Modeliranje i izrada trofaznog transformatora sa povećanim rasipnim tokovima za potrebe proučavanja gubitaka transformatora

Vida, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:734999

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Stručni studij

MODELIRANJE I IZRADA TROFAZNOG TRANSFORMATORA SA POVEĆANIM RASIPNIM TOKOVIMA ZA POTREBE PROUČAVANJA GUBITAKA TRANSFORMATORA

Završni rad

Hrvoje Vida

OSIJEK, 2016.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

Obrazac Z1 - Obrazac za ocjenu završnog rada

Osijek,24.6.2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada

Ime i prezime studenta:	HRVOJE VIDA
Smjer:	Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A2931, 2005.
Mentor:	Izvr.prof.dr.sc. Željko Hederić
Sumentor:	/
Naslov završnog rada:	**Modeliranje i izrada trofaznog transformatora sa povećanim rasipnim tokovima za potrebe proučavanja gubitaka transformatora**
Primarna znanstvena grana rada:	**Elektrostrojarstvo**
Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:	
Predložena ocjena završnog rada:	
Kratko obrazloženje predložene ocjene:	

Potpis sumentora:	Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

Korekcija ocjene Odbora za završne i diplomske ispite

Odbor za završne i diplomske ispite Elektrotehničkog fakulteta Osijek, temeljem članka 11. Pravilnika o završnim ispitima na preddiplomskim i stručnim studijima Elektrotehničkog fakulteta Osijek donio je odluku o korekciji konačne ocjene završnog rada na ____ sjednici Odbora održanoj dana _____ godine.

Korigirana konačna ocjena završnog rada:	_____

Potpis predsjednika Odbora:

_____

Dostaviti:

1. Studentska služba

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek,

Ime i prezime studenta:	HRVOJE VIDA
Studij :	Stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A2931,2005.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

MODELIRANJE I IZRADA TROFAZNOG TRANSFORMATORA SA POVEĆANIM RASIPNIM TOKOVIMA ZA POTREBE PROUČAVANJA GUBITAKA TRANSFORMATORA

izrađen pod vodstvom mentora
izv.prof.dr.sc.Željko Hederić.

Mojvlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada,osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora i drugih osoba, ašto je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. DIZAJN TRANSFORMATORA SA POVEČANIM RASIPANJEM MAGNETSKIH TOKOVA NAMOTA 2
2.1. Određivanje parametara transformatora 2
2.1.1. Ispitivanje parametara izvornog transformatora 2
2.1.2. Dizajn novih namota sa povećanim rasipanjem magnetskog polja 6
3. MODELIRANJE MAGNETSKIH KRUGOVA 15
3.1. Nadomjesni magnetski krugovi sa koncentriranim parametrima 16
4. MJERENJA PARAMETARA TRANSFORMATORA SA POVEČANIM RASIPANJEM NAMOTA 24
5. ZAKLJUČAK 27
LITERATURA 28
SAŽETAK 29
ABSTRACT 30
ŽIVOTOPIS 31
PRILOZI 32

1. UVOD

Završni rad se bavi modeliranjem trofaznog transformatora sa povećanim rasipnim tokovima radi proučavanja gubitaka transformatora. Trofazni transformatori predstavljaju bitan element energetskog sustava te je studentima elektrotehnike važno predočiti osnove njegovog funkcioniranja, kao i pojašnjavanje teorijskog nadomjesnog modela transformatora. Prije samog modeliranja transformatora obavljena su određena mjerenja i proračuni te je snimljena petlja histereze na postojećem transformatoru. Transformator je nakon toga rastavljen, izrađeni su novi kalemi namota, te je transformator ponovno sastavljen, ali sa povećanim zračnim rasporom između stupa jezgre i namota. Zračni raspori su dimenzionirani da osiguraju dovoljno mjesta za umetanje sonde za mjerenje magnetskog polja. Iznosi proračunatih vrijednosti rasipnih magnetskih tokova te električnih veličina transformatora provjereni su mjerenjima.

Zadatak rada:

Za potrebe laboratorija iz osnova elektrotehnike potrebno je konstruirati maketu transformatora sa povećanim rasipanjima, na kojoj će biti predviđena mjesta za umetanje sondi za mjerenje iznosa. Mjerenja rasipnih magnetskih tokova, te električnih veličina transformatora treba provjeriti mjerenjima.

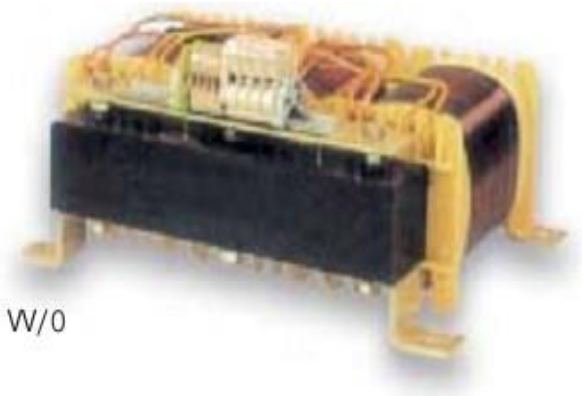
2. DIZAJN TRANSFORMATORA SA POVEČANIM RASIPANJEM MAGNETSKIH TOKOVA NAMOTA

2.1. Određivanje parametara transformatora

Za potrebe nastave potrebno je izraditi maketu transformatora sa povećanim rasipanjem namota, čime se nastoji osigurati da studenti mjerenjima mogu određivati iznose magnetskog polja u određenim točkama konstrukcije transformatora. Odabran je trofazni transformator zadovoljavajućih dimenzija jezgre za koji će se u prvom dijelu poglavlja odrediti parametri, zatim dizajnirati novi kalemi i namoti, te će se transformator premotati.

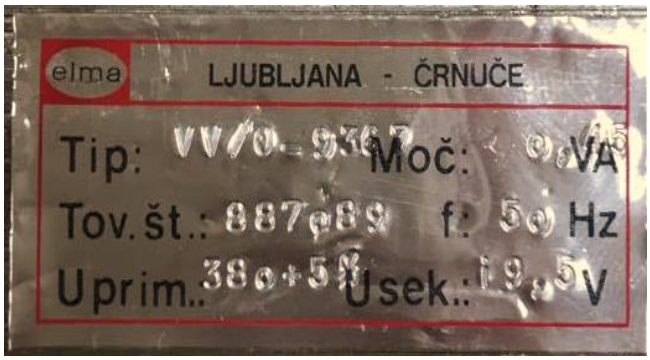
2.1.1. Ispitivanje parametara izvornog transformatora

Transformator na kojem je vršeno mjerenje je trofazni transformator proizvođača



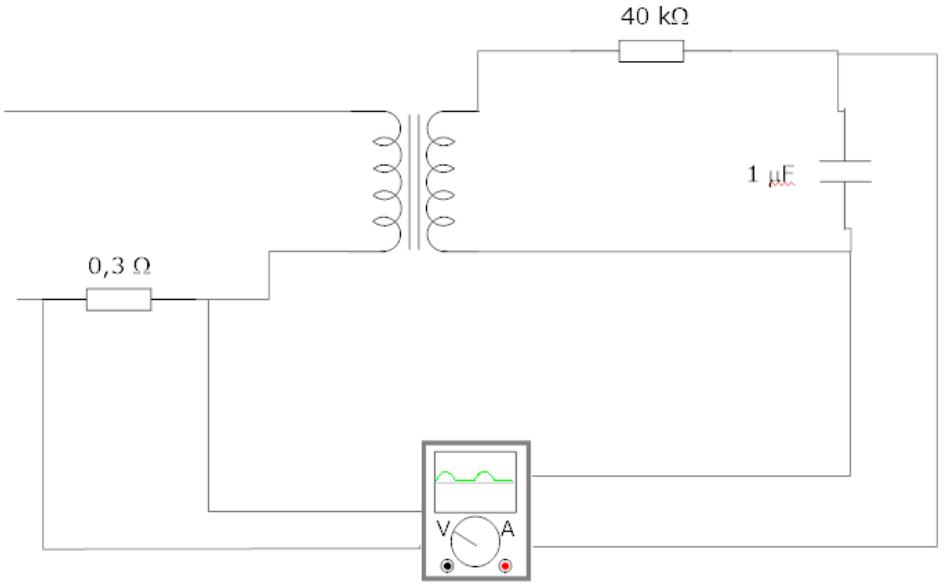
Elma, Ljubljana – Črnuče prikazan je na slici 2.1., a na slici 2.2. je njegova natpisna pločica.

Sl.2.1. Trofazni transformator tipa VV/ 0.



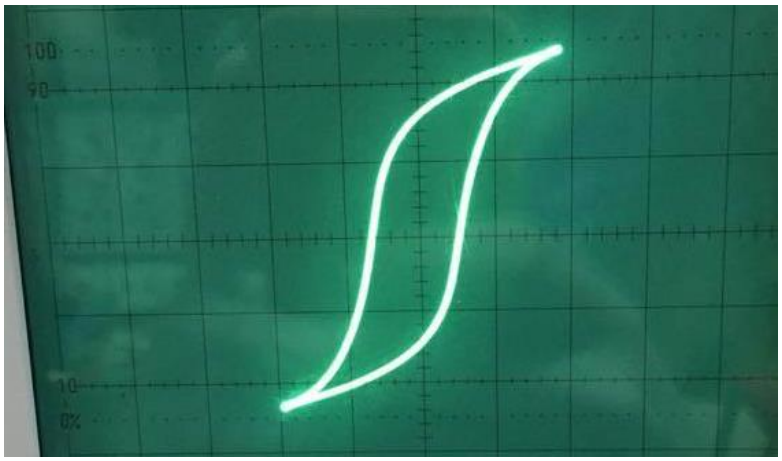
Sl.2.2. Pločica transformatora sa specifikacijama transformatora

Da bi se snimila petlja histereze transformator se spaja u strujni krug prikazan na slici 2.3. U primarnom krugu nalazi se shunt otpornik R_1 koji iznosi 0.3 Ω za mjerenje struje, dok se u sekundarnom krugu nalazi RC spoj kapaciteta 1μF i jakosti otpora 40 kΩ za određivanje napona..



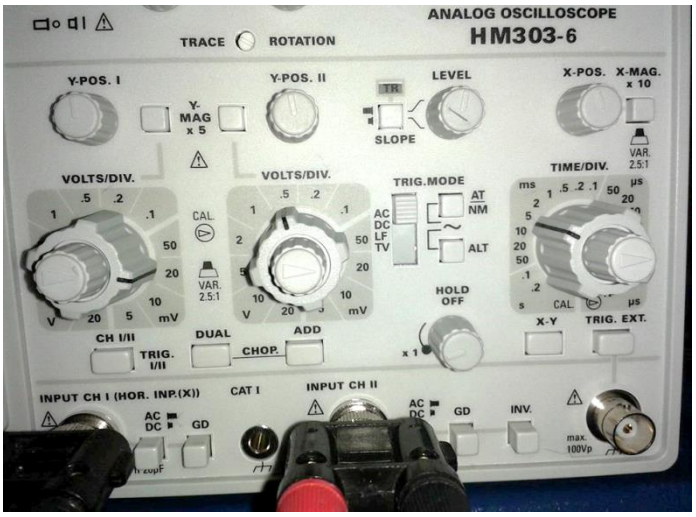
Sl.2.3. Shema spoja

Na osciloskopu je dobivena petlja histereze koja se vidi na slici 2.4. Snimanjem kompletne promjene petlje histereze za različitu uzbudu, može se kreirati normirana krivulja magnetiziranja.



Sl.2.4. Petlja histereze na osciloskopu

Na slici 2.5. vide se odabrana mjerna područja osciloskopa pri mjerenju.



Sl. 2.5. Položaj mjernih područja na osciloskopu pri mjerenju petlje histereze

Pri izračunu broja namota na primaru koristi se formula za efektivnu vrijednost napona između stezaljki namota:

$$E = 1.11 * E_{si} = 1.11 * 4 * f * N * \phi_m = 4.44 * f * A * B_m \qquad (2\text{-}1)$$

gdje je:

E_{si}	- srednje ispravljeni napon
f	- frekvencija
ϕ_m	-amplituda magnetskog toka kojeg obuhvaća namot
A	- efektivna površina presjeka jezgre
B_m	- tjemena vrijednost indukcije.

