da bi se ispitala mogućnost rešavanja nelinearnih problema, programom nazvanim ITMP (ITerativni pristup računanju Magnetskog Polja) koji je razvijen za određivanje magnetskog polja ciklično ponavljajućih se struktura i prikazan u [1], koncipiran je elektromagnet u obliku namotaja na realnom, nelinearnom „EI“ jezgri, pri čemu „I“ deo jezgra čini kotvu elektromagneta.

Osnovni parametar elektromagneta, kao elektromehaničkog pretvarača koji pretvara električnu energiju u mehaničku, je intezitet sile koja deluje na kotvu, pa je krajnji cilj ovog rada određivanje te sile. Da bi se odredila sila, neophodno je odrediti magnetsko polje u elektromagnetu i ispitati uticaj svih parametara sistema. Parametri sistema koji utiču na proračun i na konačan rezultat su: jačina struje kroz pobudne namotaje elektromagneta, rastojanje između jezgra elektromagneta i kotve, kao i još neke karakteristike, koje ostaju konstantne.

Dakle, korišćenjem iterativne 2D metode konačnih elemenata za određivanje vremenski konstantnog magnetskog polja [1], određeno je prvo magnetsko polje elektromagneta sa jezgrom od nelinearnog feromagnetskog materijala, u svim tačkama posmatranog domena, za različite vrednosti parametara koji variraju. Na osnovu dobijenih rezultata je, zatim, određena sila kojom elektromagnet deluje na kotvu, izvršena eksperimentalna provera dobijenih rezultata, i pokazana zavisnost te sile od veličina koje su varirane.

II. TEORIJSKA OSNOVA RADA

Oblik elektromagneta i kotve, koji se posmatraju u ovom radu, prikazani su na Sl. 1, gde osenčen deo prostora predstavlja namotaj elektromagneta, a druga dva dela su jezgro elektromagneta i kotva.



Slika 1. Prikaz modela posmatranog elektromagneta

Prvi korak u rešavanju problema je određivanje magnetskog polja u posmatranom domenu, za određenu pobudu i poznate granične uslove. Magnetsko polje, prikazano vektorom magnetske indukcije \vec{B} , određuje se preko magnetskog vektor potencijala \vec{A} , koji, u ovom slučaju, zadovoljava diferencijalnu jednačinu preuzetu iz [2],

$$\text{rot}(\text{rot}\vec{A}) = \mu\vec{J}, \quad (1)$$

gde je \vec{J} vektor gustine struje u namotajima elektromagneta. Iz tako određenog magnetskog vektor potencijala se vektor magnetske indukcije određuje pomoću izraza,

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}. \quad (2)$$

Prema osnovnim postavkama metode konačnih elemenata (MKE) prikazanim u [3] - [5], funkcional koji treba minimizovati

vati proporcionalan je energiji sadržanoj u magnetskom polju elektromagneta i dat je izrazom,

$$F = \int_V \left(\frac{1}{2\mu} |\text{rot} \vec{A}|^2 - \vec{J} \cdot \vec{A} \right) dv . \quad (3)$$

Jednačine (1) i (2) se rešavaju numeričkim putem, a rešenje je predstavljeno kao matrica kolona vrednosti intenziteta magnetskog vektor potencijala, \vec{A} , odnosno, matrica kolona vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije \vec{B} u određenim tačkama, tačnije rečeno u konačnim elementima posmatranog domena.

Na osnovu dobijenih vrednosti vektora magnetske indukcije \vec{B} , određuje se sila kojom magnetsko polje jarma deluje na kotvu. Za izračunavanje te sile korišćice se metoda izračunavanja sile preko pritiska, data u [2],

$$p = \frac{1}{2} (\mu_2 - \mu_1) \left(H_t^2 + \frac{B_n^2}{\mu_1 \mu_2} \right) . \quad (4)$$

pri čemu je p pritisak na razdvojnoj površi dve sredine (referentni smer pritiska je od sredine 2 ka sredini 1), μ_1 i μ_2 su permeabilnosti sredina 1 i 2, H_t je tangencijalna komponenta vektora jačine magnetskog polja, a B_n je normalna komponenta vektora magnetske indukcije, na zatvorenoj površi koja obuhvata kotvu elektromagneta.

