

Gubici snage u torusnom jezgru od feromagnetskog lima za slučaj magnetske indukcije oblika segmentisane sinusoide

Srđan Divac, Branko Koprivica, Alenka Milovanović, Milan Plazinić

Apstrakt— Cilj ovog rada je prikaz vremenskog oblika snage magnećenja uzorka od feromagnetskog lima pri kontrolisanom obliku magnetske indukcije oblika segmentisane sinusoide, sačinjene od linearnih delova. U radu su prikazana poređenja vremenskih oblika magnetskog polja, magnetske indukcije i snage magnećenja. Analizirana je promena snage u vremenu sa brzinom promene magnetske indukcije. Takođe, analizirana je promena vrednosti snage gubitaka sa promenom broja segmenata razmatrane sinusoide. U radu je data odgovarajuća diskusija rezultata.

Ključne reči—Specifični gubici snage; Magnetski histerezis; Segmentisana sinusoida; Torusno jezgro; LabVIEW.

I. UVOD

Savremena pretvaračka elektronika postiže visoke snage kada se primenjuju višestepene konfiguracije [1]. Višestepeni invertori su našli veliku primenu u industriji u pogonima električnih mašina i kod DC/DC pretvarača [1-3]. Poznavanje njihovih karakteristika i principa rada je ključno za postizanje visokih performansi i pouzdane kontrole. U tom smislu, gubici snage u jezgru mašine ili transformatora su od velikog značaja i oni su detaljno analizirani u literaturi [4, 5].

Kao što je pokazano u literaturi, naponi koji se javljaju u radu višestepenih invertora imaju približno stepenast oblik, sa ili bez dodatne PWM modulacije [4, 5]. Pri tome, magnetska indukcija u jezgru ima periodičan oblik sačinjen od linearnih segmenata. Broj linearnih segmenata zavisi od stepena invertora. Takođe, trenutna vrednost snage magnećenja sadrži skokovite promene, što nije detaljno analizirano u literaturi.

U cilju boljeg razumevanja vremenskog oblika magnetskog polja i indukcije, kao i specifične snage magnećenja, izvršena su merenja sa torusnim uzorkom od feromagnetskog lima u slučajevima kada pobudni napon ima oblik napona invertora drugog, trećeg i petog stepena. Kako bi se bolje uočile

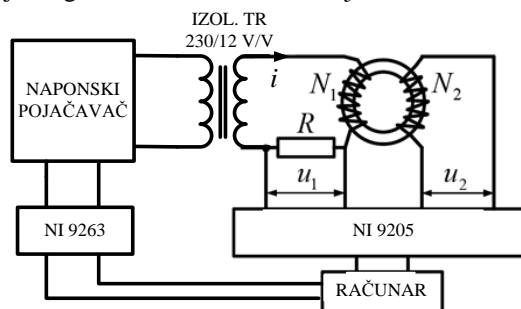
promene koje pojedini stepeni izazivaju, razmatran je slučaj kada su sastavni delovi pobudnog napona različite visine, što nije slučaj kod postojećih invertora. Za razliku od sličnih ispitivanja sprovedenih u [5], u ovome radu nije razmatran slučaj invertora sa dodatnom PWM modulacijom, odnosno razmatran je slučaj ravnog izlaznog napona invertora.

Merenja su izvršena primenom metode bazirane na personalnom računaru i akviziciji signala [6]. Ista su sprovedena pri kontrolisanom obliku magnetske indukcije za slučajeve kada je ona sačinjena od linearnih segmenata, sa $n=1$ (trougao), $n=2$, $n=3$ i $n=250$ (sinusoida) delova. Podaci prikupljeni pomoću akvizicije obrađeni su pomoću aplikacije napisane u LabVIEW programskom paketu.

