

# Određivanje remanentnog magnetskog toka energetskog transformatora s pomoću istosmjernog izvora male snage

---

Tolić, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*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:200:191349>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**ODREĐIVANJE REMANENTNOG MAGNETSKOG  
TOKA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA S  
POMOĆU ISTOSMJERNOG IZVORA MALE SNAGE**

**Diplomski rad**

**Ante Tolić**

**Osijek, 2020.**

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. VAŽNOST ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA .....	2
2.1. Smanjenje udarne struje magnetiziranja .....	4
2.2. Sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora .....	6
2.3. Pojava ferorezonancije .....	7
3. METODE ZA ODREĐIVANJE REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA .....	9
4. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA S POMOĆI ISTOSMJERNOG IZVORA MALE SNAGE .....	13
4.1. Teorijski opis metode .....	13
4.2. Laboratorijski postav i mjerni postupak .....	16
4.3. Rezultati mjerenja .....	22
5. ZAKLJUČAK .....	33
LITERATURA .....	34
SAŽETAK .....	36
ŽIVOTOPIS .....	37
PRILOZI .....	38
PRILOG P.4.1. Prikaz programskog koda u MATLAB-u za dobivanje odziva struje magnetiziranja, magnetskog toka i napona sekundara u ovisnosti o vremenu .....	38
PRILOG P.4.2. Prikaz programskog koda u MATLAB-u za dobivanje odziva struje magnetiziranja u ovisnosti o magnetskom toku (odziv putanje radne točke) .....	39

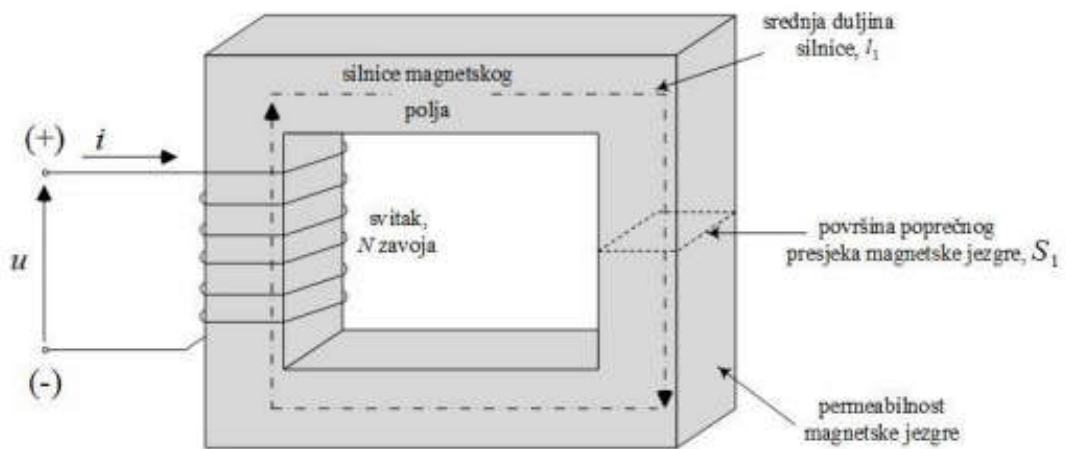
## 1. UVOD

U elektroenergetskim sustavima važnu ulogu imaju energetske transformatori kojima se vrši transformacija električne energije s jedne na drugu naponsku razinu. Zbog njihove važnosti, potrebno je prilikom isklopa energetskih transformatora s napajanja voditi brigu o mogućim pojavama unutar samih energetskih transformatora. Jedna od pojava je remanentni magnetski tok koji ostaje unutar feromagnetske jezgre energetskih transformatora. Remanentni magnetski tok može prouzrokovati probleme u radu elektroenergetskog sustava ako njegov iznos nije uzet u obzir, tj. određen. Problemi koji mogu nastati su pojava zasićenja jezgre strujnog transformatora, udarne struje magnetiziranja i pojava ferorezonancije. Rješenje problema je primjena neke od metoda za određivanje iznosa remanentnog magnetskog toka.

U ovog diplomskog radu, opisana je i primjenjena metoda određivanja remanentnog magnetskog toka s pomoću istosmjernog izvora male snage. Realizacija metode provedena je postavljanjem odgovarajućeg mjernog kruga, snimanjem valnih oblika struje magnetiziranja i napona na sekundaru s pomoću sklopova spojenih na računalo te njihovom obradom korištenjem programskog paketa MATLAB. U drugom poglavlju ovog diplomskog rada, ukratko je opisan princip rada energetskih transformatora, kao i važnost određivanja remanentnog magnetskog toka u raznim primjenama u praksi. U trećem poglavlju navedeno je pet metoda za određivanje remanentnog magnetskog toka te njihove prednosti i nedostaci. U četvrtom poglavlju detaljno je opisana metoda i laboratorijski postav za određivanje remanentnog magnetskog toka s pomoću istosmjernog izvora male snage. Prikazani su i analizirani rezultati mjerenja te su tablično prikazane vrijednosti izračunatog remanentnog magnetskog toka. U petom poglavlju izveden je zaključak.

## 2. VAŽNOST ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA

Svaki energetski transformator radi na principu elektromagnetske indukcije, odnosno elektromagneta koji se sastoji od električne zavojnice (svitka) s  $N$  zavoja, kojom protječe električna struja koja proizvodi magnetsko polje, te feromagnetske jezgre u kojoj se ulančuju magnetske silnice i stvaraju magnetski tok koji se zatvara u samoj jezgri, što je vidljivo na slici 2.1.[1].



Slika 2.1. Prikaz jednostavnog magnetskog kruga

Mjerna jedinica magnetskog toka u jezgri je veber [Wb]. Magnetski tok se označava velikim grčkim slovom  $\Phi$ , a ukupni magnetski tok kroz površinu poprečnog presjeka magnetske jezgre  $S$  jednak je:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}, \quad (2-1)$$

gdje je:

$\Phi$  – magnetski tok [Wb],

$S$  – površina poprečnog presjeka magnetske jezgre [ $\text{m}^2$ ],

$B$  – magnetska indukcija [T],[1].

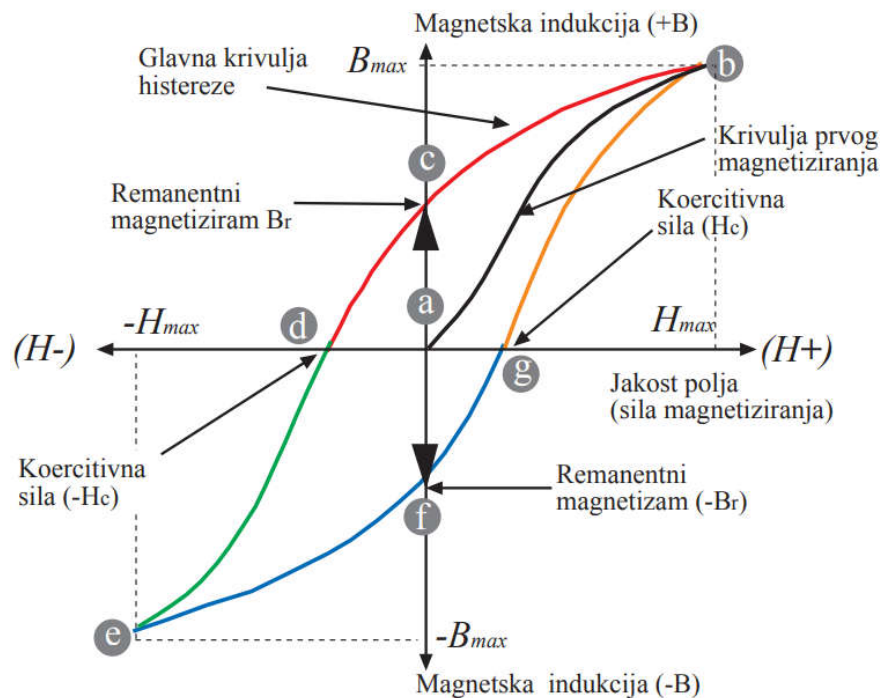
Jezgra energetskog transformatora važna je u energetskej pretvorbi. Tip i materijal od kojega je jezgra napravljena (dinamo lim, tvrdi i meki čelik) su neki od faktora koji utječu na vrijednost remanentnog magnetskog toka koji se pojavljuje u jezgri prilikom isključenja energetskog transformatora s napajanja. Remanentni magnetski tok se još može nazivati i remanencija.