Broj zavoja dobiven je na sljedeći način:

$$230 = 4.44 * 50 * N * 1.2 * 10^{-2} * B_m$$

$$\frac{230}{4.44 * 50 * 1.2 * 10^{-2}} = N * B_m$$

Prema literaturi B. Mitraković: *Transformatori*[1], transformatori se prema standardu izrađuju s indukcijom od 1.1 [T] te ako se uzme da je B_m =1.1 [T] dobiva se:

$$863 = N * B_m$$

$$863 = N * 1.1$$

$$\frac{863}{1.1} = N$$

$$N_1 \approx 784 \text{ namota}$$

Prijenosni omjer izračuna se pomoću nazivnih napona primara i sekundara koji su zabilježeni na natpisnoj pločici transformatora:

$$\frac{U_{prim}}{U_{sek}} = \frac{380}{19.5} = 20$$

Prijenosni omjer transformatora iznosi 1: 20, a broj zavoja sekundara izračuna se na sljedeći način:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{20}$$

$$N_2 = \frac{N_1}{20}$$

$$N_2 = \frac{784}{20}$$

$$N_2 \approx 39\ zavoja$$

Kako bi se dobila jakost magnetskog polja, koristi se izraz za napon na kondenzatoru u sekundarnom krugu:

$$u_c = \frac{N_2 * A}{C * R} * B \qquad (2\text{-}2)$$

gdje je:

u_c	- napon na kondenzatoru u sekundarnom krugu
N_2	- broj zavoja na sekundaru
A	- efektivna površina presjeka jezgre
C	- kapacitet
B	- vrijednost magnetske indukcije

Napon na kondenzatoru u_c proračuna se pomoću slike (2.4.) i slike (2.5.) i iznosi 1.25 V, tada je:

$$1.25 = \frac{39 * 1.2 * 10^{-3}}{1 * 10^{-6} * 40 * 10^{3}} * B$$

$$B = \frac{1.25}{1.17}$$

$$B = 1.068\ T$$

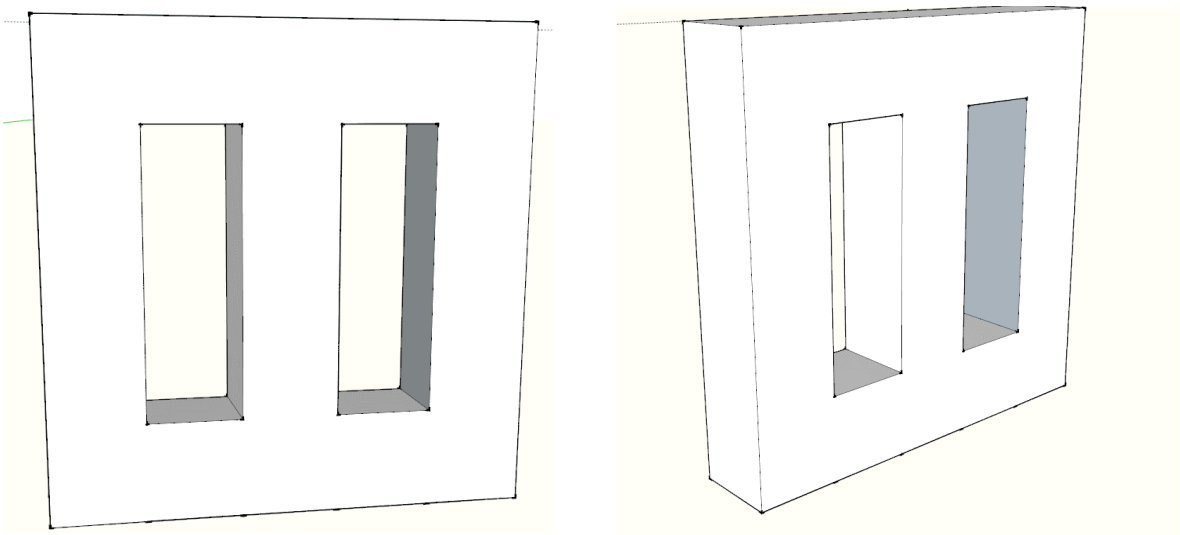
Što potvrđuje da je transformator namotan prema standardu od B= 1.1 T.

2.1.2. Dizajn novih namota sa povećanim rasipanjem magnetskog polja

DIZAJN I IZRAD KALEMA NAMOTA

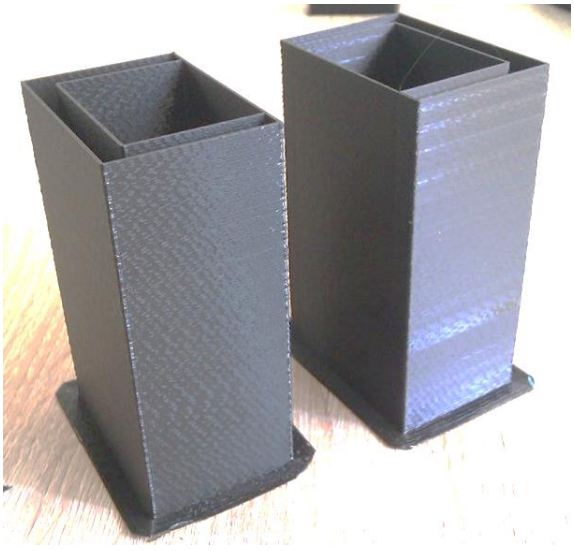
Novim namatanjem transformatora želi se povećati razmak između namotaja primara i stupova transformatora. Tim postupkom povećat će se rasipni tok te će se ujedno postići da mjerna sonda može ući u taj međuprostor.

Izgled stupova transformatora bez namotaja vidljiv je na slici 2.6.



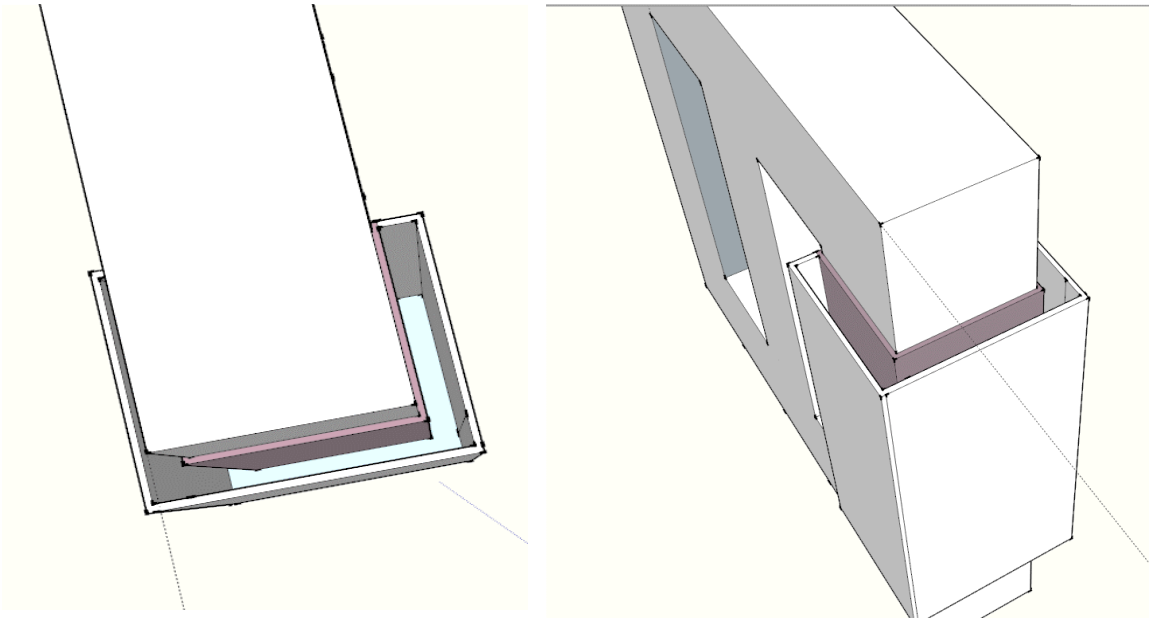
Sl. 2.6. Izgled stupova jezgre transformatora

Nakon razdvajanja limova na stupove se postavljaju plastični kalemi namota printani 3D printerom. Mogu se na slici 2.7. uočiti zračni raspori za odmicanje namota od jezgre čime se osigurava veći rasipni magnetski tokovi, a taj zračni prostor će poslužiti za unos sondi za mjerenje magnetskog polja.



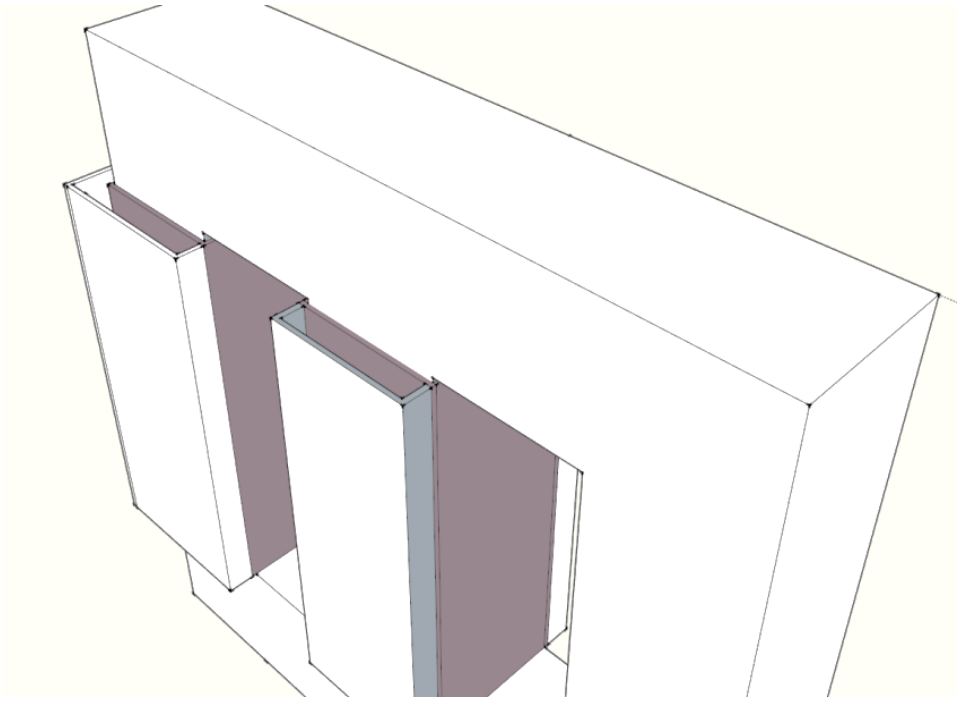
Sl. 2.7. Plastični ulošci printani 3D printerom

Ovim je povećan razmak između stupova transformatora i buduće namotanih primarnih namota za 7mm, koliko je dovoljno da međuprostor postane dostupan mjernoj sondi.

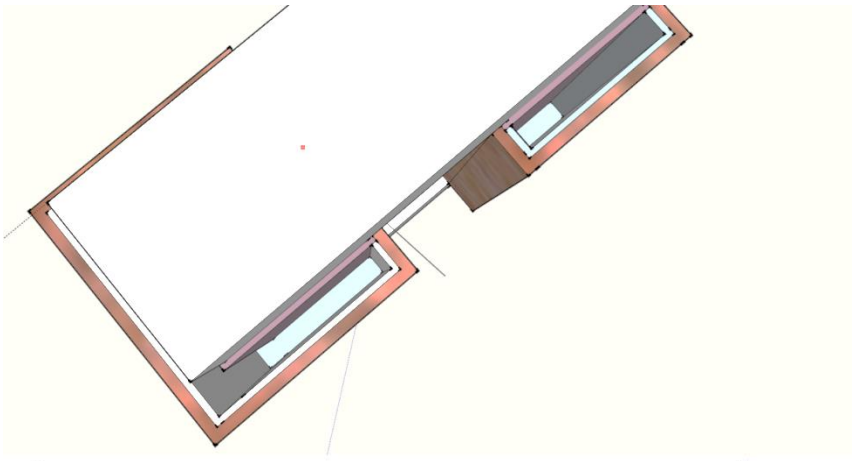


Izgled modela i kako bi trebali biti postavljeni ulošci vidljivi su na sljedećim slikama.