Analiza rezultata merenja, navedena u trećem delu ovoga rada, obuhvata analizu i poređenje vremenskog oblika magnetskog polja, magnetske indukcije i specifične snage magnećenja torusnog jezgra za različite oblike magnetske indukcije. Detaljna analiza je sprovedena sa stanovišta zavisnosti dinamičkog procesa magnećenja od nagiba posmatranog segmenta magnetske indukcije, odnosno od brzine promene magnetske indukcije u vremenu, što je analizirano u literaturi za slučaj dva linearna segmenta [7]. Dodatno, analizirana je promena vrednosti snage gubitaka sa brojem segmenata i izvršeno je fitovanje te promene pomoću eksponencijalne funkcije. Na kraju rada su dati odgovarajući zaključci.

II. MERNI METODA I APARATURA

Za dobijanje rezultata prikazanih u ovom radu primenjena je metoda merenja magnetskog polja i indukcije bazirane na personalnom računaru i akviziciji [6]. Merenja su sprovedena sa torusnim uzorkom od feromagnetskog lima. Na Sl. 1 prikazana je blok šema merno-akvizicionog sistema za merenje magnetskih veličina od značaja.



Sl. 1. Blok šema merno-akvizicionog sistema za merenje magnetskih karakteristika.

Srđan Divac – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija, (e-mail: divacsrdjan@gmail.com) – Stipendista Ministarstva.

Branko Koprivica – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija, (e-mail: branko.koprivica@ftn.kg.ac.rs).

Alenka Milovanović – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija, (e-mail: alenka.milovanovic@ftn.kg.ac.rs).

Milan Plazinić – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija, (e-mail: milan.plazinic@ftn.kg.ac.rs).

Aparatura se sastoji od: izvora naizmeničnog napona, šant otpornika od $R=0.5 \Omega$, torusnog uzorka od feromagnetskog lima, akvizicionih kartica za generisanje i prikupljanje podataka i računara. Takođe, sastavni deo ove aparature čini i LabVIEW aplikacija za magnetska merenja pomoću koje se prikupljeni podaci obrađuju i čuvaju u memoriji računara.

Izvor pobudnog napona čine: akviziciona kartica NI 9263 koja stvara naponski signal, pojačavač napona GWINSTEK APS-1102 i izolacioni transformator 230/12 V/V. Za potrebe akvizicije podataka korišćena je akviziciona kartica NI 9205. Kartice su postavljene u kućište NI cDAQ-9172, koje obezbeđuje napajanje akvizicionih kartica i komunikaciju sa računarom preko USB porta. Napon sa pojačavača se dovodi na primarne namotaje izolacionog transformatora čiji je sekundarni kraj vezan na red sa pobudnim namotajem torusnog uzorka i šant otpornikom. Indukcioni namotaj uzorka je direktno doveden na akvizicionu karticu.

Struja $i(t)$ kroz pobudni namotaj meri se indirektno, kao količnik izmerenog napona šant otpornika i njegove otpornosti, a potom se koristi za proračun jačine magnetskog polja prema Amperovom zakonu:

$$H(t) = \frac{N_1 i(t)}{l} \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right], \quad (1)$$

gde je N_1 broj navojaka pobudnog namotaja torusa, a l dužina srednje linije jezgra [6].

Izmereni indukovani napon na indukcionom namotaju proporcionalan je brzini promene ukupnog fluksa u torusnom jezgru, a vrednost magnetske indukcije se može proračunati pomoću izraza:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A} \int_0^t u_2(\tau) d\tau \quad [\text{T}], \quad (2)$$

gde su N_2 broj navojaka indukcionog namotaja torusa i A površina poprečnog preseka uzorka, a $u_2(t)$ izmerena vrednost indukovano napona.

Specifična snaga magnećenja $p(t)$ (svedena na jedinicu zapremine) izračunava se pomoću izraza [7]:

$$p(t) = H(t) \frac{dB(t)}{dt} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]. \quad (3)$$

Merenja su sprovedena sa torusnim uzorkom koji je dobijen namotavanjem orijentisanog feromagnetskog lima debljine 0.27 mm, oznake 27PH100, proizvođača POSCO. Ovaj lim je namenjen za proizvodnju energetskih i mernih transformatora.