Magnetska permeabilnost materijala  $\mu$  [H/m] čini vezu između magnetskog polja  $H$  i gustoće magnetskog toka, tj. magnetske indukcije  $B$ , a njihova ovisnost je:

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (2-2)$$

Funkcijska ovisnost magnetskog polja  $H$  i magnetske indukcije  $B$  ( $B = f(H)$ ) tvori petlju histereze (Slika 2.2.[2]).

Petlja histereze može se prikazati i kao  $\varphi$ - $i$  karakteristika uz odgovarajuće konstante proporcionalnosti te će imati isti oblik kao i  $B$ - $H$  karakteristika, ali će tada prikazivati ovisnost magnetskog toka  $\varphi$  o struji magnetiziranja  $i$ .



**Slika 2.2.** Petlja histereze kao  $B$ - $H$  karakteritika

Krivulja između točki (a) i (b) na slici 2.2. naziva se krivulja prvog magnetiziranja. Nakon točke (b), magnetska indukcija i jakost polja počinju opadati. Kada jakost polja padne na vrijednost nula zbog histereznosti krivulje, što je predočeno zaostajanjem magnetske indukcije  $B$  za jakosti magnetskog polja  $H$ , magnetska indukcija u točki (c) ne pada na vrijednost nula i to se naziva remanentni magnetizam  $B_r$ , koji se može poništiti, odnosno dovesti na vrijednost nula uz pomoć negativne uzbuđene, tj. koercitivne sile  $H_c$ , čija je vrijednost vidljiva u točkama (d) i (g) [2].

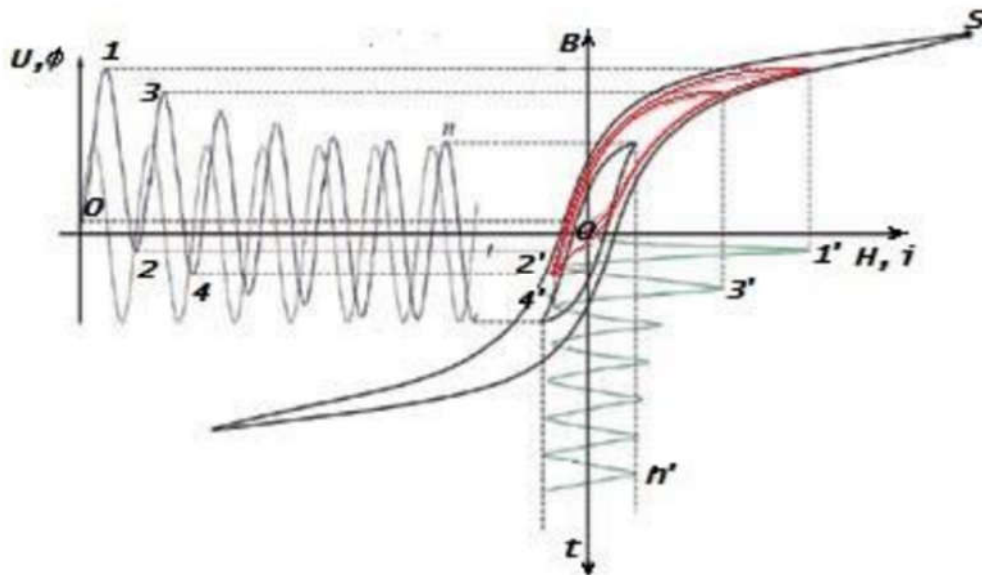
Prilikom isklopa, vrijednost remanentnog magnetskog toka kod većine magnetskih materijala ne prelazi 50 % maksimalnog magnetskog toka koji djeluje u stacionarnom stanju [3]. Remanentni magnetski tok koji ostaje u zatvorenoj jezgri, ne može se izravno mjeriti, a da se ne vrši fizička intervencija nad jezgrom. Također, remanentni magnetski tok je konstantna vrijednost pa se ne može niti neizravno mjeriti jer ne inducira nikakav napon na priključnicama [4]. Međutim, određivanje remanentnog magnetskog toka od velike je važnosti jer se na taj način mogu smanjiti udarne struje magnetiziranja, spriječiti zasićenje jezgre strujnog transformatora, te isto tako i predvidjeti pojava ferorezonancije i to metodama koje će biti navedene i opisane u trećem poglavlju diplomskog rada.

## 2.1. Smanjenje udarne struje magnetiziranja

Zbog svojstva induktivnosti, energetski transformator kao i svaki električni stroj, pri uklapanju ima posljedicu da se opire promjeni magnetskog toka, što je poznato kao Lenzovo pravilo. Do nadvišenja struje, odnosno udarne struje dolazi upravo zbog takvog opiranja i to do deset puta veće vrijednosti struje od nazivne vrijednosti struje transformatora. Također, dolazi i do pojave istosmjerne komponente struje magnetiziranja te asimetrije valnog oblika [3]. Valni oblik i vršna vrijednost udarne struje te trajanje tranzijenata ovisi o nekoliko faktora od kojih najveći utjecaj imaju fazni kut uklopa napona napajanja, remanentni magnetski tok u jezgri u trenutku uklopa, petlja histereze (magnetska karakteristika jezgre) te djelatni otpor namota. Ostali faktori o kojima ovisi udarna struja su konstrukcija energetskog transformatora, vrsta spoja namota trofaznog energetskog transformatora, topologija mreže i karakteristika prekidača [4].

Problemi koji mogu nastati pri velikoj udarnoj struji su kvarovi ili problemi s radom zaštitnih releja i osigurača, mehanička oštećenja izolacije, kao i samih namota transformatora, rezonancija te propadi napona [5].

Detaljan prikaz nastajanja unutarnje putanje magnetiziranja, kao i ovisnost električnih i magnetskih veličina u nelinearnom magnetskom krugu i prikaz valnog oblika udarne struje, vidljiv je na slici 2.3.