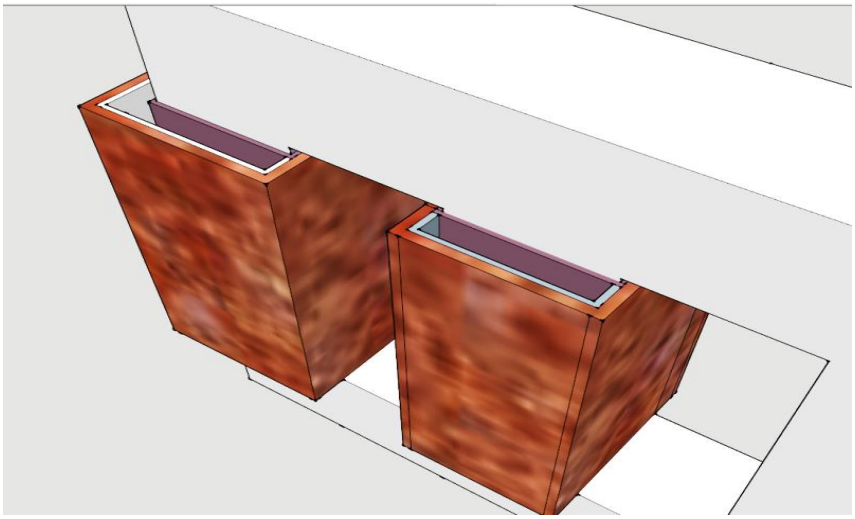
Sl. 2.8. Izgled modela transformatora i kalema namota
sa povećanim rasporom između namota i jezgre (bez bakrenog namota)



Sl. 2.9. Izgled modela transformatora sa pogledom na različite kaleme
namota vanjskih i srednjeg stupa jezgre (bez bakrenog namota)



Sl. 2.10. Izgled modela transformatora sa pogledom na različite kaleme namota vanjskih i srednjeg stupa (sa bakrenim namotom)

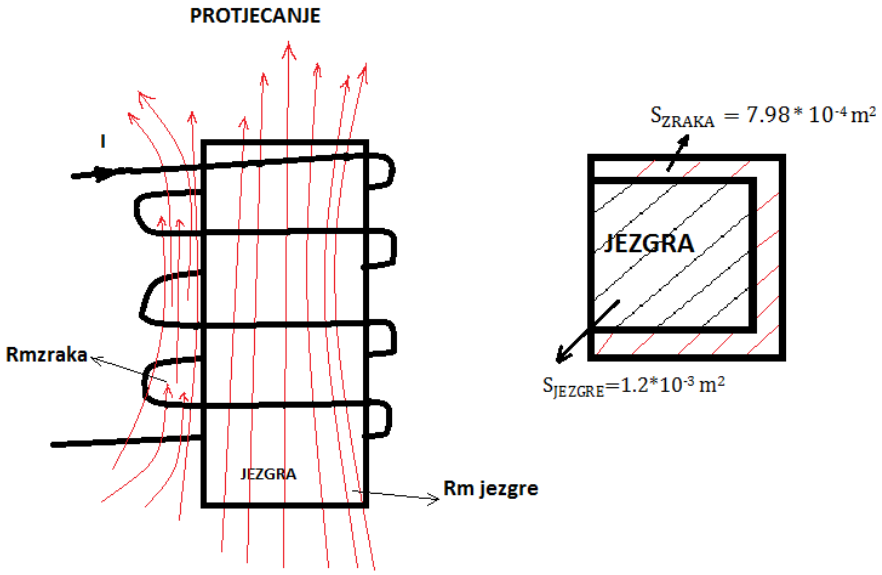


Sl. 2.11. Izgled modela transformatora sa pogledom na različite kaleme namota vanjskih i srednjeg stupa (sa bakrenim namotom)

PRORAČUN TRANSFORMATORA ZA NAMATANJE SA ZRAČNIM RASPOROM IZMEĐU STUPA JEZGRE I PRIMARNOG NAMOTA

Ako bi u željeznoj jezgri postojali zračni raspori, oni bi predstavljali povećanje magnetskog otpora kruga. Uz isti broj amperzavoja, odnosno magnetske uzbude (I N), slijedi da bi se povećanjem magnetskog otpora smanjio magnetiski tok (Φ). [2].

Pri novom namatanju jezgre dolazi do proširenja zračnog raspora između jezgre i primarnog namota kako je vidljivo u prethodnom poglavlju, tako da će pri namatanju biti upotrijebljena i saznanja iz ohmovog zakona za magnetizam.



Sl. 2.12. Aproksimativni izgled namota ponovno namotanog transformatora i rasipnih magnetskih tokova

Magnetski tok:

$$\Phi = B * S \tag{2-3}$$

gdje je:

B - magnetska indukcija

S - površina okomita na smjer magnetskog toka

Magnetska uzbuda:

$$\Theta = N * I \tag{2-4}$$

gdje je:

N - broj zavoja uzbudnog svitka

I - jakost struje kroz uzbudni svitak

Definiranjem magnetskog otpora: R_m

Prema tome poznati izraz za Ohmov zakon

$$I = \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{R}} \tag{2-5}$$

gdje je:

U- vrijednost napona

R- vrijednost otpora ,

u magnetizmu poprima oblik

$$\Phi = \frac{\Theta}{\mathrm{Rm}} \tag{2-6}$$

gdje je:

Θ- magnetska uzbuda

Rm- magnetni otpor

Ako vrijedi Ohmov zakon za magnetne krugove to znači da će se tok rasporediti unutar namota u omjeru magnetnih otpora $R_{m\ ZRAKA}$ i $R_{m\ JEZGRE}$ isto kao što se i struja raspoređuje u omjeru dva otpornika spojenih u paralelu.

Iz petlje histereze da se pročitati B i H te iz njihovog omjera dobiva se permeabilnost materijala

$\mu_{ŽELJEZA}=4.36*10^{-3}\frac{H}{m}$, a $\mu_{ZRAKA}=1.25*\ 10^{-6}\frac{H}{m}$ je konstanta.

Izrazom:

$$\frac{\mathrm{R_{m\ ŽELJEZA}}}{\mathrm{R_{m\ ZRAKA}}} = \frac{\frac{l_S}{\mu_{ŽELJEZA}*\mathrm{S_{JEZGRE}}}}{\frac{l_S}{\mu_{ZRAKA}*\mathrm{S_{ZRAKA}}}} = \frac{\mu_{ZRAKA} * \mathrm{S_{ZRAKA}}}{\mu_{ŽELJEZA} * \mathrm{S_{JEZGRE}}} \tag{2-7}$$

dobiva se omjer magnetnog otpora željeza i zraka prostoru unutar namota.

$5112 * R_{m\ ŽELJEZA}=R_{m\ ZRAKA}$

Iz ovoga je vidljivo da će tek 5112 dio ukupnog toka proći kroz zračni raspor, a ostatak će najkraćim putem iz namota proći kroz jezgru, tako da se novi transformator može premotati na B=1.1 T.

Prema zakonu o protjecanju

$$\oint_l \overrightarrow{H} * d\vec{l} = \sum_i i_0 N \tag{2-8}$$

Za slučaj da je permeabilnost jezgre puno veća od zraka ($\mu_r \gg 1$) slijedi:

$$\mathrm{H} * l = i_0 * N \tag{2-9}$$

$$\Phi * \frac{l}{\mu * \mathrm{S}} = i_0 * N \tag{2-10}$$

Povećanjem raspora između jezgre i primarnog namotaja povećava se ukupna površina kroz koju prolazi tok, također se povećava i ukupna dužina žice namotaja. Kako je jezgra i njezina karakteristika ostala nepromijenjena, struja magnetiziranja ostat će ista, tako da će se uz nepromijenjen broj zavoja dobiti isti tok kroz namotaj kao u prvotno namotanom transformatoru. Kako je magnetni otpor zraka 5112 puta veći, a iz Ohmovog zakona za magnetizam su već izvedeni određeni zaključci, transformator će se namotati na 750 zavoja spoj Yy kako je i originalno namotan, naravno uz puno veći utrošak žice.

Proračun broja zavoja namota:

S=12 cm^2

B=1.1 T

F=50 Hz

$$N = \frac{10^4}{4.44 \cdot \mathrm{B} \cdot \mathrm{S} \cdot \mathrm{f}}$$

N_1=750z (3.4z / V)

Za potrebe mjerenja izvući će se i priključnice transformatora na 516 zavoja tj. B=1.6T.

Proračun:

S=12 cm^2

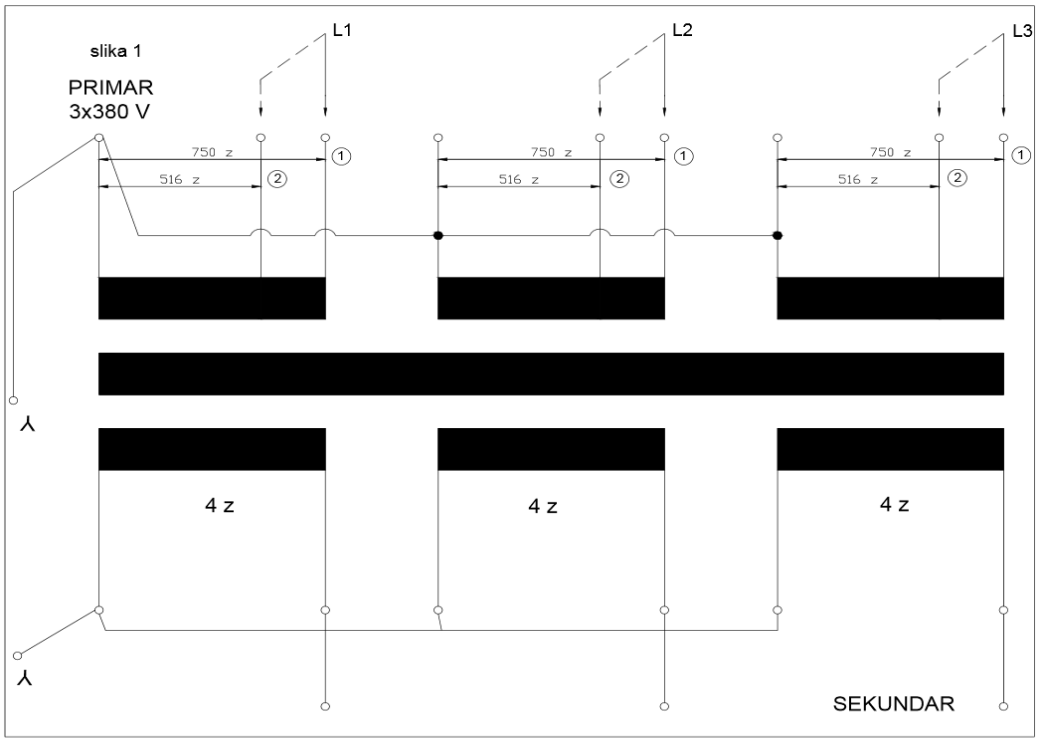
B=1.6 T

F=50 Hz

$$N = \frac{10^4}{4.44 \cdot \mathrm{B} \cdot \mathrm{S} \cdot \mathrm{f}}$$

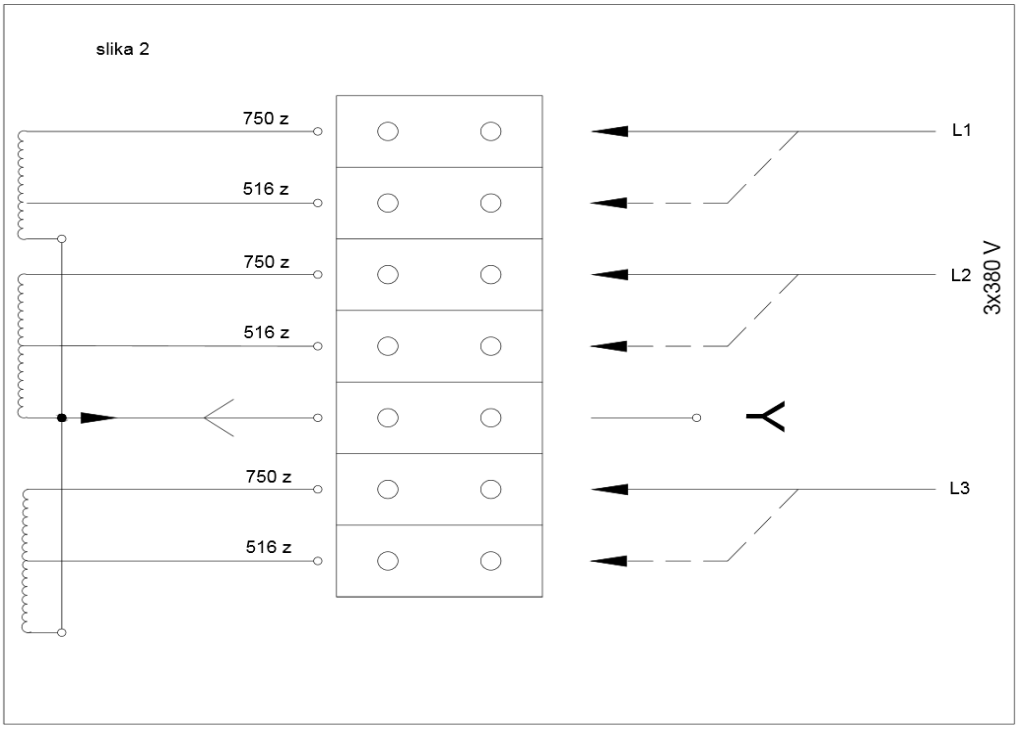
N_1=516 z (2.35/ V)

Na slici 2.13. prikazana je shema spoja namota transformatora.

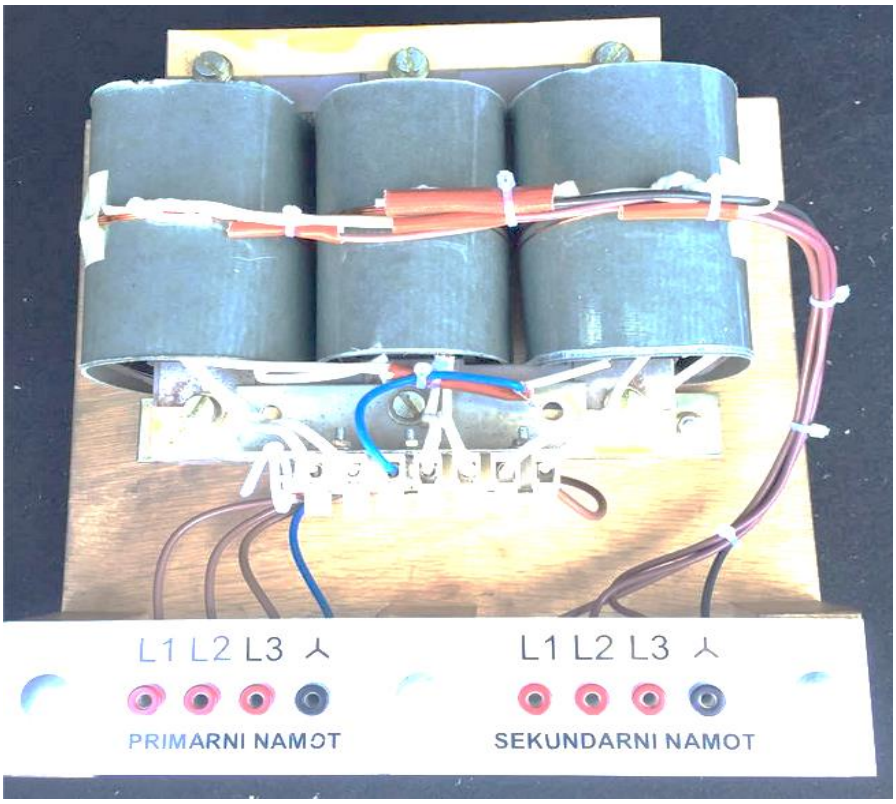


Sl. 2.13. Spoj shema spoja namota

Na slici 2.14. prikazan je spoj krajeva namota u priključnu stezaljku za spoj prema izvoru napajanja, a na slici 2.15. prikaz pogleda na izvedeni transformator i spojne stezaljke.



Sl. 2.14. Način spajanja krajeva namota



Sl. 2.15. Pogled na novo namotani transformator sa zračnim rasporom i priključne stezaljke



Sl. 2.16. Pogled na novo namotani transformator
iz perspektive pogleda na zračne raspore

3. MODELIRANJE MAGNETSKIH KRUGOVA

Elektromagnetski uređaji su danas sveprisutni u gotovo svim područjima života. Vrlo je važno razumjeti fizikalne pojave koje se događaju u tehnički vrlo složenim uređajima. Transformator s posebnom konstrukcijom namatanja dizajniran je za didaktičke potrebe. Ideja je omogućiti studentima izračunavanje modela parametara transformatora ili dijela magnetskog kruga kroz mjerenje magnetskih polja na različitim mjestima unutar strukture.

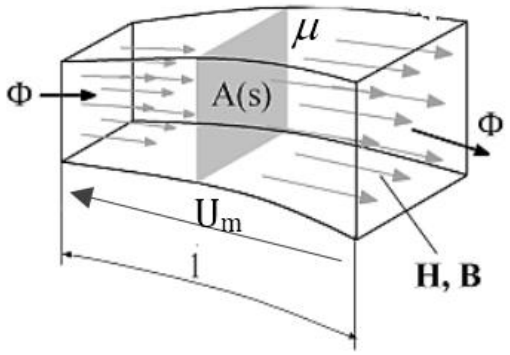
Teorijski pojmovi i vrijednosti koje opisuju magnetsko polje nisu vizualno očiti kao što je slučaj s električnim krugovima. Dakle, s nekim pojednostavljenjima, izrađeni su modeli magnetskih krugova s koncentriranim parametrima po analogiji s električnim krugovima [3, 5].

Osnova magnetskog kruga sastoji se od: izvora (struja svitka), vodiča (magnetska jezgra) i opterećenja (zračni raspori). Po analogiji s električnim krugovima, magnetski tok kroz magnetske jezgre se gleda kao magnetska struja. Izvor koji uspostavlja magnetski tok se zove magnetomotorna sila (MMS = Θ [A]). Ona je proporcionalna uzbudnoj struji svitka I [A] i broju zavoja N (amperzavoji). Ravnotežu MMS održava pad magnetskog napona na opterećenju HL. Magnetska jezgra nije idealan element (analogno žici u električnom krugu). Magnetski tok $\Phi[\mathrm{Vs}]$ koji prolazi kroz nju generira gubitke koji se mjere pomoću pada magnetskog napona. U cilju izvođenja potpune analogije uveden je koncept magnetskog otpora (reluktancije) i Ohmovog zakona za magnetsko polje:

$$\Theta = \Phi R_m = U_m \tag{3-1}$$

pri čemu za magnetski otpor vrijedi analogija sa spajanjem otpora u seriju ili paralelno.

Kao i kod standardnih električnih krugova, definicija otpora je definirana za presjek toka (prostor u kojem je homogeno polje, protok, presjek, i ima konačnu duljinu, pad napona i svojstva materijala) (slika 3.1).



Sl. 3.1.Presjek magnetskog toka – prostor sa homogenim poljem za definiranje reluktancije

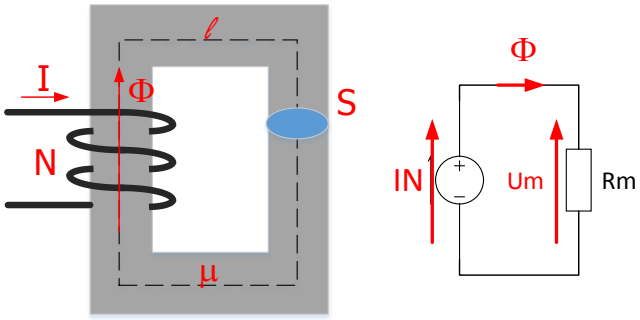
Otpor se definira kao omjer pada napona i struje. U magnetskom polju se koristi magnetski napon i magnetski tok. Zbog konstantne vrijednosti snage polja i magnetske indukcije, magnetski tok se može definirati pomoću konstrukcijskih mjera i vrijednosti materijalnih svojstava.

$$\left.\begin{array}{c} \oint \vec{H}\,d\vec{l} = H\,l = \sum I = N\,I \\ \Phi = \iint \vec{B}\,d\vec{S} = B\,S \\ B = \mu\,H \end{array}\right\} \left\{\begin{array}{l} U_m = I\,N \\ H\,l = \Phi R_m \\ R_m = \dfrac{l}{\mu\,S}\left[\dfrac{A}{Vs}\right] \end{array}\right. \qquad (3\text{-}2)$$

3.1. Nadomjesni magnetski krugovi sa koncentriranim parametrima

Jednostavni magnetski krug se sastoji od magnetske jezgre koja je zatvorena u petlju bez zračnih raspora i uzbudnog svitka. Zbog jednostavnosti, u obzir je uzet samo slučaj uzbude sa strujom fiksne vrijednosti I.

Slika 3.2. pokazuje analogiju s električnim krugovima i modeliranje pomoću modela s koncentriranim parametrima.



Sl. 3.2.Jednostavan magnetski krug i model s koncentriranim parametrima s magnetskim otporom

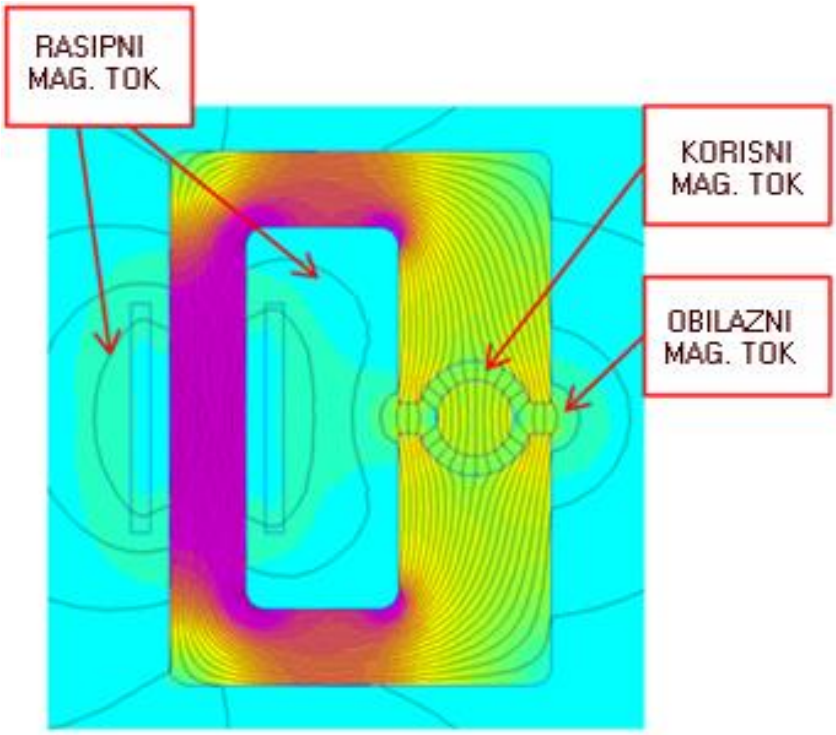
Međutim, prethodno prezentirani model i izvedene formule vrijede s jednom vrlo važnom pretpostavkom: "Ukupni magnetski tok, što je uzrokovano strujom koja prolazi kroz zavoje uzbudnog svitka, prolazi samo kroz magnetsku jezgru." [3, 4].