Podaci o broju navojaka, dužini srednje linije i površini poprečnog preseka torusnog uzorka dati su u Tabeli I.

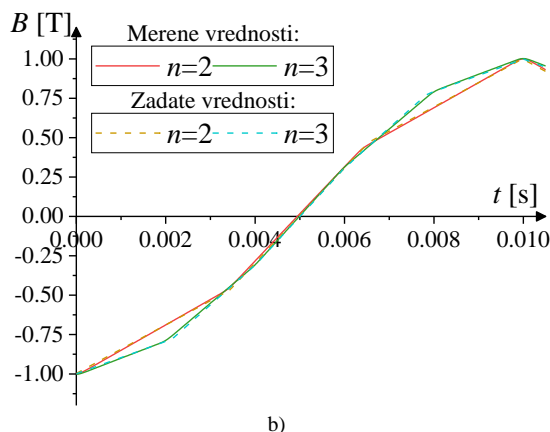
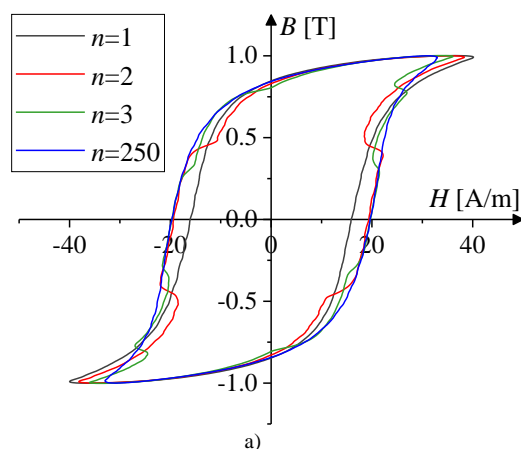
TABELA I
PODACI O TOROIDNOM UZORKU

Veličina	Vrednost
N_1	175
N_2	40
l [m]	0.306
S [mm ²]	102.80

III. ANALIZA REZULTATA MERENJA

Na Sl. 2a je prikazano poređenje eksperimentalno dobijenih histerezisnih petlji za sve razmatrane slučajeve segmentisane magnetske indukcije, kada je maksimalna vrednost magnetske indukcije iznosila 1 T. Mogu se uočiti skokovite promene na petljama, čija veličina i položaj zavise od broja segmenata.

Na Sl. 2b je prikazano poređenje oblika zadatih i izmerenih magnetskih indukcija (polovina periode) za slučaj signala sa dva i tri segmenta, koji su i najsloženiji za merenje. U ova dva slučaja se mogu uočiti delimična odstupanja merene indukcije od zadate. Ona su izražena na mestima prelamanja segmenata, gde se javlja blago zaobljenje. Ovakva odstupanja nisu zabeležena u druga dva slučaja, koji su jednostavniji za merenje. Odstupanja na prelazu između dva segmenta su posledica prelaznog procesa u feromagnetskom jezgru i upotrebljene merne opreme. Nakon više ponovljenih merenja zaključeno da su ista prihvatljiva i da neće uticati značajno na sprovedenu analizu.



Sl. 2. Poređenje: a) izmerenih histerezisnih petlji za sve oblike magnetske indukcije i b) zadatih i merenih oblika magnetske indukcije za slučaj signala sa dva i tri segmenta.

Za pravilno razumevanje promena na petljama sa Sl. 2a potrebno je istovremeno analizirati promene vremenskih oblika magnetskog polja i indukcije, brzine promene magnetske indukcije i specifične snage magnećenja.

Na Sl. 3 su prikazane eksperimentalno dobijene vrednosti magnetskog polja, magnetske indukcije, brzine promene magnetske indukcije i specifične snage magnećenja za slučajeve magnetske indukcije oblika segmentisane sinusoide sa $n=1$ (trougao), $n=2$, $n=3$ i $n=250$ (sinusoide) linearnih segmenata.