Kada se odredi pritisak u svim tačkama zatvorene površi koja obuhvata kotvu elektromagneta, rezultanta sila na kotvu je izražena jednakošću,

$$\vec{F}_{rez} = \iint_S p d\vec{S} . \quad (5)$$

U konkretnom problemu, zatvorena površ S je postavljena po spoljnoj strani kotve, odnosno, nalazi se u vazduhu, uz samu površ kotve, a smer normale okrenut je iz površi. Za tako postavljenu površ S vrednosti permeabilnosti sredina su:

$$\mu_1 = \mu_0 \quad \text{i} \quad \mu_2 = \mu_{Fe} . \quad (6)$$

Uzimajući u obzir jednakosti (6), kao i činjenicu da je permeabilnost feromagnetskog materijala uvek mnogo veća od permeabilnosti vakuuma, linije oba vektora polja iz (4) su praktično normalne na površ feromagnetika. To znači da tangencijalna komponenta vektora jačine magnetskog polja može da se zanemari, pa jednačina (4) dobija približno sledeći oblik:

$$p \approx \frac{1}{2} \frac{B_n^2}{\mu_0} , \quad (7)$$

a konačan oblik izraza za rezultantnu silu je,

$$\vec{F}_{rez} = \iint_S \frac{1}{2} \frac{B_n^2}{\mu_0} \cdot d\vec{S} . \quad (8)$$

Rezultati dobijeni računskim putem će biti upoređeni sa rezultatima merenja sile, čime će se dobiti prava potvrda ispravnosti numeričke metode.

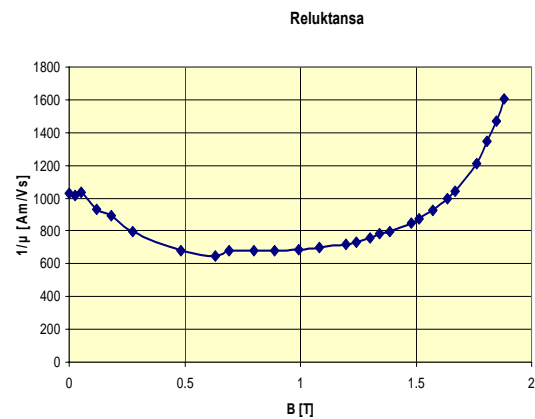
III. ODREĐIVANJE PRVOBITNE KRIVE MAGNEĆENJA FEROMAGNETSKOG MATERIJALA

Da bi mogao da se ispita realan problem, na konstruisanom elektromagnetu je određena prvobitna kriva magnećenja. Na postojeći namotaj elektromagneta je dodat merni namotaj sa 20 zavojaka izolovane žice. Kriva magnećenja je merena pomoću balističkog galvanometra, prema postupku opisanom u [6], kao „Balistička metoda sa prstenastim uzorkom“, korišćenjem opreme i načina merenja, koji su opisani u [7].

Merenje je bilo izvršeno za 27 strujnih inkremenata, a kao rezultat je prikazana reluktansa korišćenog materijala, u funkciji intenziteta vektora magnetske indukcije,

$$\nu \left(|\vec{B}| \right) = \frac{1}{\mu \left(|\vec{B}| \right)} . \quad (9)$$

Grafički prikaz te zavisnosti je dat na Sl. 2.



Slika 2. Zavisnost reluktanse od intenziteta vektora \vec{B}

IV. PARAMETRI POSMATRANOG MODELA

Model koji je proučavan, prikazan je na Sl. 1, a parametri tog modela su:

- Tip lima – oznaka jezgra: EI-5,
- Poprečni presek jezgra u sredini: $28 \times 28 \text{ mm}^2$,
- Poprečni presek jezgra u ostalim delovima: $28 \times 14 \text{ mm}^2$,
- Broj zavojaka: 50,
- Prečnik provodnika pobudnog namotaja: 1,9 mm.