Ova tvrdnja je dovoljno točna uz pretpostavku da je relativna permeabilnost μr»1, što je u stvarnosti vrlo rijetko ispunjeno. Štoviše, većina dobrog magnetskog materijala ima vrlo nelinearna obilježja.

U stvarnosti, svaki namotaj zavojnice stvara magnetski tok, a oni, kada se zbroje, formiraju ukupan magnetski tok. Takva raspodjela magnetskog toka ima dio koji obuhvaća sve namote (ulančani magnetski tok $\Psi = N\Phi$), ali i dio magnetskog toka koji obuhvaća samo pojedinačne namote. Taj dio magnetskog toka (u primjeru koji je prikazan na slici 3.2.) ne teče kroz magnetsku jezgru i predstavlja gubitak magnetske energije te se naziva rasipni tok (Slika 3.3.).

Dodatni problem predstavljaju zračni raspori koji prekidaju petlju magnetske jezgre. Na mjestima zračnog raspora magnetski tok iz magnetski vodljivog prostora prolazi zrakom koji nije dobar vodič magnetskog toka. Također, zrak ne može biti oblikovan (kao željezna jezgra), tako da magnetski tok koji prolazi kroz zračni raspor ovisi o mnogim parametrima, prije svega o konstrukciji magnetskog kruga.

Slika 3.3 prikazuje magnetski krug koji je dizajniran za pretvaranje električne energije iz zavojnice u magnetsku energiju u rotoru. Dio magnetskog toka koji povezuje sve namote i prolazi kroz jezgru i kroz zračni raspor u rotoru i nazad naziva se korisnim magnetskim tokom.



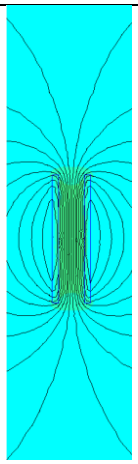
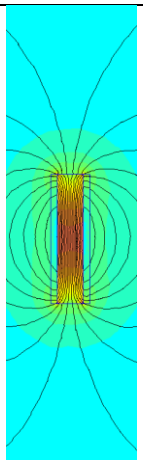
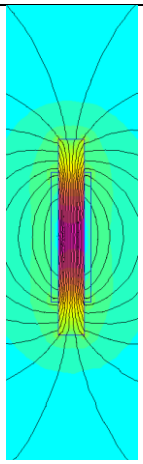
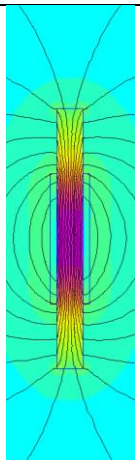
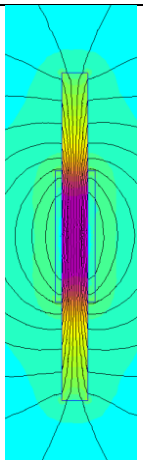
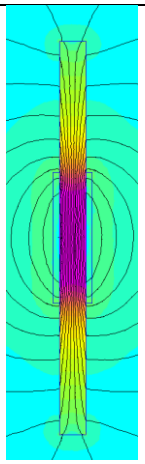
Sl. 3.3.Magnetski krug s rasipnim tokom i obilaznim tokom
koji nisu korisni u pretvorbi energije

Rasipni tok prikazan na slici 3.3 ima nekoliko dijelova. Može se vidjeti magnetski tok koji obuhvaća samo pojedinačne namotaje. Također postoji dio magnetskog toka koji prolazi kroz sve namotaje, ali zbog izgradnje jezgre u blizini rotora, nije dio korisnog toka (obilazni tok).

U svrhu razumijevanja ponašanja magnetskog polja u daljnjoj analizi će se uzeti jednostavan primjer zavojnice i stupa jezgre (slika 3.4). Utjecaj duljine jezgre na raspodjelu magnetskog polja prikazan je istovremenim prikazom namota kroz koje teče nepromjenjiva struja I, sa N namotaja i duljinom namotaja L_{Cu}. Debljina navoja i magnetske jezgre zanemarivi su doprinosi promjeni magnetskog polja u odnosu na doprinos duljine magnetske jezgre.

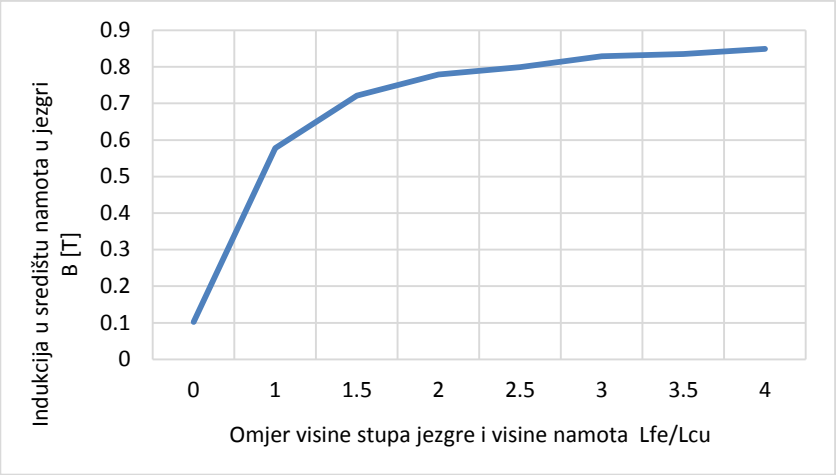
Omjer duljine jezgre u odnosu na duljinu namotaja povećavao se od 1 do 3, a prva slika s lijeva prikazuje raspodjelu magnetskog polja u zračnom namotu.

U tablici (3.1) se može vidjeti da s istom uzbudom (istosmjerna struja) parametri se ne mijenjaju.

Magnetska indukcija |B|	Air Coil	L_{Fe}/L_{Cu}=1,0	L_{Fe}/L_{Cu}=1,5	L_{Fe}/L_{Cu}=2,0	L_{Fe}/L_{Cu}=2,5	L_{Fe}/L_{Cu}=3,0
0,8 [T] 0,7 [T] 0,6 [T] 0,5 [T] 0,4 [T] 0,3 [T] 0,2 [T] 0,1 [T] 0,0 [T]						
Struja svitka I [A]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Napon svitka U [V]	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82
Ulančani tok Ψ [mWb]	0,212	1,00	1,28	1,43	1,52	1,58
Indukcija svitka L [μH]	21,2	100	128	143	152	158
Otpor svitka R [Ω]	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
Gubici u namotu P [W]	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2

Tab. 3.1.Usporedba magnetskih polja svitaka s drugačijim duljinama stupa jezgre i tabličnih podataka o električnim svitcima potrebnih za stvaranje modela s koncentriranim parametrima

Međutim, povećanje dužine jezgre proporcionalno je s povećanjem vrijednosti gustoće magnetskog toka u sredini svitka. Iz toga slijedi zaključak da je smanjen magnetski otpor magnetskog kruga, te da je dio magnetskog toka koji povezuje svitke i teče kroz jezgru postao veći (povećanje magnetskog toka s krajeva jezgre).



Sl. 3.4. Magnetska indukcija u središtu svitka u odnosu na omjer duljina jezgre i svitka

Odnosi tih magnetskih tokova su obrnuto proporcionalni iz čega slijedi da je to slučaj paralelno spojene reluktancije (magnetskog otpora). Daljnje povećanje duljine jezgre na duljinu 3 puta veću od duljine svitka ne utječe značajno na povećanje gustoće magnetskog toka, što služi kao indikator o odnosu između količina otpora.

Da bi se razumjelo modeliranje magnetskih krugova potrebno je odrediti magnetski otpor pojedinih dijelova magnetskog kruga. Uzbuda (NI) u središtu svitka pokreće magnetski tok (Φ R_m = NI) koji je podijeljen u dio koji prolazi kroz jezgru i obuhvaća sve namote svitka Φ_{Fe1} (magnetski otpor R_{Fe1}) i dio rasipnog magnetskog toka $\Phi_{\sigma 1}$ (magnetski otpor $R_{\sigma 1}$) koji se zatvara preko zraka na drugi kraj svitka (magnetski otpor $R_{\delta 1}$).

Dio magnetskog toka koji je prošao središnji dio jezgre je podijeljen na dio koji nastavlja prolaziti kroz jezgru prema svom kraju Φ_{Fe2} (magnetski otpor R_{Fe2}) i dio magnetskog toka koji izlazi iz jezgre $\Phi_{\sigma 2}$ (magnetski otpor $R_{\sigma 2}$) i kroz zrak se zatvara s drugim krajem jezgre (magnetski otpor $R_{\delta 2}$).

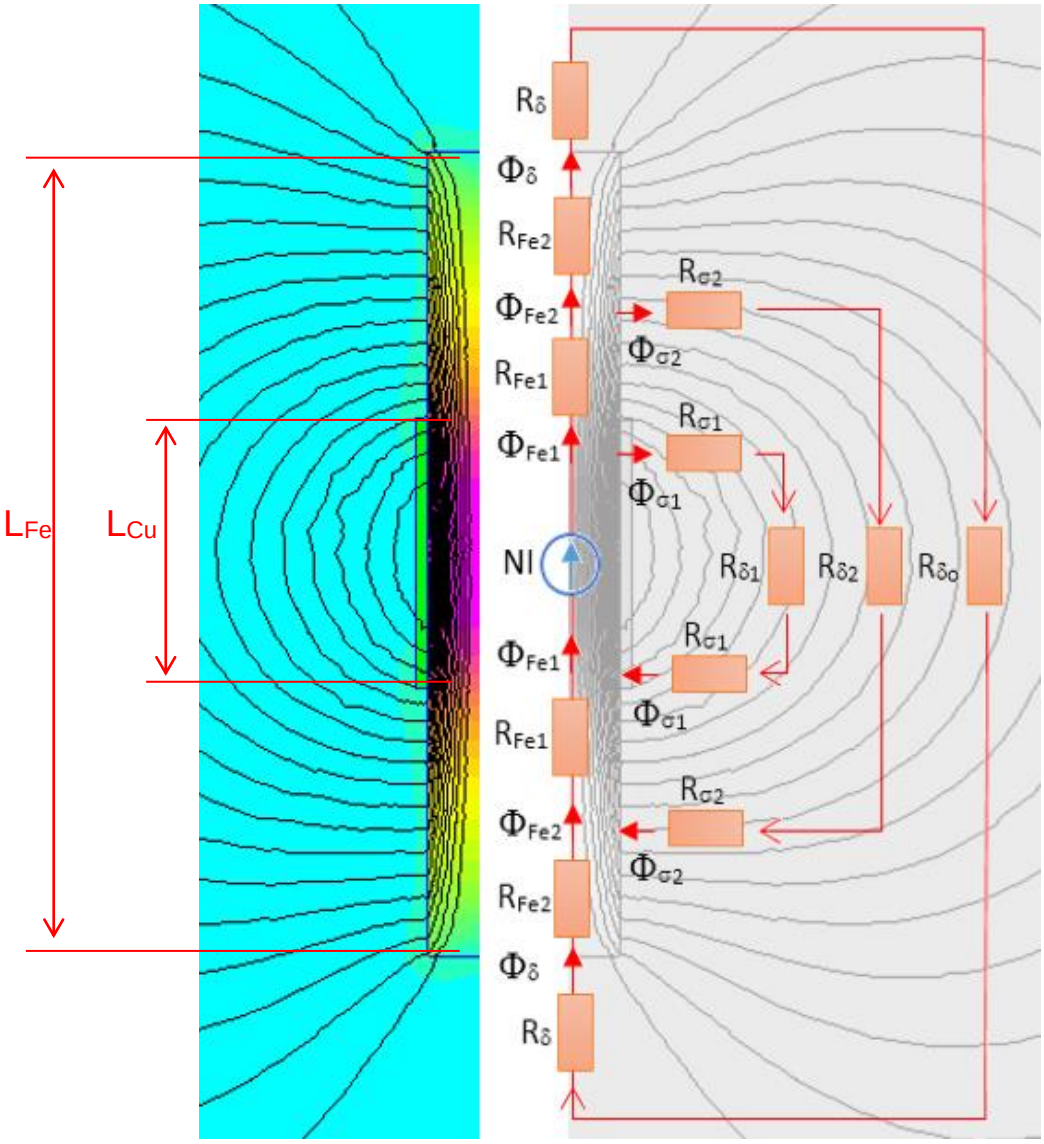
Konačno, preostali dio magnetskog toka koji je došao do kraja jezgre Φ_{δ}(magnetski otpor R_{δ}) istječe i preko zraka se zatvara s drugim krajem jezgre (magnetski otpor $R_{\delta 0}$).