Segmenti menjaju nagib na približno 0.5 T, za slučaj sa dva, odnosno 0.3 T i 0.8 T, za slučaj sa tri segmenta. U cilju lakšeg opažanja dinamičke povezanosti magnetskog polja, brzine promene magnetske indukcije i specifične snage, izdvojeno je na Sl. 4 prikazan samo slučaj sa tri segmenta (jedna poluperioda).

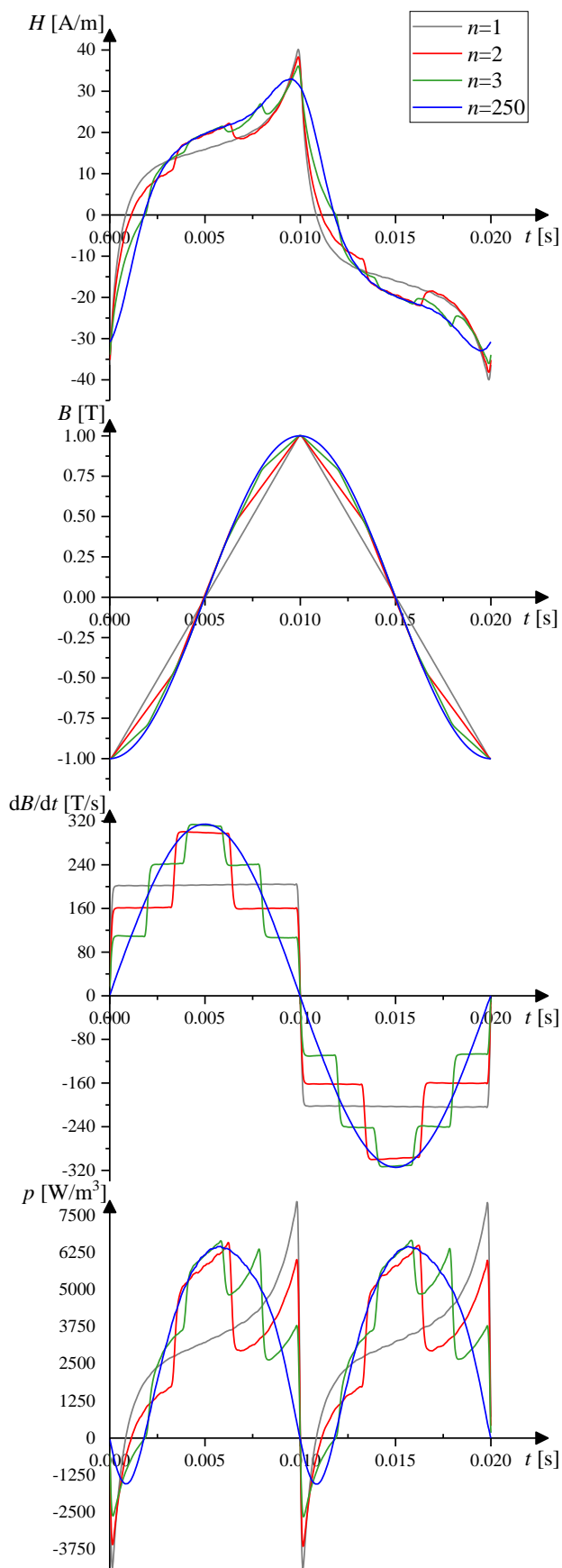
Posmatrajući grafike na Sl. 3 i 4 moguće je primetiti da isti u velikoj meri zavise od broja segmenata magnetske indukcije. Za slučaj sa jednim segmenata magnetska indukcija se menja kontinualno (bez naglih promena) između minimalne i maksimalne vrednosti. Posledica toga je da i magnetsko polje nema naglih promena, kao ni specifična snaga. Kada je magnetska indukcija sastavljena od dva ili tri pravolinijska segmenta, pri čemu se naglo menja brzina promene magnetske indukcije, i kod magnetskog polja i kod snage se javljaju nagle promene, koje odgovaraju sastavnim tačkama segmenata indukcije. Pri tome, uočava se da je nivo tih naglih promena srazmeran nivou nagle promene brzine promene magnetske indukcije za posmatrane segmente, što se može uočiti i na Sl. 4.