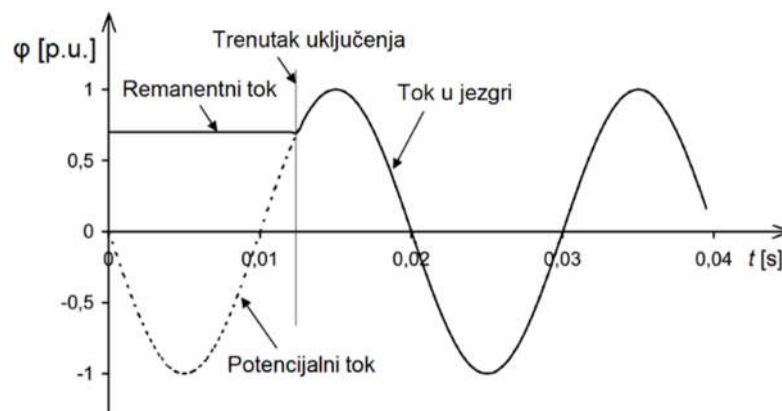
**Slika 2.3.** Prikaz magnetskih i električnih veličina u nelinearnom magnetskom krugu i načelni prikaz formiranja unutarnje putanje magnetiziranja

U jezgri transformatora, magnetski tok je razmjernan integralu napona kojim se napaja transformator. Magnetski tok ima amplitudu konstantne vrijednosti, no sadrži i istosmjernu komponentu, a njezino trajanje ovisi o induktivnom te radnom otporu promatranog strujnog kruga [5]. Na slici 2.3., točkom (1) označen je maksimalni magnetski tok, a zbog promjene derivacije magnetskog toka u toj točki, ona se nalazi na vrhu odgovarajuće putanje magnetiziranja, a sukladno magnetskom toku, s točkom (1') označena je pripadajuća udarna struja magnetiziranja (Slika 2.3. [5]).

Upravljivo ili kontrolirano uklapanje koristi se kao najčešće rješenje smanjena udarnih struja prilikom magnetiziranja, odnosno uklopa energetskih transformatora na napajanje. Pod pojmom idealni uklop, smatra se da bi remanentni magnetski tok bio jednak magnetskom toku u jezgri kojega bi uzrokovao napon na koji se transformator uklapa. Prilikom prolaska sinkronizacijskog signala kroz vrijednost nula, fazni kut za idealni uklop tada je jednak faznom kutu prijašnjeg isklopa [5]. Optimalan trenutak uklopa je onaj pri kojemu se tok jednak onome da je



transformator uklopljen na napon u ustaljenom stanju, a naziva se potencijalni tok, izjednači sa remanentnim magnetskim tokom (Slika 2.4. [5]).



**Slika 2.4.** Optimalni trenutak uklopa energetskog jednofaznog transformatora na izvor napajanja uz remanentni tok

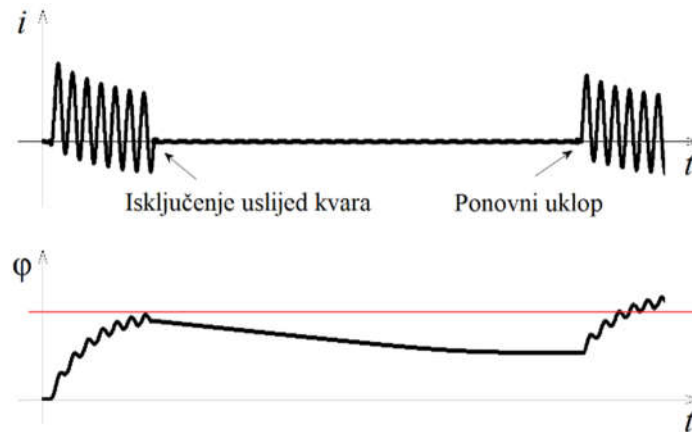
U slučaju ranijeg uklopa transformatora na napajanje, odnosno kada se potencijalni tok razlikuje od remanentnog magnetskog toka, došlo bi do naglog povećanja magnetskog toka u odnosu na amplitudu potencijalnog toka, što bi dovelo jezgru u zasićenje te prouzrokovalo veliku udarnu struju magnetiziranja.

Neka od rješenja za smanjenje udarne struje magnetiziranja također su i promjena položaja namota na transformatoru [6], uporaba serijskih otpora [7] i uporaba virtualnih zračnih rasporeda [8].

## 2.2. Sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora

Remanentni magnetski tok ima veliki utjecaj na zasićenje strujnog transformatora jer unosi distorzije, tj. stvara poremećaj u izlaznim signalima i signalima koji se šalju do zaštitnih releja i uređaja, što loše utječe na njihov ispravan rad. Remanentni magnetski tok ima veliki utjecaj prilikom prijelaznih stanja, dok je u ustaljenom stanju strujnog transformatora magnetski tok koji se nalazi u jezgri malen te je također i struja magnetiziranja vrlo male vrijednosti. Stoga, remanentni magnetski tok nema utjecaja, odnosno ne dovodi jezgru u zasićenje u ustaljenom stanju [4]. Najbolji primjer je kada sustav radi u režimu automatskog ponovnog uklopa. U takvom režimu rada, prilikom dolaska do kvara dolazi i do isklopa prekidača, dok u jezgri ostaje određena vrijednost remanentnog magnetskog toka koji će u kratkom roku, prilikom automatskog uklopa sustava, dovesti jezgru u zasićenje, a ako kvar nije u zadanom intervalu

otklonjen, uzrokovat će velike poremećaje i deformacije u izlaznim signalima strujnog transformatora [9]. Do zasićenja strujnog transformatora u ovakvom režimu rada dolazi zbog toga što se remanentni magnetski tok, bez dodatnog izvora, ne može drastično smanjiti do trenutka kada se događa ponovni uklop i tada jezgra strujnog transformatora vrlo brzo ulazi u zasićenje što je vidljivo na slici 2.5. [10].



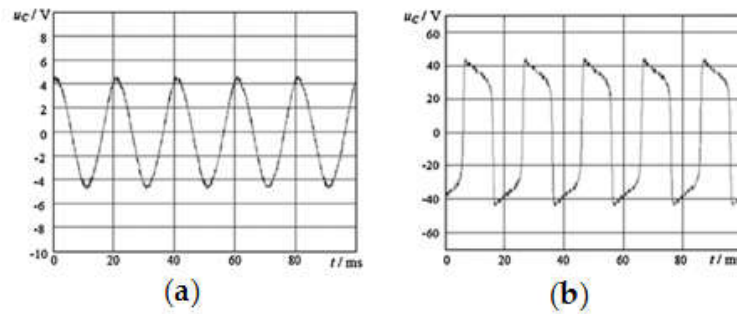
**Slika 2.5.** Prikaz struje kvara i magnetskog toka strujnog transformatora u režimu automatskog uklapa

Na slici 2.5., vidljivo je i da magnetski tok ovisi o vršnoj vrijednosti struje prilikom kvara, tj. struji kvara te trenutku isključenja uslijed kvara. Kako bi se spriječila pojava zasićenja strujnog transformatora, koji je u režimu automatskog uklapa, u intervalu između isključenja i ponovnog uklapa potrebna je demagnetizacija jezgre jer je jedna od metoda koja ne utječe na strukturu samog strujnog transformatora te ujedno i najjeftinija metoda za sprječavanje zasićenja jezgre [4]. Jedna od metoda za smanjenje zasićenja jezgre strujnog transformatora je i metoda kompenzacije struje navedena u [11].

### 2.3. Pojava ferorezonancije

Ferorezonancija predstavlja prelazak iz monoharmonijskog ustaljenog stanja u višeharmonijsko ustaljeno stanje, gdje su prisutni veći iznosi varijabli stanja od nazivnih (Slika 2.6. [4]). Karakterizirana je prenaponima i izobličenim valnim oblicima napona i struje [12]. Uslijed pojave prenapona, koje prouzrokuje ferorezonancija, dolazi do oštećenja mjerne opreme. Ferorezonantnim stanjima smatraju se sva ustaljena stanja, osim monoharmonijskih [4].