Treba napomenuti da se niti jedan dio navedenog magnetskog toka se ne preklapa, već se svi slažu redom u paralelama od jezgre do beskonačnosti.

Na slici 3.5. prikazan je model magnetskog kruga s koncentriranim parametrima koji se sastoji od uzbudne grane i tri paralelne grane opterećenja. Iako takav složeni magnetski

krug djeluje kompliciranо, koristeći softver program za numeričko rješenje elektromagnetskih polja

(MKE - metoda konačnih elemenata), iz zadane konstrukcije, materijalnih svojstava i uzbude računa se magnetski tok pojedinih dijelova, kao i pad magnetskog napona na određenim dijelovima. [4, 5].

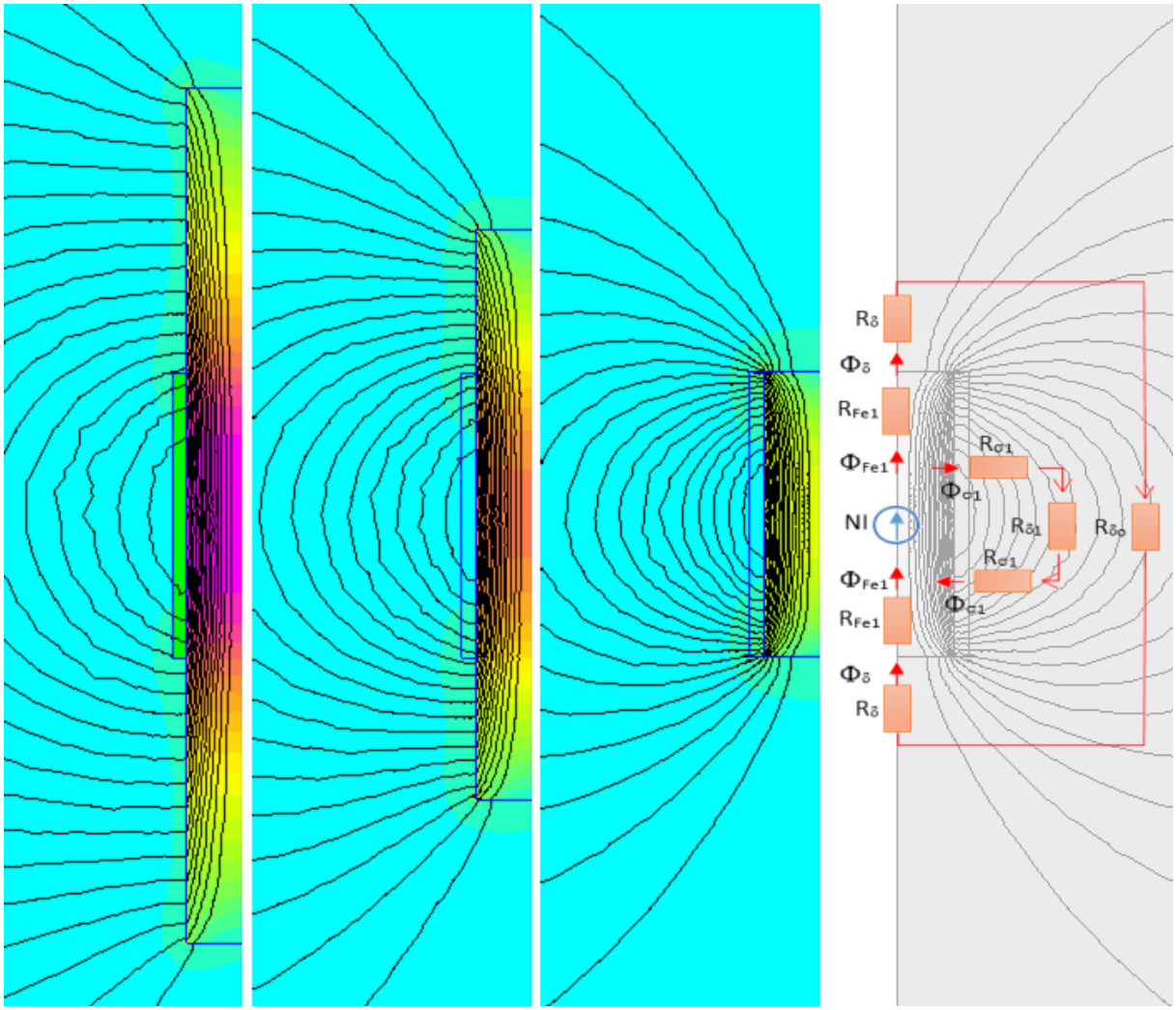


Sl. 3.5. Raspodjela toka na primjeru L(jezgre) > L(namota)
i pripadajući model koncentriranih parametara

Nakon analognog postupka, kada su jezgra i svitak jednake dužine (Lsvitka = Ljezgre) raspodjela magnetskog polja će imati samo dva magnetska toka ili će ekvivalentni model imati samo dvije paralelne grane opterećenja. To znači da će ukupni magnetski otpor

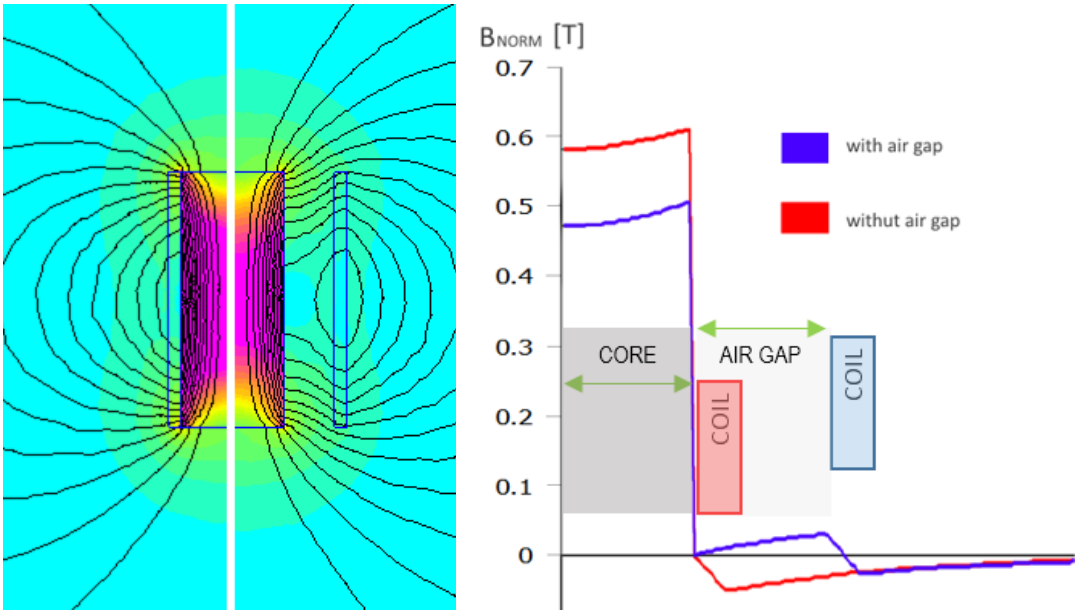
magnetskog kruga biti veći (pravilo o paralelnom spoju otpora), a gustoća toka u središtu svitka će se povećati za istu uzbudu (NI = konst).

Na slici 3.6 može se vidjeti promjena raspodjele magnetskog toka kod promjene visine stupa jezgre. Pri tome na krajnje desnoj slici prikaza raspodjele magnetskog polja je slučaj kada su visina stupa jezge i visina svitka jednaka. Na slici 3.6 desno prikazan je ekvivalentni magnetski krug koji u ovom slučaju ima samo dvije paralelne grane.



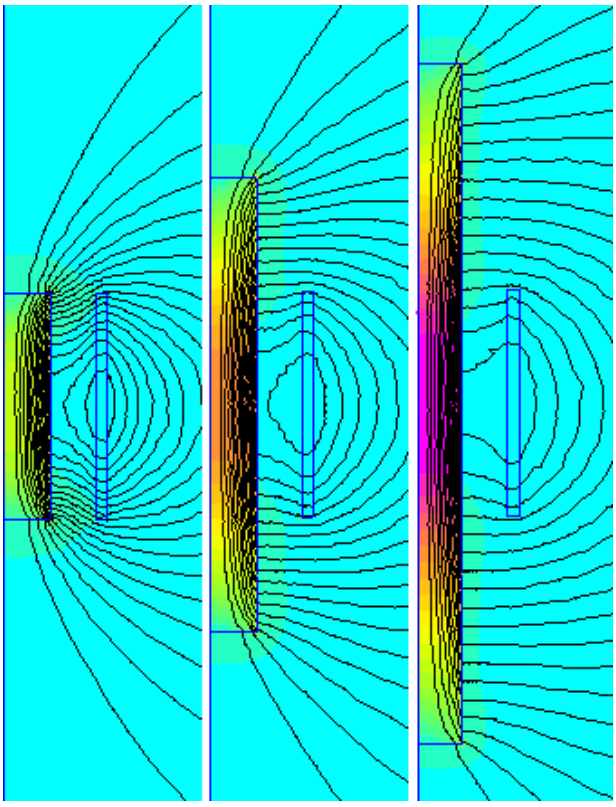
Sl. 3.6. Prijelazna promjena magnetskog polja s obzirom na duljinu jezgre i redukciju modela koncentriranih parametara u slučaju (Lsvitka=Ljezgre)

U slučaju povećanog zračnog raspora između svitka i jezgre (namot je odmaknut od stupa jezgre) kao rezultat pojavljuje se dodatni dio rasipnog toka između namotaja svitka i jezgre (slika 3.7.). Analogno prethodnom razmatranju ekvivalentne sheme uvodi se dodatan magnetski otpor što u konačnici smanjuje gustoću toka u središtu jezgre.



Sl. 3.7. Raspodjela toka u primjeru povećanog razmaka između svitaka i jezgre

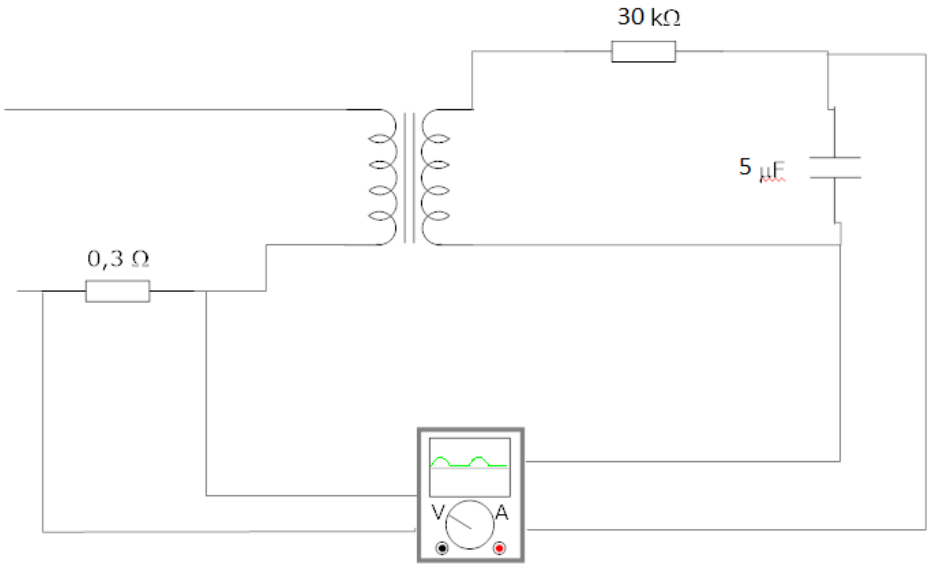
Analiza promjena u raspodjeli magnetskog polja u slučaju povećanog razmaka [6,7] između svitka i magnetske jezgre za različite dužine jezgre pokazuje da su prethodna razmatranja primjenjiva na ovu kombinaciju. Svaki od prethodnih fenomena neovisno čini preinake ekvivalentnom modelu koncentriranih parametara kao što je prikazano na slici 3.8.