Ukoliko se broj segmenata povećava (u posmatranom slučaju na 250), kontrolisana magnetska indukcija poprima oblik sinusoide sa dinamikom promene magnetskog polja koja se razlikuje od prethodno pomenutih slučajeva i koja je kontinualnog oblika, bez naglih promena. Promene u dinamici pobudnog magnetskog polja su znatno sporije i glatke, a razlog za to jeste što povećanje broja segmenata umanjuje nagle promene magnetske indukcije.

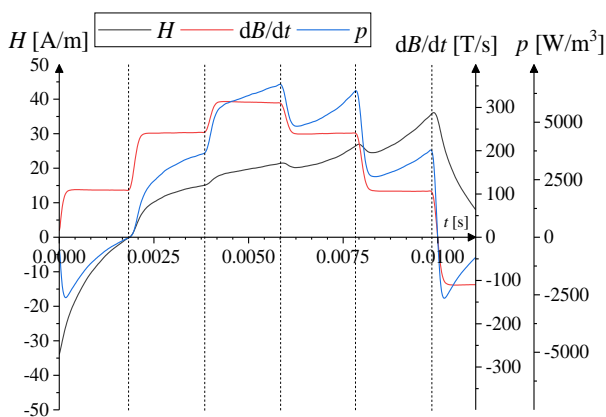
Vremenska zavisnost snage magnećenja, prikazana na Sl. 3, sastoji se iz dva dela i to: pozitivnog, kojim se objašnjava utrošak aktivne i reaktivne snage usled magnećenja uzorka, i negativnog, koji se javlja u trenucima kada pobudno polje počne da opada od svog maksimuma do nulte vrednosti, a koji predstavlja reaktivnu snagu koja se vraća ka izvoru [7].

Posmatrajući na Sl. 3 promenu snage magnećenja u vremenu, za tri merenja je u trenutku $t=0.01$ s registrovana nagla promena snage sa pozitivne na negativnu vrednost. Na taj način nastaju pozitivan i negativan pik u snazi koji se javlja kada magnetska indukcija počne da opada od maksimalne vrednosti. Visina pika je srazmerna nagibu segmenta, odnosno brzini promene magnetske indukcije, u tom trenutku. Najveći pik se javlja za trougaoni oblik indukcije (jedan segment) i pik se dalje smanjuje sa povećanjem broja segmenata (dva i tri segmenta). Sa daljim povećanjem broja segmenata pik će se još više smanjivati, tako da će potpuno nestati kada se postigne približno kontinualna promena magnetske indukcije, kao što je slučaj za 250 segmenata (sinusoidalni oblik indukcije). Dodatno, nagle promene u snazi su uočljive i u drugim trenucima kada se menja brzina promene magnetske indukcije, odnosno nagib segmenta. Nivo promene snage srazmeran je nivou promene brzine promene indukcije, tako da veća promena njene brzine uzrokuje veću promenu snage.

Može se zaključiti da brzina promene specifične snage magnećenja u toku jedne periode direktno zavisi od oblika kontrolisane veličine. Ukoliko kontrolisana veličina ima pravolinijske segmente snaga sadrži skokovite promene koje se javljaju u sastavnim tačkama segmenata.



Sl. 3. Magnetsko polje, magnetska indukcija, brzina promene magnetske indukcije i specifične snage magnećenja u funkciji vremena za slučajeve magnetske indukcije sa jednim, dva, tri i dvesta pedeset linearnih segmenata.