Razmatrane vrednosti jačine pobudne struje, I , su: 2 A, 4 A, 5 A, 8 A i 10 A, a posmatrane veličine vazdušnog procepa (rastojanje d) su: 0 mm; 0,3 mm; 0,6 mm; 0,9 mm i 1,2 mm.

V. NUMERIČKO ODREĐIVANJE MAGNETSKOG POLJA

Iterativna 2D metoda konačnih elemenata predstavlja numeričku metodu koja spada u grupu približnih metoda za rešavanje vremenski konstantnog magnetskog polja i danas je, verovatno, najčešće korišćena metoda. Uopšte, numeričke metode se koriste kod problema gde imamo zadatu strujnu raspodelu u nehomogenoj sredini ili probleme sa realnim nelinearnim feromagnetima, kod kojih je do rešenja teško ili nemoguće doći analitičkim metodama. U našem slučaju imamo zadatu strujnu raspodelu sa realnim nelinearnim feromagnetikom, što za rešavanje zahteva primenu jedne od numeričkih metoda sa iterativnim postupkom.

Kao što je prikazano u [1], nad dvodimenzionalnim domenom u kome se određuje magnetsko polje, formira se mreža konačnih elemenata, tako da je mreža, u delovima domena gde su prostorne promene polja izraženije, mnogo gušća nego u perifernim delovima. U tačkama presecanja postavljene mreže konačnih elemenata, određuju se vrednosti magnetskog vektor potencijala, a vektor gustine struje i magnetski vektor potencijal su normalni na ravan u kome se definiše problem.

Iz uslova minimizacije funkcionala (3), dobija se matricna jednačina, koja, u i -toj iteraciji, ima oblik,

$$[C]^{(i)} \cdot [A]^{(i+1)} = [b]^{(i)}, \quad (10)$$

gde je:

- $[C]^{(i)}$ globalna matrica sistema sa vrednostima u i -toj iteraciji,
- $[A]^{(i+1)}$ vektor intenziteta magnetskog vektor potencijala, koji se određuje u $(i+1)$ -oj iteraciji,
- $[b]^{(i)}$ vektor poznatih vrednosti u i -toj iteraciji (pobuda i granični uslovi).

Iterativni postupak se odvija na sledeći način: iz vektora intenziteta magnetskog vektor potencijala se, po jednačini (2) koja se rešava numeričkim putem, dobije vrednost intenziteta vektora magnetske indukcije, u svakom konačnom elementu. Na osnovu snimljene krive zavisnosti reluktanse feromagnetskog materijala od intenziteta vektora magnetske indukcije, $\nu=f(B)$ i izračunate vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, izračunavaju se nove vrednosti reluktanse u svakom od konačnih elemenata. Uvrštavanjem te nove vrednosti, formira se globalna matrica sistema i vektor pobude i graničnih uslova za sledeću iteraciju,

$$[A]^{(i+1)} \rightarrow [B]^{(i+1)} \rightarrow [\nu]^{(i+1)} \rightarrow [C]^{(i+1)}, [b]^{(i+1)}. \quad (11)$$

U gornjem izrazu je:

- $[B]^{(i+1)}$ vektor intenziteta vektora magnetske indukcije, određen u $(i+1)$ -oj iteraciji,

- $[\nu]^{(i+1)}$ vektor izračunatih vrednosti reluktanse u $(i+1)$ -oj iteraciji.