Na slici 2.6. prikazani su monoharmonijsko ustaljeno stanje (a) i ferorezonantno ustaljeno stanje (b) napona kondenzatora  $u_c$  u ferorezonantnom krugu pod istim naponom napajanja.



**Slika 2.6.** Monoharmonijsko (a) i ferorezonantno (b) ustaljeno stanje prikazano signalima napona kondenzatora

Pojava ferorezonancije rijetko se javlja i teško ju je predvidjeti zbog nedovoljno preciznog mjerenja početnih uvjeta. Stoga se i određuje remanentni magnetski tok, kako bi se pronašla ovisnost pojave ferorezonancije o početnim uvjetima. Metoda koja se koristi kako bi se odredio remanentni magnetski tok u ovoj primjeni je metoda snimanja napon na priključnicama transformatora za vrijeme isključivanja napajanja [4].

### 3. METODE ZA ODREĐIVANJE REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA

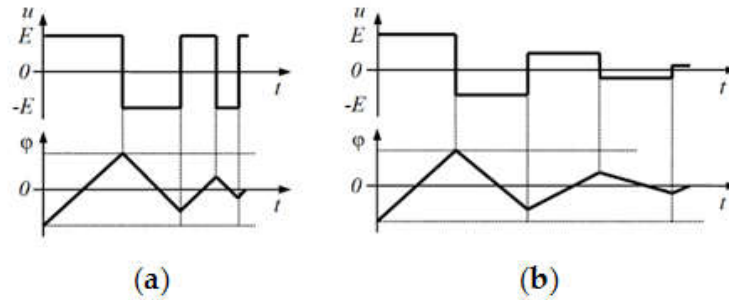
Za neizravno određivanje remanentnog magnetskog toka u energetskim transformatorima primjenjuje se pet metoda za navedena i objašnjena područja primjene u drugom poglavlju, koja govore o važnosti određivanja remanentnog magnetskog toka. Nakon objašnjena važnosti zbog koje se određuje remanentni magnetski tok, potrebno je navesti i koje su metode pogodne za određivanje remanentnog magnetskog toka, koje se metode najčešće primjenjuju te koje su isplativije, kao i njihove prednosti i nedostaci koji se pojavljuju prilikom njihove realizacije. Podjela metoda po područjima u kojima se primjenjuju i njihovi nazivi prikazani su tablicom 3.1., a njihovi opisi nalaze se u nastavku poglavlja.

**Tablica 3.1.** Metode određivanja remanentnog magnetskog toka i odgovarajuća područja primjene

<b>Metoda</b>	<b>Područja primjene</b>
<b>Snimanje napona na priključnicama prilikom isključenja transformatora s napajanja</b>	Smanjenje udarne struje magnetiziranja i pojava ferorezonancije
<b>Demagnetiziranje</b>	Smanjenje udarne struje magnetiziranja I sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora
<b>Predmagnetiziranje</b>	Smanjenje udarne struje magnetiziranja
<b>Mjerenje rasipnog toka</b>	Smanjenje udarne struje magnetiziranja
<b>Analiziranje valnog oblika udarne struje magnetiziranja</b>	Smanjenje udarne struje magnetiziranja

Metoda snimanja napona na priključnicama prilikom isključivanja transformatora s napajanja jedna je od najčešće korištenih metoda u praksi. Koristi se na način da se u trenutku prije isključenja, tj. isklopa transformatora s napajanja, snimi napon na priključnicama transformatora. Tako snimljeni napon se integrira, uz pretpostavku da se dobiveni remanentni magnetski tok neće mijenjati u periodu od isklopa transformatora pa sve do njegovog ponovnog uklopa. Ova metoda koristi se u područjima primjene kao što su smanjenje udarne struje magnetiziranja i kao jedina metoda u području pojave ferorezonancije. Prednost ove metode je to što je vrlo jednostavna jer se određivanje remanentnog magnetskog toka provodi samo uz pomoć snimljenog napona i njegovog integriranja. Jeftina je za realizaciju jer neki transformatori već koriste sustave koji ih nadziru te koji se mogu iskoristiti za snimanje napona i njegovo mjerenje. Nedostatak metode je da u nekim slučajevima ne postoje sustavi za nadzor te samim time ona nije više tako jeftina za realizaciju [4]. Dodatno, nedostatak je i njezina nepouzdanost. Naime, zbog mogućnosti pojave trazijenata u sustavu, remanentni magnetski tok neće ostati isti pri ponovnom uklopu transformatora kao pri isklopu [13].

Demagnetiziranje se koristi za smanjenje udarne struje magnetiziranja, kao i kod sprječavanja zasićenja jezgre strujnog transformatora, ali na način da vrijednost remanentnog magnetskog toka neće biti poznata vrijednost. Svrha ove metode je da se remanentni magnetski tok koji se nalazi u jezgri svede na vrijednost nula, s neke otprije nepoznate vrijednosti remanentnog magnetskog toka [4]. Postoje različiti način provedbe metode demagnetiziranja, a to su izmjenično demagnetiziranje koje se provodi uz pomoć izmjeničnog naponskog izvora i podmetoda kao što su metode CVVF (engl. *Constant Voltage Variable Frequency*) i VVCF (engl. *Variable Voltage Constant Frequency*). Metoda CVVF se provodi uz pomoć istosmjernog napona koji ima konstantnu vrijednost, ali se mijenjanjem frekvencije remanentni magnetski tok postavlja u nulu, dok VVCF metoda koristi istosmjerni napon promjenjivog napona, ali konstantne frekvencije te na taj način dovodi remanentni magnetski tok na vrijednost nula (Slika 3.7.) [14].



**Slika 3.7.** CVVF metoda (a) i VVCF metoda (b)

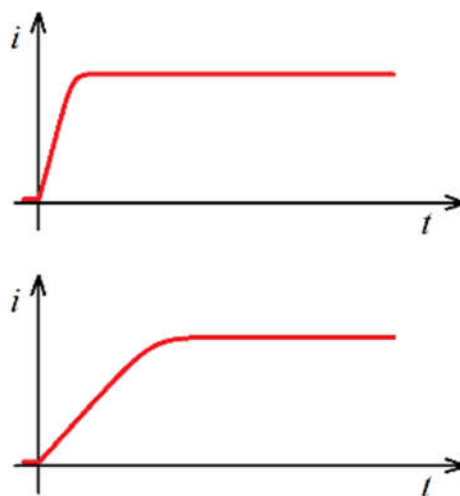
Prednost ove metode je ta što se vrlo pouzdano i brzo može izvršiti demagnetiziranje jezgre u slučaju sprječavanja zasićenja jezgre strujnog transformatora, dok kod smanjenja udarne struje magnetiziranja ova metoda bi trebala tvoriti kombinaciju s kontroliranim uklopom transformatora jer je za to potrebno znati pravu vrijednost remanentnog magnetskog toka, što se demagnetiziranjem omogućuje. Nedostatak ove metode je što su za njezinu realizaciju potrebni dodatni sklopovi te poznavanje mnogih parametara transformatora, kao i duže vrijeme demagnetizacije kod većih energetske transformatora [4].