Sl. 3.8. Raspodjela toka u primjeru udaljenosti između svitaka i jezgre za različite duljine jezgre

4. MJERENJA PARAMETARA TRANSFORMATORA SA POVEČANIM RASIPANJEM NAMOTA

Izvršeno je mjerenje ponovno namotanog transformatora gdje se između jezgre i primarnog namotaja nalaz zračni raspor kako je pokazano u prethodnim poglavljima. Mjeri se prema spoju i podacima iz slike 4.1.



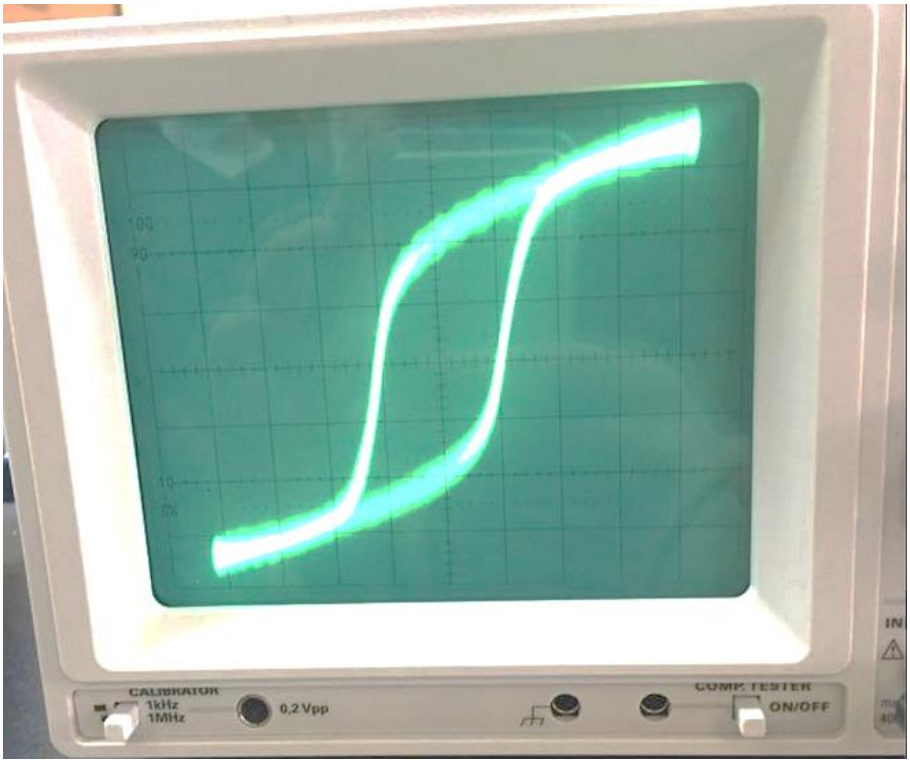
Sl. 4.1. Shema spoja transformatora sa zračnim rasporom

Na nazivnom naponu od U_{prim}=220V na sekundaru je izmjereno U_{sek}=1.161V

$$\text{PRIJENOSNI OMJER} = \frac{\text{Uprim}}{\text{Usek}} = \frac{\text{N1}}{\text{N2}} = \frac{220}{1.161} = 189 \approx 190$$

Iz ovog proizlazi da je N2=4 namotaja

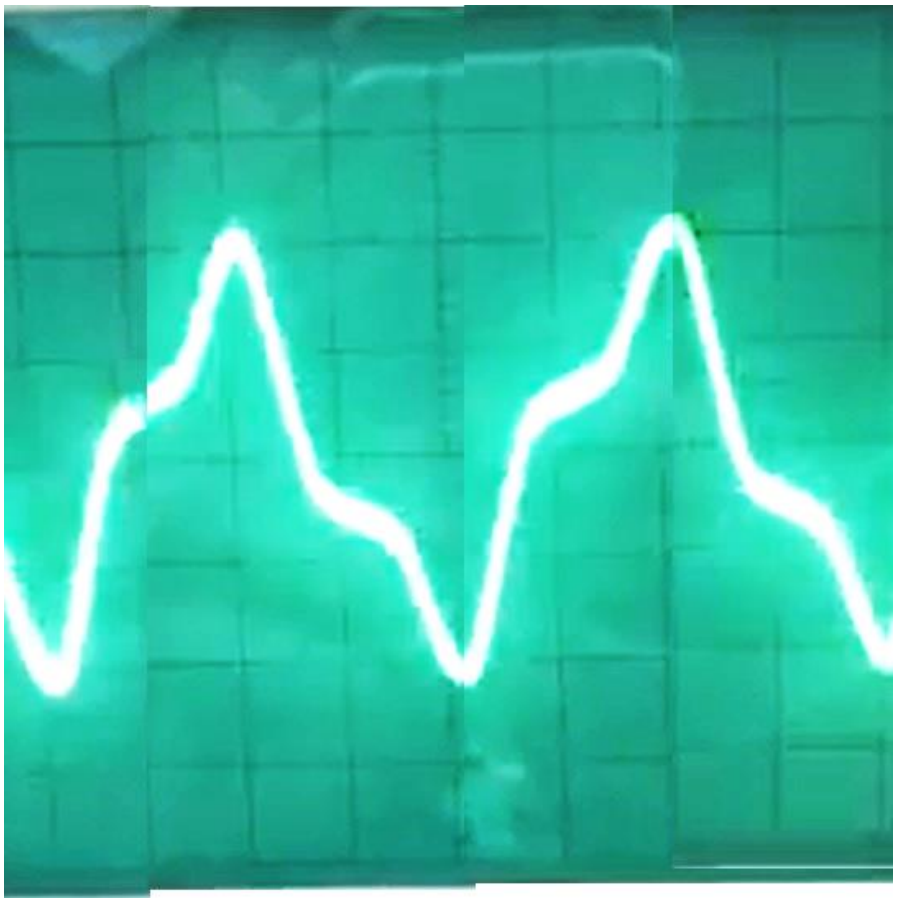
Izmjerena struja primara I_1=70.7mA



Sl. 4.2. Petlja histereze ponovno namotanog transformatora



Sl. 4.3. Podešenja osciloskopa pri snimanju petlje histereze transformatora sa zračnim rasporom



Sl. 4.4. Krivulja struje magnetiziranja jezgre transformatora sa zračnim rasporom



Sl. 4.5. Podešenja na osciloskopu pri snimanju krivulje struje magnetiziranja jezgre

5. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je modeliranje odnosno izrada trofaznog transformatora sa povećanim rasipnim tokovima radi proučavanja gubitaka transformatora. Prije samog modeliranja transformatora snimljena je petlja histereze postojećeg transformatora te se pomoću toga odredio broj zavoja na primarnoj kao i na sekundarnoj strani transformatora. Novim namatanjem transformatora postignut je razmak između namotaja primara i stupa jezgre kako bi se predočila promjena rasipnog magnetskog toka transformatora. Povećanjem zračnog raspora povećali su se i gubici odnosno rasipni magnetski tok transformatora. U prilogu se uz pomoć slika i tablica može vidjeti kako se promjenom konstrukcije željezne jezgre odnosno povećanjem njene visine rasipni magnetski tok smanjuje.

LITERATURA

[1] B. Mitraković,Transformatori, Naučna knjiga, Beograd 1985.

[2] B. Jakić, Numerički proračun reaktancija transformatora sa promjenjivom konstrukcijom željezne jezgre, Diplomski rad broj 2115, Osijek 2013.

[3] Enver Šehović, Mladen Tkalić, Ivan Felja : Osnove elektrotehnike - zbirka primjera, prvi dio; Školska knjiga, Zagreb 1989.

[4] Malešević Lj., Osnove elektrotehnike III Magnetizam, Sveučilište u Splitu, Split, 2004.

[5] Essert, Grilec, Žilić, Elektricitet i magnetizam, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.

[6] D. Koprivanac; Ž. Hederić, Proračun rasipnih reaktancija jednofaznog transformatora metodom konačnih elemenata *II Zbornik radova EIS 2009, 18. međunarodni simpozij "Elektroinženjerski simpozij" Dani Josipa Lončara I* Srb, Neven (ur.), Šibenik: Elektrotehničko društvo Zagreb, 2009. 158-163 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, stručni).

[7] Ž. Hederić; M. Barukčić; N. Raičević; N. Cvetković, Generating uniform magnetic field using Helmholtz coils system *II Proceedings of Abstracts 31. Kandó Conference 2015.* , Budapest: Óbudai University Kandó Kálmán Electrical Engineer Faculty, 2015. 88-88 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni).

[8] http://www.femm.info/

SAŽETAK

Cilj završnog rada je izrada trofaznog transformatora sa povećanim rasipnim tokovima. Modeliranjem trofaznog transformatora sa rasipnim tokovima postignuti su i određeni gubici transformatora odnosno povećan je rasipni magnetski tok. Prije samog modeliranja napravljena su određena mjerenja i proračuni transformatora te je snimljena petlja histereze. Nakon toga je transformator rastavljen i ponovno sastavljen ali sa zračnim rasporom između stupa jezgre i primarnog namota. To je ostvareno pomoću plastičnih uložaka koji su printani 3D printerom. Izvršena su nova mjerenja te je snimljena petlja histereze kao i struja magnetiziranja. U programskom paketu FEMM (Finite Element Method Magnetics) napravljene su određene simulacije koje ukazuju kako se rasipni magnetski tok mijenja s promjenom konstrukcije željezne jezgre.

Ključne riječi: trofazni transformator, zračni raspor, rasipni tok, magnetski tok.

ABSTRACT

TITLE: Modeling and development of a three-phase transformer with increased leakage flux for the purposes of studying the transformer losses.

The aim of the dissertation is the development of a three-phase transformer with increased leakage flux. Modeling the three-phase transformer with leakage fluxes resulted in certain losses in transformer and increased magnetic leakage flux. Before the modeling, the measurements and calculations of the transformer were made and the hysteresis loop was recorded. After that, the transformer was disassembled and re- assembled, but this time with an air gap between the core and the primary winding. This is achieved by using plastic cartridges that were made by a 3D printer. After this, new measurements were taken, the hysteresis loop was recorded and current magnetization was measured. Simulations that show how magnetic leakage flux changes when the structure of the iron core is altered were made in the program package FEMM (Finite Element Method Magnetics).

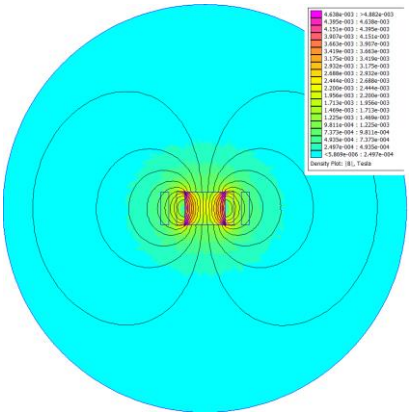
Key words: three-phase transformer, air gap, leakage flux, magnetic flux.

ŽIVOTOPIS

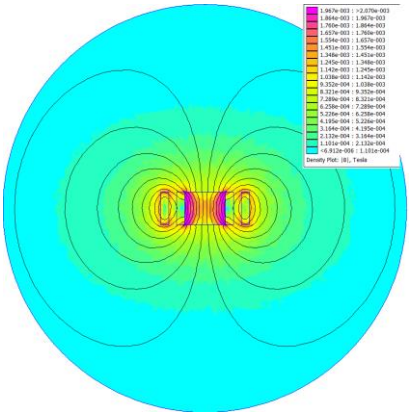
Hrvoje Vida rođen je 4. 11. 1986. godine u Našicama. Djetinjstvo provodi u Donjem Miholjcu gdje pohađa Osnovnu školu Augusta Harambašića. Nakon završetka osnovne škole upisuje Srednju školu u Valpovu, smjer elektrotehnika. Akademske godine 2005/2006. upisuje stručni studij na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, smjer elektroenergetika.