Kriterijum konvergencije je isti kao što je definisan u [1],

$$\delta^{(i)} = \left| \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k^{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k^{(i-1)}}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k^{(i)}} \right| < \delta_{zad}, \quad (12)$$

gde je:

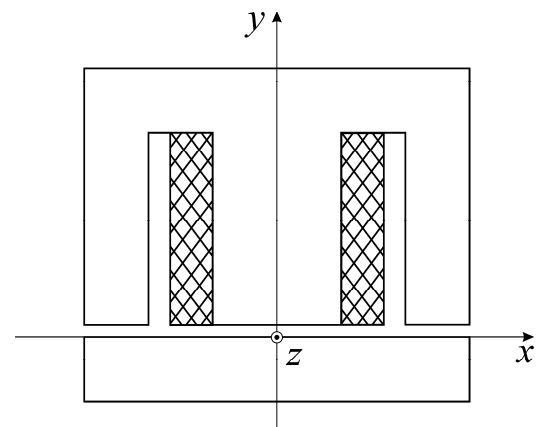
- $[A_k]^{(i)}$ vrednost intenziteta magnetskog vektor potencijala u elementu k , u i -toj iteraciji,
- $[A_k]^{(i-1)}$ vrednost intenziteta magnetskog vektor potencijala u elementu k , u $(i-1)$ -toj iteraciji,
- N ukupan broj konačnih elemenata,
- δ relativna razlika između dve sukcesivne iteracije.

Raspored i broj konačnih elemenata je konstantan u svim oblastima osim u procepu d , gde je različit za različite veličine procepa, kao što je prikazano u Tabeli I.

TABELA I. BROJ KONAČNIH ELEMANATA

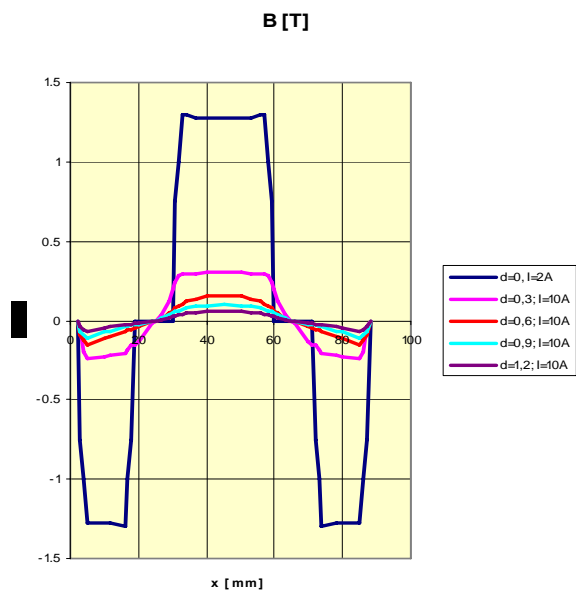
d [mm]	0	0,3; 0,6	0,9; 1,2
Broj konačnih elemenata u procepu	-	168	336
Ukupan broj konačnih elemenata	1232	1400	1568

Ako se Dekartov koordinatni sistem postavi kao što je skicirano na Sl. 3, vektor magnetske indukcije ima samo y komponentu i menja se duž x ose.



Slika 3. Skica postavljjanja koordinatnog sistema

Promena izračunatog intenziteta vektora magnetske indukcije, u zavisnosti od x koordinate, je prikazana na Sl. 4. Na toj slici su, kao parametri, prikazani jačina pobudne struje i veličina procepa između jarma i kotve elektromagneta.



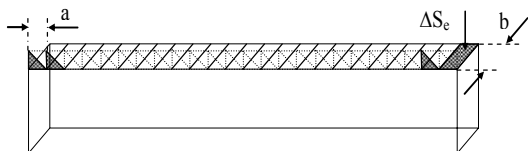
Slika 4. Dijagram promena intenziteta vektora \vec{B}

VI. NUMERIČKO ODREĐIVANJE SILE

U analitičkoj formulaciji problema dat je konačan oblik jednačine za izračunavanje intenziteta sile kojom jaram elektromagneta deluje na kotvu (5). Kod numeričkog oblika jednačine (5), integral mora da bude zamenjen sumom, diferencijalna površ dS konačno malom površi ΔS_e , a vrednost normalne komponente vektora magnetske indukcije, posmatrano u odnosu na površ kotve, je diskretan niz vrednosti. Pri tome svaka vrednost odgovara jednom konačnom elementu koji se oslanja na površ ΔS_e , i smatra se da je ona konstantna, tako da je rezultantna sila,

$$F_{rez} = \frac{\Delta S_e}{2} \nu_0 \sum_{n=0}^{23} B_{285+2n}^2, \quad (12)$$

pri čemu su raspored i oblik konačnih elemenata i elementarnih površi na kotvi, prikazani na Sl. 5.