Predmagnetiziranje se koristi samo u području smanjenja udarne struje magnetiziranja. Prava vrijednost remanentnog magnetskog toka se ne može odrediti, nego se remanentni magnetski tok postavlja s neke nepoznate vrijednosti na najveću vrijednost remanentnog magnetskog toka, koja može biti pozitivna ili negativna, i to u periodu prije uključivanja transformatora, te se tako optimalni kut uklopa može lako utvrditi. Proces metode predmagnetiziranja izvršava se tako što se najprije mora iz petlje histereze promatranog transformatora odrediti maksimalni iznos remanentnog magnetskog toka. Nakon toga, injektiranjem struje zasićenja u namote transformatora, približno se postavlja magnetski tok na najveću vrijednost, a zatim se struja snižava na vrijednost nula [4]. Prednosti i nedostaci ove metode isti su kao i kod metode demagnetiziranja.

Osnovna zamisao metode za mjerenje rasipnog toka je da se remanentni magnetski tok odredi iz mjerenja magnetskog toka u blizini namagnetizirane jezgre. Proces provođenja metode za mjerenje rasipnog toka vrši se kada transformator nije priključen na napon. Magnetski tok koji se mjeri sačinjen je od magnetskog toka Zemlje i rasipnog magnetskog toka, te je uz pomoć razvijenih algoritama potrebno razdvojiti, tj. izdvojiti rasipni magnetski tok od ukupnog magnetskog toka. Prije svega, potrebno je odrediti prijenosnu funkciju između unutarnjeg toka i rasipnog magnetskog toka, gdje se unutarnji magnetski tok određuje integriranjem napona na sekundaru u ustaljenom stanju kada je primar na nazivnom naponu. Mjerenja se provode s

pomoću sonde koje su instalirane u blizini jezgre kako bi se mogao mjeriti rasipni magnetski tok prije uklopa te se zatim preko određene prijenosne funkcije izračunava remanentni magnetski tok [15]. Prednost ove metode je što se prilikom mjerenja u obzir uzimaju sve promjene remanentnog magnetskog toka, a nedostatak je što je skupa i složena za realizaciju.

Metoda analize valnog oblika udarne struje magnetiziranja provodi se na način da se transformator napaja istosmjernim izvorom niskog napona te se iz snimljenih valnih oblika struje magnetiziranja određuje remanentni magnetski tok. Prije provedbe ove metode potrebno je obaviti snimanje odziva transformatora pri različitim vrijednostima remanentnog magnetskog toka te ih spremiti (Slika 3.8. [4]). Spremljeni odzivi se uspoređuju s novo dobivenim odzivom struje magnetiziranja te se na taj način odredi pri kojem remanentnom magnetskom toku se takav oblik odziva struje pojavljuje [16]. Prednost ove metode ista je kao i kod metode mjerenja rasipnog magnetskog toka, a to je da se u obzir uzimaju sve promjene remanentnog magnetskog toka. Nedostatak je što se nakon mjerenja poništava prethodni remanentni magnetski tok i postavlja ga se na najveću vrijednost [4]. Prikaz različitih odziva struje magnetiziranja za isti napon napajanja, ali različit remanentni magnetski tok vidljiv je na slici 3.8.

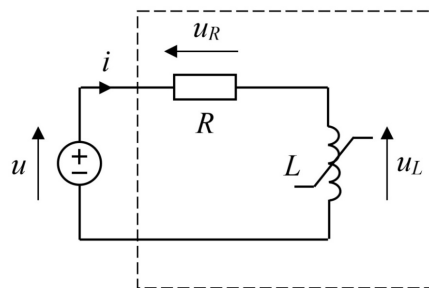


**Slika 3.8.** Prikaz odziva struje magnetiziranja za različiti remanentni magnetski tok, ali isti napon napajanja

## 4. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA S POMOĆI ISTOSMJERNOG IZVORA MALE SNAGE

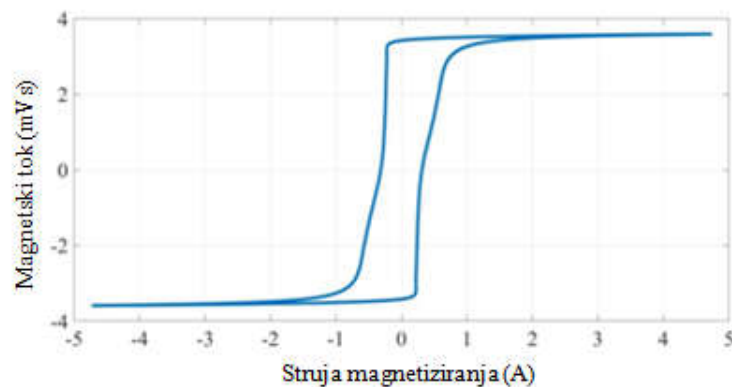
### 4.1. Teorijski opis metode

Prilikom određivanja remanentnog magnetskog toka  $\Phi_R$  koristi se jednostavan model zavojnice sa željeznom jezgrom koji se sastoji od linearnog otpora  $R$  koji je spojen u seriju s nelinearnim induktivitetom  $L$  [17]. Otpor  $R$  u ovom slučaju predstavlja otpor namota. Model zavojnice nalazi se unutar isprekidane linije (Slika 4.1.).



Slika 4.1. Model zavojnice sa željeznom jezgrom

Magnetska petlja histereze nelinearnog induktiviteta  $L$  (Slika 4.2. [17]) je eksperimentalno dobivena kao petlja histereze primarnog namota transformatora koji se koristi pri provođenju pokusa [17]. Zbog korištenja eksperimentalno dobivene petlje histereze koja uključuje nelinearne karakteristike, model nije tako jednostavan kako se čini.



Slika 4.2. Prikaz petlje histereze primarnog namota transformatora



Model zavojnice s magnetskom jezgrom, koji je prikazan na slici 4.1. unutar isprekidane linije, napaja se istosmjernim naponom konstantne vrijednosti [17]. Jednadžba mreže jednaka je:

$$u - iR - u_L = 0. \quad (4-1)$$

Magnetski tok  $\varphi$  nelinearnog induktiviteta  $L$  je:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau + \Phi_R, \quad (4-2)$$

gdje je:

$N$  - broj namota zavojnice,

$t$  i  $\tau$  - vremenske varijable,

$\Phi_R$  - vrijednost remanentnog magnetskog toka [17].

Zamisao ove metode je odabrati radnu točku na petlji histereze koju čine magnetski tok zasićenja  $\Phi_S$  i struja zasićenja  $I_S$ . Prvenstveno je potrebno odabrati struju zasićenja kao najnižu vrijednost struje  $i$ , koja odgovara samo jednoj vrijednosti magnetskog toka, a to će zapravo biti magnetski tok zasićenja. Ako je odabrana niža vrijednost struje zasićenja, magnetski tok zasićenja se tada ne može precizno odrediti. Stoga bi u tom slučaju magnetski tok zasićenja mogao imati bilo koju vrijednost iz intervala između najniže i najviše vrijednosti koja odgovara odabranoj vrijednosti struje zasićenja. S druge strane, odabir veće vrijednosti struje zasićenja neće poboljšati rezultate mjerenja, već će povećati gubitke i uzrokovati dodatno nepotrebno strujno opterećenje. Vrijednost napona istosmjernog izvora treba postaviti tako da uzrokuje izabranu struju zasićenja u krugu u stabilnom, tj. ustaljenom stanju s obzirom na vrijednost otpora  $R$ , kao što je prikazano na slici 4.1.[17].

Uzimajući u obzir jednadžbu (4-2), magnetski tok zasićenja  $\Phi_S$  jednak je:

$$\Phi_S = \varphi(t \geq t_S) = \frac{1}{N} \int_0^{t_S} u_L(t) dt + \Phi_R, \quad (4-3)$$

gdje je:

$t_S$  – trenutak u kojemu magnetski tok dosegne vrijednost magnetskog toka zasićenja, odnosno kada struja dosegne vrijednost struje zasićenja. Nakon trenutka  $t_S$ , strujni krug će se nalaziti u ustaljenom stanju, što znači da će struja i magnetski tok imati konstantne vrijednosti, a napon induktiviteta tada će poprimiti nultu vrijednost.