Sl. 4. Poređenje vremenskih oblika magnetskog polja, brzine promene magnetske indukcije i specifične snage za slučaj magnetske indukcije sa tri linearna segmenta.

Vrednosti specifičnih gubitaka snage za različite oblike kontrolisane magnetske indukcije date su u Tabeli II. U Tabeli II je takođe prikazan i relativni odnos gubitaka za sve razmatrane slučajeve i gubitaka pri magnetskoj indukciji sinusnog oblika. Najveću vrednost imaju gubici pri sinusnom obliku indukcije. U literaturi je čest slučaj da su pri sinusnom obliku indukcije dobijeni manji gubici nego pri nesinusoidalnom obliku [7]. To zavisi od brzine promene magnetske indukcije između njene nulte i maksimalne vrednosti. Kada indukcija brže dostiže maksimum, a sporije prolazi kroz nulu, dobijaju se uže histerezisne petlje (Sl. 2a) i gubici su manji, što je slučaj za rezultate prikazane u ovom radu. U tom smislu, primena višestepenih invertora bi se mogla opravdati smanjenjem gubitaka u jezgru upotrebljenih transformatora ili električne mašine.

Fitovanje promene specifičnih gubitaka snage sa brojem segmenata magnetske indukcije je prikazano na Sl. 5. Isto je izvršeno na osnovu rezultata iz Tabele II i pri tome je dobijena sledeća funkcija promene srednje snage gubitaka sa brojem segmenata:

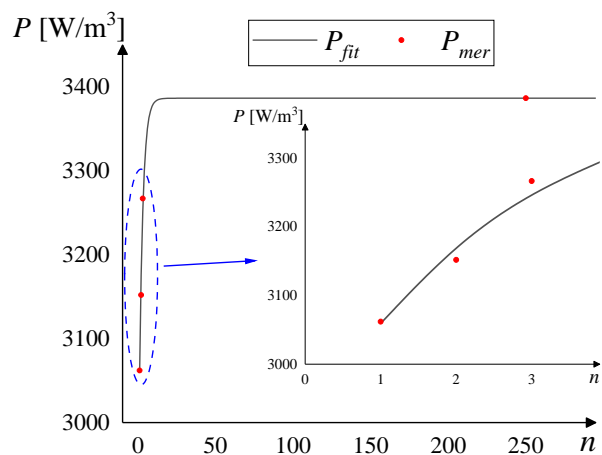
$$P_{fit} = 3386.7(1 - 0.15e^{-0.44n}), \quad (4)$$

gde je n broj upotrebljenih segmenata.

Na ovaj način je matematički pokazano da se povećanje gubitaka sa brojem segmenata odvija brzo, dostižući skoro maksimalnu vrednost već sa 10 do 20 segmenata, što se moglo i očekivati jer segmentisana kriva sa tolikim brojem segmenata gotovo da poprima oblik sinusoide. Za potvrdu ove pretpostavke potrebna su dodatna merenja sa većim brojem segmenata.

TABELA II
SPECIFIČNI GUBICI SNAGE U JEZGRU U ZAVISNOSTI OD BROJA SEGMENTA
MAGNETSKE INDUKCIJE

n	Gubici snage u jezgru [W/m ³]	Udeo gubitaka [%]
1	3062.08	90.41
2	3152.09	93.07
3	3267.06	96.47
250	3386.70	100.00



Sl. 5. Zavisnost specifičnih gubitaka snage u jezgru od broja segmenata.

U Tabeli III data su apsolutna i relativna odstupanja fitovanih od izmerenih vrednosti gubitaka.