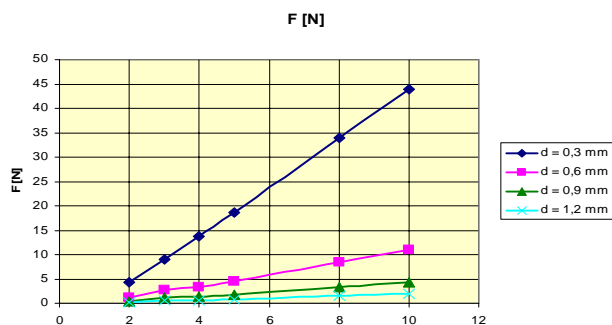


Slika 5. Raspored i oblik konačnih elemenata i elementarnih površi na gornjoj površi kotve

Pojedine veličine u izrazu (12) su:

- F_{rez} – rezultantna sila na kotvu elektromagneta,
- ΔS_e – makroskopski mala površ elementa,
- ν_0 – reluktansa vazduha,
- B_i – intenzitet vektora magnetske indukcije u i-tom elementu na gornjoj površi kotve.

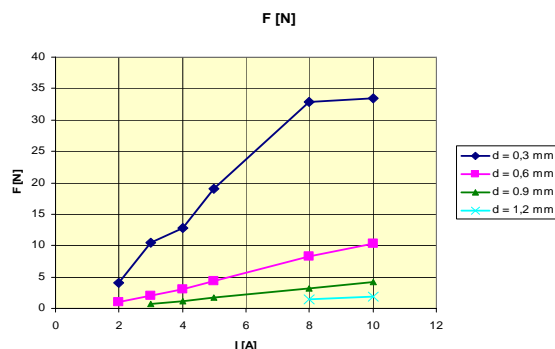
Na osnovu prethodno izloženog i koristeći prethodno izračunate parove vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije i odgovarajućih vrednosti reluktanse, za svaki konačni element u mreži, dobijene su rezultantne vrednosti intenziteta sile, prikazane na Sl. 6.



Slika 6. Zavisnost intenziteta računate sile od jačine pobudne struje, za različite vrednosti procepa

Radi provere razvijene metode, izvršena su merenja intenziteta sile i upoređena sa izračunatim rezultatima, za uslove koji su definisani u programu. Zbog same konstrukcije elektromagneta, neko precizno merenje nije bilo moguće, odnosno, izvršeno je samo grubo merenje intenziteta sile.

Merenje je vršeno tako što se, na osnovu izračunatih rezultata, odredila vrednost intenziteta sile, a zatim je vršena provera da li je intenzitet sile kojom smo delovali na kotvu veći od intenziteta sile kojom elektromagnet drži kotvu. Dalje je ta sila povećavana do momenta kada se kotva odvoji od elektromagneta. Vrednost intenziteta sile u slučajevima kada kalem ne drži kotvu nije merena, kao ni vrednosti sile od preko 1000N, a ostali rezultati merenja su prikazani grafički na Sl. 7.



Slika 7. Zavisnost intenziteta izmerene sile od jačine pobudne struje, za različite vrednosti procepa

Upoređivanjem Sl. 6 i 7, može da se ustanovi veoma dobro poklapanje računatih i merenih vrednosti sile.

Iz linearnosti dobijenih krivih može da se zaključi da feromagnetsko jezgro elektromagneta ni u jednom od prikazanih slučajeva, kada postoji procep, ne ulazi u zasićenje.