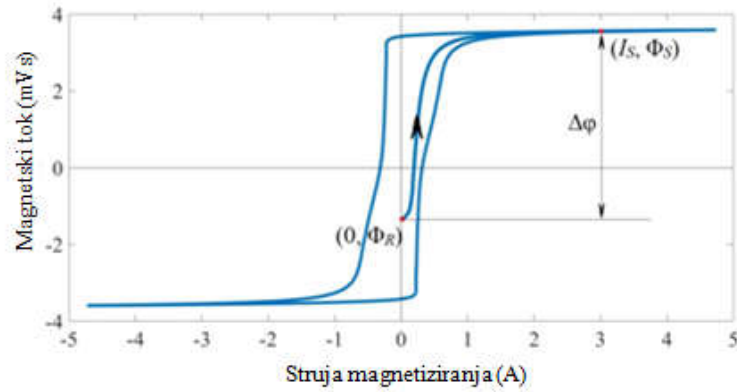
Magnetski tok zasićenja prethodno je poznata vrijednost i odgovara odabranoj struji zasićenja, te se tada vrijednost remanentnog magnetskog toka  $\Phi_R$  može dobiti kao:

$$\Phi_R = \Phi_S - \frac{1}{N} \int_0^{t_S} u_L(\tau) d\tau. \quad (4-4)$$

Iz jednadžbe (4-4), diferencijalni magnetski tok  $\Delta\varphi$  definiran je kao:

$$\Delta\varphi = \Phi_S - \Phi_R = \frac{1}{N} \int_0^{t_S} u_L(\tau) d\tau. \quad (4-5)$$

Točke u petlji histereze koje predstavljaju magnetski tok zasićenja  $\Phi_S$  i diferencijalni magnetski tok  $\Delta\varphi$ , kao i putanju radne točke, za vrijeme prijelaznog stanja, prikazane su na slici 4.3.[17].

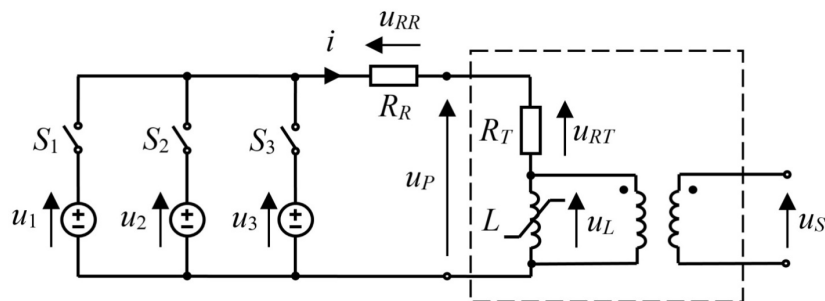


**Slika 4.3.** Magnetski tok zasićenja, diferencijalni tok i putanja radne točke

Prilikom napajanja zavojnice s istosmjernim naponom konstantne vrijednosti, magnetski tok će se tijekom prijelaznog stanja početi povećavati od neke nepoznate vrijednosti remanentnog magnetskog toka u točki  $(0, \Phi_R)$ , prema poznatom magnetskom toku zasićenja u točki  $(I_S, \Phi_S)$  (Slika 4.3. [17]).

## 4.2. Laboratorijski postav i mjerni postupak

Model mjernog kruga prikazan je na slici 4.4.



**Slika 4.4.** Prikaz modela mjernog kruga

Dijelovi modela mjernog kruga (Slika 4.4. [17]) su transformator, otpor  $R_R$ , dva izvora izmjeničnog napona  $u_2$  i  $u_3$ , jedan izvor istosmjernog napona  $u_1$ , zatim dvije obične mehaničke sklopke  $S_1$  i  $S_3$  te elektronička upravljiva sklopka  $S_2$ .

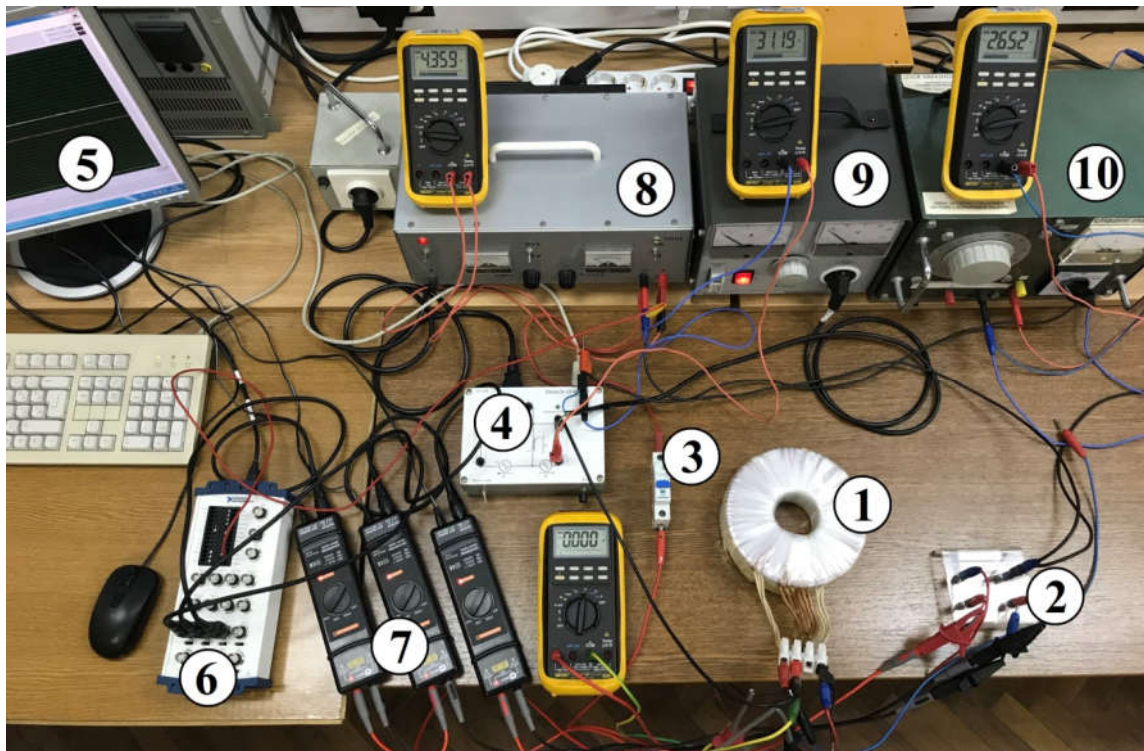
Prilikom izračunavanja diferencijalnog magnetskog toka koristi se napon induktiviteta, pa bi ga stoga bilo poželjno što preciznije izmjeriti ili izračunati. Napon induktiviteta  $u_L$  računa se kao

razlika između izmjerene napona na priključnicama primarnog namota transformatora  $u_P$  i umnoška struje magnetiziranja  $i$  i otpora  $R_T$  primarnog namota transformatora:

$$u_L = u_P - iR_T. \quad (4-6)$$

Napon iduktiviteta najbolje se određuje snimanjem napona sekundarnog namota transformatora koji je u praznom hodu, te svođenjem izmjerene napona na primarnu stranu uz korištenje odgovarajućih omjera broja zavoja [17].