TABELA III
APSOLUTNA I RELATIVNA ODSTUPANJA FITOVANIH OD IZMERENIH
VREDNOSTI SREDNJIH SPECIFIČNIH GUBITAKA SNAGE

n	Apsolutno odstupanje [W/m ³]	Relativno odstupanje [%]
1	-2.556	-0.083
2	23.897	0.758
3	-16.067	-0.492
250	0.000	0.000

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazana eksperimentalna ispitivanja specifične snage magnećenja i snage gubitaka, magnetskog polja i indukcije torusnog uzorka od feromagnetskog lima. Ispitivanja su izvršena pri kontrolisanom obliku magnetske indukcije koja je predstavljena u obliku segmentisane sinusoide sa $n=1$, $n=2$, $n=3$ i $n=250$ linearnih segmenata.

Poređenjem rezultata ispitivanja može se uočiti zavisnost dinamike promene veličina od značaja od nagiba segmenta magnetske indukcije, odnosno zavisnost od brzine promene magnetske indukcije. Utvrđeno je da delovi razmatranih veličina kojima odgovaraju segmenti magnetske indukcije sa većim nagibom, odnosno većom brzinom promene iste, poseduju bržu dinamiku promene od onih sa manjom brzinom promene magnetske indukcije. Dodatno, utvrđena je povezanost naglih promena magnetske indukcije (izlaznog napona) i naglih promena u vremenskim oblicima magnetskog polja i specifične snage magnećenja uzorka.

Dodatno, analizirana je relativna promena snage gubitaka sa promenom broja segmenata magnetske indukcije i utvrđena je funkcija koja vrlo tačno opisuje ovu zavisnost.

Praktičan značaj ovoga rada ogleda se u doprinosu boljem razumevanju dinamičkih procesa magnećenja feromagnetskih limova kao i u analizi uticaja brzine promene magnetske indukcije na oblik magnetskog polja i specifične snage magnećenja u jezgru, sa osvrtom na rad višestepenih invertora.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja RS, Ugovor br. 451-03-68/2020-14/200132, čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA

- [1] S.A. Gonzalez, S. A. Verne, M.I. Valla, “*Multilevel Converters for Industrial Applications*”, CRC Press, London, UK, 2013.
- [2] J. Rodríguez, J. Lai, F. Peng, “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 49, No. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
- [3] T. Kauder, T. Belgrand, R. Lemaitre, A. Thul, K. Hameyer, “Medium-frequency power transformer using GOES for a three-phase dual active bridge”, *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 504, Art. No. 166672, June 2020.
- [4] P. Rasilo, A. Salem, A. Abdallah, F. De Belie, L. Dupre, J.A. Melkebeek, “Effect of Multilevel Inverter Supply on Core Losses in Magnetic Materials and Electrical Machines”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 30, No. 2, pp. 736-744, June 2015.
- [5] H. Joshi, N. Tekwani, A. Hinduja, “Multi-level Inverter for Induction Motor Drives: Implementation using Reversing Voltage Topology”, International Power Engineering Conference (IPEC), Singapore, Singapore, pp. 181-186, 27-29 Oct. 2010.
- [6] B. Koprivica, A. Milovanović, M. Đekić, “Determination of Characteristics of Ferromagnetic Material using Modern Data Acquisition System”, *Serb. J. Electr. Eng.*, Vol. 6, No. 3, pp. 451-459, Dec. 2009.
- [7] M. S. Lancarotte, A.A. Penteado, Jr., “Estimation of Core Losses Under Sinusoidal or Non-Sinusoidal Induction by Analysis of Magnetization Rate”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 16, No. 2, June 2001.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present time waveform of magnetisation power in a sample made of ferromagnetic sheet under controlled shape of magnetic induction in a form of segmented sine wave, composed of linear parts. The paper presents comparisons of time waveforms of magnetic field, magnetic induction and power. The change in power over time with the rate of change of magnetic induction was analysed. Also, the change of the power losses with the change of the number of segments of the considered sinusoid was analysed. The paper presents an appropriate discussion of the results.

Power losses in the toroidal core of ferromagnetic sheet in the case of magnetic induction in the form of a segmented sinusoid

Srdan Divac, Branko Koprivica, Alenka Milovanović,
Milan Plazinić