Problemi vezani za konvergenciju iterativnog procesa su detaljno izloženi u [1], a broj iteracija potrebnih da se dostigne zadana tačnost je varirao od 31, za najveći vazdušni procep, $d = 1,2$ mm, pri jačini struje, $I = 10$ A, do 3805 za situaciju bez procepa, pri jačini struje $I = 10$ A, kada jezgro ulazi u zasićenje i ceo sistem postaje izrazito nelinearan.

VII. ZAKLJUČAK

Princip računanja magnetskog polja u nelinearnom materijalu, prikazan u ovom radu, je dobro poznat svim poznavateljima primenjene elektromagnetike. Ono što je u ovom radu drugačije u odnosu na prethodne radove, je primena programskog paketa razvijenog za rešavanje problema druge prirode, za situacije kada se određena geometrijska struktura ciklično ponavlja u prostoru. U radu je pokazano da taj isti program, bez ikakvih izmena, omogućava uspešno određivanje magnetskog polja i u nelinearnim situacijama. Numerički proračun, sproveden do kraja postupka, dao je dovoljno tačne vrednosti intenziteta sile koja deluje na kotvu elektromagneta. Time je dobijen još jedan aparat za proračun i konstrukciju elektromagneta na realnom, nelinearnom feromagnetskom jezgrou, bilo kakvog oblika.

Novost u ovom radu je i verifikacija izračunatih rezultata. Da bi se primena razvijene metode na rešavanje nelinearnih problema potvrdila u praksi, izvršena su i merenja intenziteta sile. Iako su izvršena merenja dala samo približne rezultate, može se primetiti da rezultati dobijeni eksperimentalno u većini tačaka podržavaju rezultate koji su dobijeni numerički, što je još jedna potvrda tačnosti njihovog određivanja primenom predložene metode i predloženog iterativnog postupka.

ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektima broj TR32055 i TR32019, finansiranim od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, 2011-2016.

LITERATURA

- [1] K. Kasaš-Lažetić, Dejana Herceg, Nikola Mučalica, Miroslav Prša, „Razvoj programa za određivanje magnetskih polja posebnih struktura“, rad prihvaćen na XV Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infoteh-Jahorina 2016, Jahorina, 16-18. mart 2016. godine
- [2] B. Popović, „Elektromagnetika“, Beograd: Građevinska knjiga, pp. 213-215, 1986.
- [3] M. V. K. Chari and P. Silvester, “Finite Element Analysis and Magnetically Saturated DC Machines”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No 2, pp. 454-464, March-April 1971.
- [4] R. Palanisamy and W. Lord, “Finite Element Modeling of Electromagnetic NDT Phenomena”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. MAG-15, No 6, pp. 1474-1481, November 1979. K. Elissa, “Title of paper if known,” unpublished.
- [5] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, “Finite Elements for Electrical Engineers”, Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
- [6] Dr. ing. Vojislav Bego: *Mjerenja u elektrotehnici*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1981.
- [7] K. Kasaš-Lažetić, D. Herceg, A. Požnić, I. Župunski and M. Prša: “Some experiences in initial magnetization curve measurement”, ПЕС 2015, Niš, Serbia, Aug. 31 – Sep. 2, 2015. Session O2 05 pp. 1-4. ISBN 978-86-6125-145-0

ABSTRACT

The computer program applied for solution of the problem presented in this paper is developed for determination of magnetic field inside special magnetic structures. Nevertheless, in this case, because of its iterative procedure, the program is applied to investigate the possibility to solve nonlinear problems. For this reason electromagnet on nonlinear “E-I” transformer core was considered, with “E” part acting as a yoke and “I” part as an armature. The initial magnetization curve of applied ferromagnetic material is determined using ballistic galvanometer method. Applying developed program, based on Finite Elements Method (FEM) and an iterative procedure for nonlinear problems, magnetic field inside and outside ferromagnetic core was determined. After that, using those results, a force on armature, with different air gap values was calculated. The calculation results were verified by measurements and the entire investigation is described in this paper.

SIMULATION OF ELECTROMAGNET WITH „E – I“ CORE OPERATION

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