Prikaz realizacije mjernog kruga vidljiv je na slici 4.5.

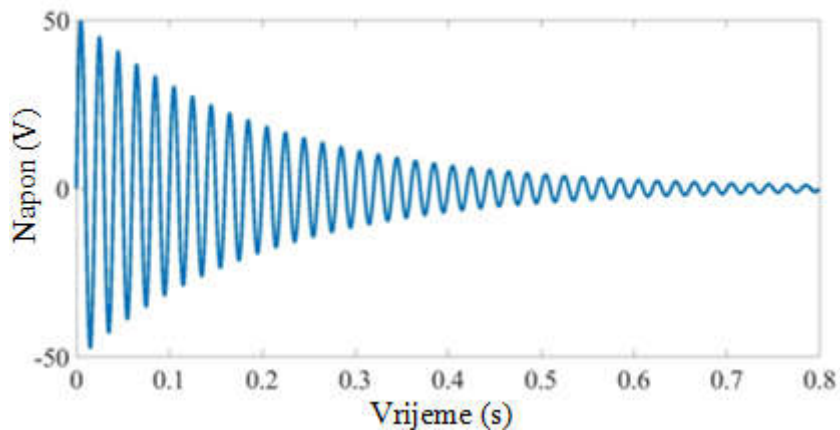


**Slika 4.5.** Prikaz realizacije mjernog kruga

Na slici 4.5. vidljivi su svi fizički dijelovi, označeni brojevima od 1 do 10, koji su potrebni za realizaciju mjernog kruga te pravilno izvođenje mjernog postupka. Prema [17], jedan od glavnih dijelova, a ujedno i označen brojem (1), je ispitivani transformator koji ima toroidnu jezgru, sačinjenu od dinamo limova (tipa M5) čiji je poprečni presjek  $20 \text{ cm}^2$ , primar na kojemu ima 47 namota i sekundar na kojemu ima 7 namota. Namoti na primarnoj i sekundarnoj strani načinjeni su od trostruke okrugle bakrene žice poprečnog presjeka od  $1,3 \text{ mm}^2$ . Nominalni efektivni napon primarnog namota iznosi  $30 \text{ V}$ , otpor  $R_T = 0,19 \Omega$ , te induktivitet  $L = 0,59 \text{ H}$  u nezasićenom području. Serijskim spojem otpora  $R_T$  i savršenog transformatora modelira se transformator koji

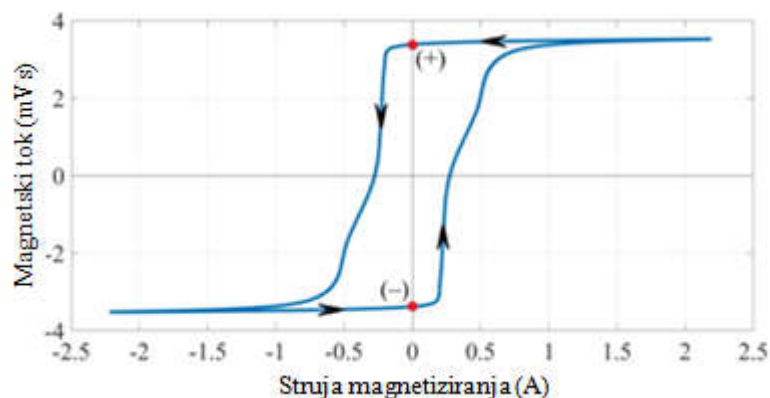
je vidljiv na slici 4.4. unutar isprekidane linije, dok je na slici 4.1. prikazana petlja histereze nelinearnog induktiviteta  $L$ .

Primarni namot transformatora spaja se u seriju s dodatnim otporom  $R_R = 1,22 \Omega$  koji je označen brojem 2, a čija je svrha da podigne napon istosmjernog izvora  $u_1$  na vrijednost  $u_1 = 4,27 \text{ V}$ , koja će odgovarati odabranoj struji zasićenja  $I_S$ , a ona iznosi 3 A. Bez dodatnog otpornika, napon izvora istosmjernog napona  $u_1$  bio bi 0,57 V, što bi bilo teško za točno izvođenje mjernog postupka. Stoga je ukupni otpor u primarnom krugu jednak  $R = R_R + R_T = 1,41 \Omega$ . Sekundarni namot je neopterećen te se na njemu inducira napon koji se mjeri i koristi za izračun diferencijalnog magnetskog toka. Sklopke  $S_1$  i  $S_3$  su obične mehaničke sklopke označene brojem 3, dok je sklopka  $S_2$  elektronički upravljana sklopka realizirana korištenjem trijaka koji je integriran u elektronički sklopni uređaj, označen brojem 4, koji je upravljani mikrokontrolerom preko softvera instaliranog na računalo označenom brojem 5. Rezultati mjerenja spremaju se na odgovarajući softver instaliran na računalo s pomoću kartice za prikupljanje podataka koja se naziva DAQ kartica i označena je brojem 6, gdje je frekvencija uzorkovanja za sva tri kanala 50 kHz. S pomoću aktivne diferencijalne sonde, označene brojem 7, mjeri se napon  $u_{RR}$  na dodatnom otporniku i uz pomoć Ohmovog zakona se računa struja magnetiziranja, te također uz pomoć aktivnih diferencijalnih sondi dobivaju se naponi primara i sekundara. Za napajanje transformatora, koristi se izvor istosmjernog napona  $u_1$ , označen brojem 8. Za podešavanje vrijednosti toka u trenutku kada dođe do isključenja napajanja transformatora, uz pomoć elektronički upravljane sklopke  $S_2$ , koristi se izvor izmjeničnog napona  $u_2$ , označen brojem 9. Za demagnetizaciju jezgre preko obične mehaničke sklopke  $S_3$ , koristi se izvor izmjeničnog napona  $u_3$ , označen brojem 10. Frekvencija oba izvora izmjeničnog napona je 50 Hz. Elektronički sklopni uređaj, računalo i izvori, galvanski su izolirani od elektroenergetske mreže (Slika 4.5 [17]). Mjerni postupak provodi se u tri koraka. Kao prvi korak provodi se izmjenična demagnetizacija jezgre transformatora uz pomoć izvora izmjeničnog napona  $u_3$  i sklopke  $S_3$  dok su ostale dvije sklopke ( $S_1$  i  $S_2$ ) za to vrijeme otvorene. Izmjenična demagnetizacija jezgre provodi se na način da se postupno smanjuje napon izvora izmjeničnog napona  $u_3$  s efektivne vrijednosti od 36 V do 0 V u približno 2 minute, što je vidljivo na slici 4.6. [17].