PRILOZI

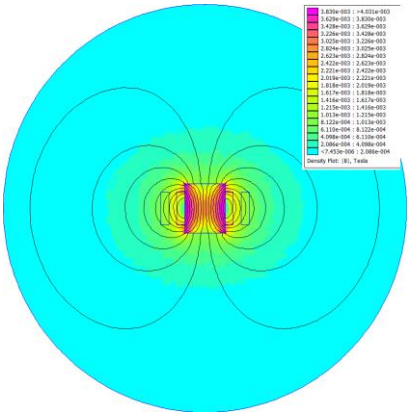
Na slijedećim stranicama su prikazane simulacije u programu FEMM (Finite Element Method Magnetics) [8] te tablice pomoću kojih je prikazana promjena magnetskog toka sa promjenom konstrukcije željezne jezgre.



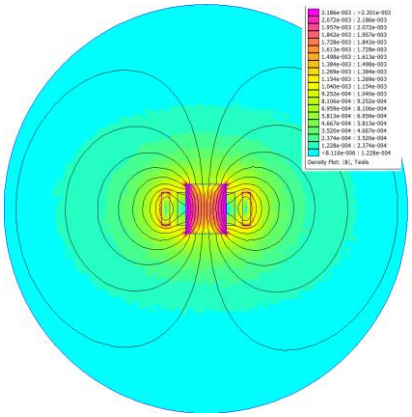
Slika 1a.



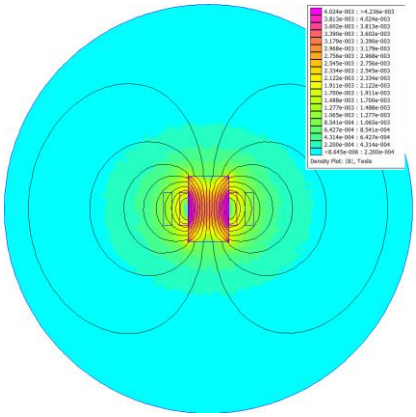
Slika 1b.



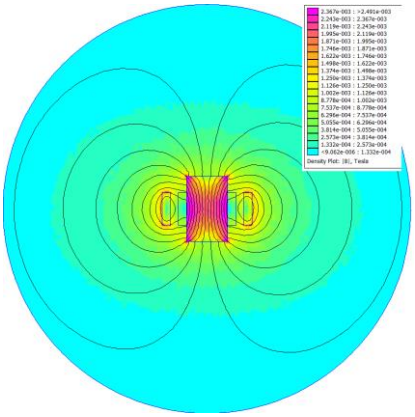
Slika 2a.



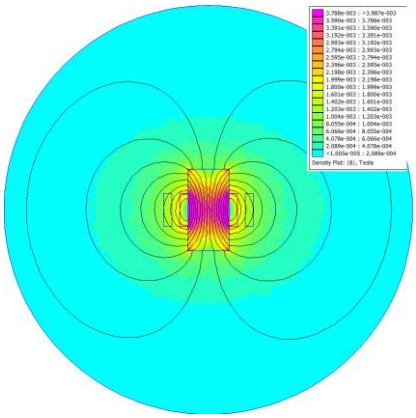
Slika 2b.



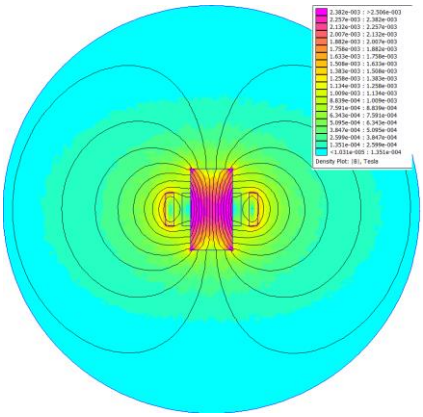
Slika 3a.



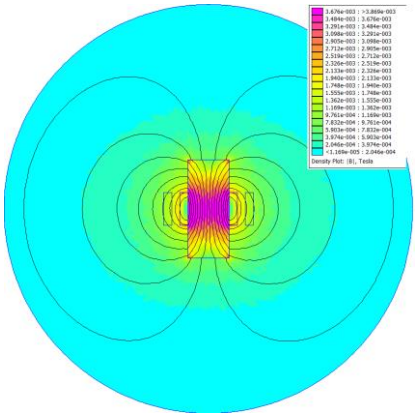
Slika 3b.



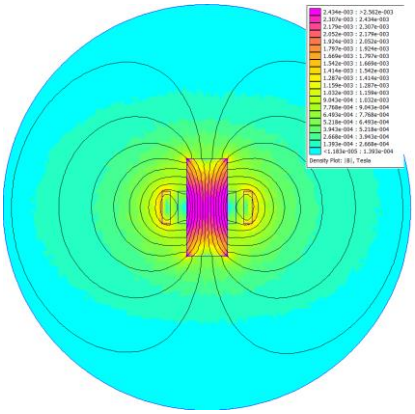
Slika 4a.



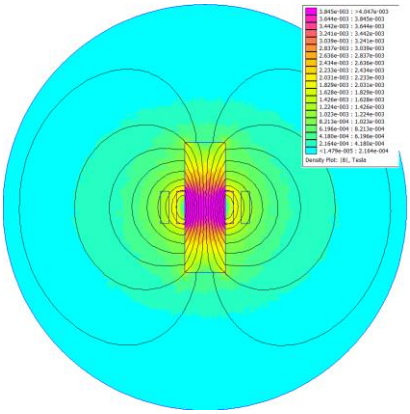
Slika 4b.



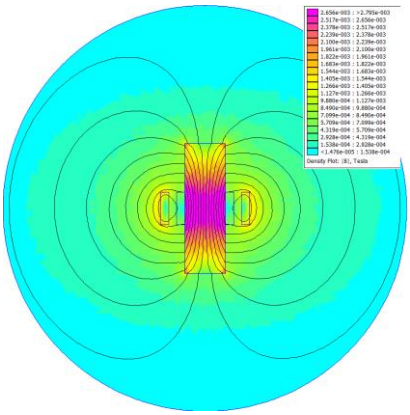
Slika 5a.



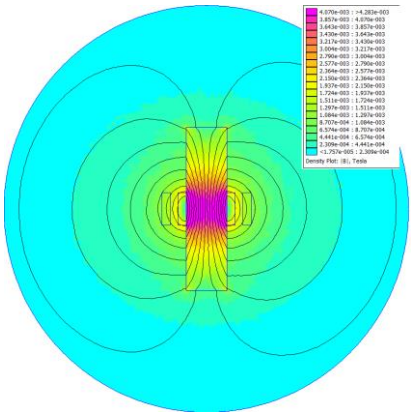
Slika 5b.



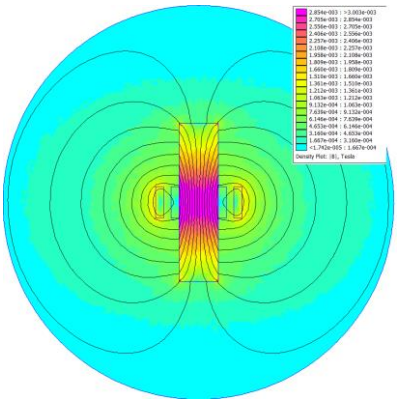
Slika 6a.



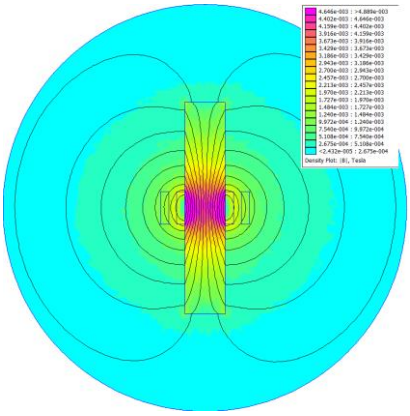
Slika 6b.



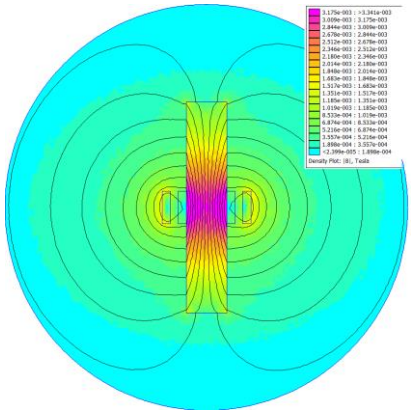
Slika 7a.



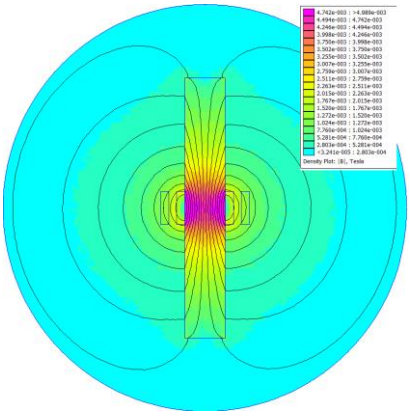
Slika 7b.



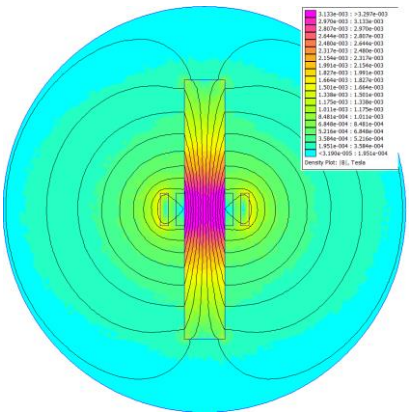
Slika 8a.



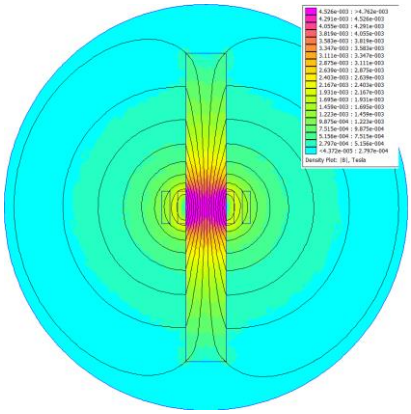
Slika 8b.



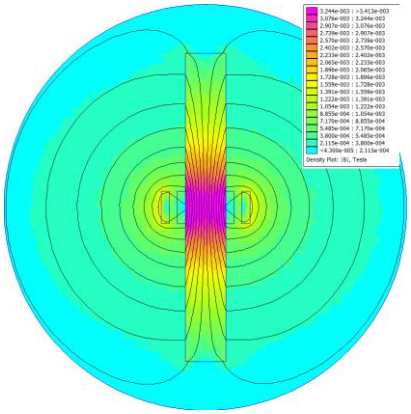
Slika 9a.



Slika 9b.



Slika 10a.



Slika 10b.

SLIKA	JAKOST MAGNETSKOG TOKA (mWebers)	VISINA ŽELJEZNE JEZGRE (mm)
1a.	12.33	40
2a.	14.86	60
3a.	16.52	80
4a.	17.80	100
5a.	18.77	120
6a.	20.24	160
7a.	21.25	200
8a.	22.24	260
9a.	22.84	320
10a.	23.18	380

Tablica 1. Jakost magnetskog polja kada nema zračnog raspora

SLIKA	JAKOST MAGNETSKOG TOKA (mWebers)	GLAVNI MAGNETSKI TOK (mWebers)	RASIPNI MAGNETSKI TOK(mWebers)	VISINA ŽELJEZNE JEZGRE (mm)
1b.	10.38	8.47	2.39	40
2b.	11.62	9.99	2.14	60
3b.	12.70	11.36	2.01	80
4b.	13.68	12.41	1.86	100
5b.	14.48	13.19	1.84	120
6b.	15.79	14.59	1.80	160
7b.	16.72	15.55	1.79	200
8b.	17.64	16.40	1.78	260
9b.	18.23	17.07	1.75	320
10b.	18.52	17.23	1.74	380

Tablica 2: Jakost magnetskog toka kada postoji zračni raspor između jezgre i primarnog namota