**Slika 4.6.** Prikaz procesa izmjenične demagnetizacije

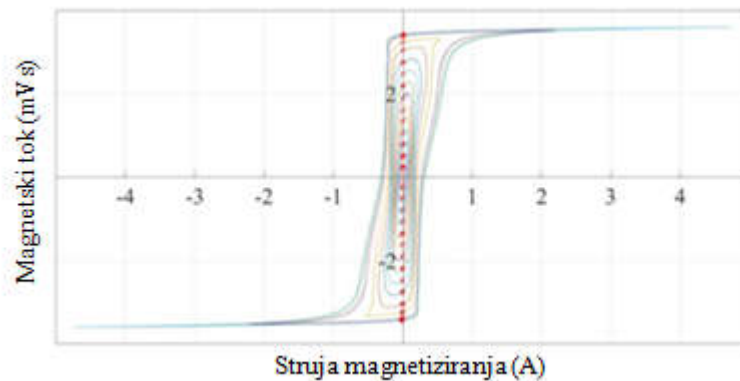
Drugi korak je postavljanje toka isključenja  $\Phi_D$  uz pomoću izvora izmjeničnog napona  $u_2$  i elektronički upravljane sklopke  $S_2$ , a slijedi gotovo trenutno poslije prvog koraka. Prilikom određivanja toka isključenja, sklopke  $S_1$  i  $S_3$  su otvorene. Vrijednost toka isključenja postavlja se promjenom efektivnog napona izvora  $u_2$  i trenutkom otvaranja sklopke  $S_2$  kada struja magnetiziranja prolazi kroz nultu vrijednost. Struja magnetiziranja može prolaziti kroz nultu vrijednost na dva mjesta, odnosno u dvije točke, a to su točka (+) i točka (-), ovisno o tome da li se postavlja pozitivni ili negativni tok isključenja (Slika 4.7 [17]). Sklopka  $S_2$  isklopit će u točki (+) kada se postavlja pozitivni tok isključenja, a u točki (-) kada se postavlja negativni tok isključenja [17].



**Slika 4.7.** Prikaz postavljanja toka isključenja

U ovom mjerenju ukupno je postavljeno 25 različitih tokova isključenja, što je predočeno sa 12 različitih karakteristika i nulte vrijednosti (Slika 4.8. [17]). Karakteristike su dobivene tijekom ustaljenog stanja za svaki parametar efektivnog napona izmjeničnog izvora  $u_2$ . Prilikom isklopa

sklopke  $S_2$  magnetski tok se može vrlo lako izračunati integriranjem napona na sekundaru  $u_S$  i pravilnom primjenom broja zavoja sekundara  $N_2$ .



**Slika 4.8.** Prikaz dobivenih petlji histereze za različite tokove isključenja ( $\Phi_D$ )

Prema [17], jednađba kojom se definira izračun magnetskog toka glasi:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N_2} \int_0^t u_S(\tau) d\tau + \varphi(0), \quad (4-7)$$

gdje je:

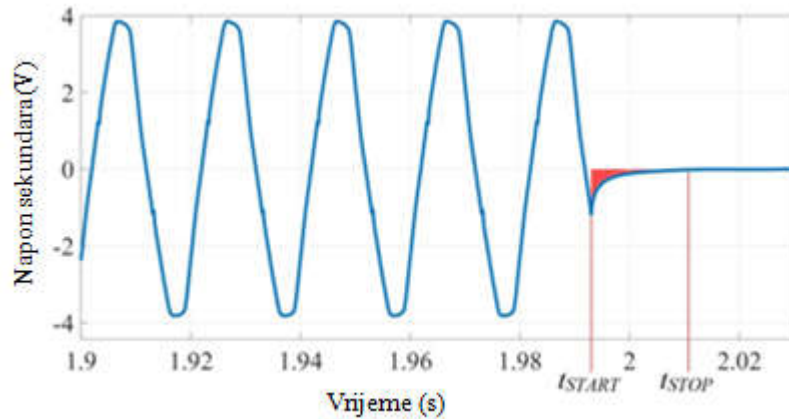
$N_2$  – broj zavoja na sekundaru,

$\varphi(0)$  – vrijednost magnetskog toka u trenutku  $t = 0$  s.

Zbog toga što je istosmjerna komponenta toka jednaka nuli u ustaljenom stanju transformatora prije isključenja sklopke  $S_2$ , jednađba (4-7) se može zapisati kao:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N_2} \int u_S(t) dt. \quad (4-8)$$

Vrijednosti toka isključenja mogu se lako očitati na slici 4.8. gdje su označene crvenim točkama, ali te vrijednosti toka isključenja nisu u potpunosti točne. Razlog tome je što sekundarni napon koji predstavlja napon induktiviteta, ne pada na nultu vrijednost odmah nakon otvaranja sklopke  $S_2$  (Slika 4.9. [17]). Trenutak kada struja magnetiziranja prolazi kroz nultu vrijednost na petlji histereze označen je kao  $t_{START}$  na slici 4.9. [17].



**Slika 4.9.** Prikaz napona sekundara prilikom otvaranja sklopke  $S_2$

Prema [17], rješenje ovog problema je od trenutka koji je označen kao  $t_{START}$ , pa do trenutka koji je označen kao  $t_{STOP}$ , integrirati sekundarni napon  $u_s$  te ga podijeliti brojem zavoja sekundara  $N_2$ , čime će se dobiti korekcijski magnetski tok  $\Phi_C$  na sljedeći način:

$$\Phi_C = \frac{1}{N_2} \int_{t_{START}}^{t_{STOP}} u_s(t) dt. \quad (4-9)$$

Kako bi se dobila ispravna vrijednost toka isključenja, za svaki parametar izvora izmjeničnog napona  $u_2$ , izračunatom korekcijskom magnetskom toku  $\Phi_C$  dodaje se odgovarajuća očitana vrijednost magnetskog toka s petlji histerezi koje su prikazane na slici 4.8. [17]. Nakon ovog postupka, vrijednosti toka isključenja i pripadajuće vrijednosti efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $u_2$ , zajedno s remanentnim magnetskim tokom, prikazane su u tablici 4.1.

Treći korak provedbe mjernog postupka je napajanje transformatora izvorom istosmjernog napona  $u_1$  preko mehaničke sklopke  $S_1$ . Početak realizacije trećeg koraka započinje približno 2 s nakon završetka drugog koraka. Sklopke  $S_2$  i  $S_3$  su otvorene. Napon izvora istosmjernog napona  $u_1$  ima konstantnu vrijednost i postavljen je na 4,23 V, što će u ustaljenom stanju izazvati struju od 3 A, odnosno struja zasićenja  $I_S$  imat će vrijednost od 3 A, a što odgovara vrijednosti magnetskog toka zasićenja  $\Phi_S = 3,56$  mVs [17].

Na valjanost i točnost predložene metode ne bi trebale utjecati različite vrijednosti toka isključenja  $\Phi_D$  te kako bi se to dokazalo, u mjernom postupku su provedena mjerenja s različitim



vrijednostima napona izvora izmjeničnog napona  $u_2$  s kojima se postavljaju različite početne vrijednosti toka isključenja:

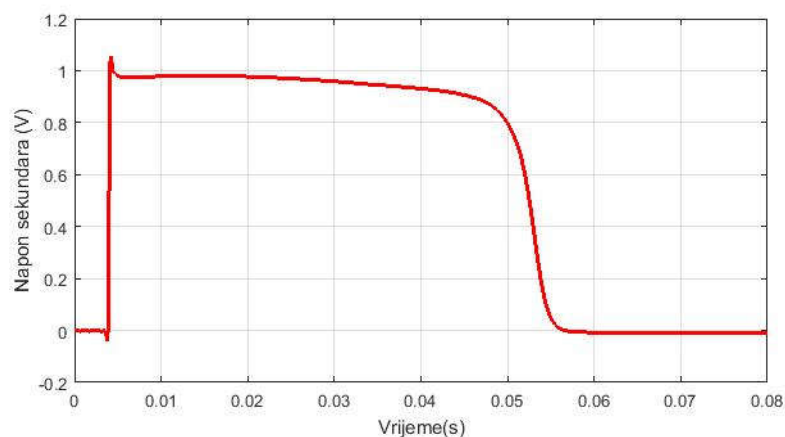
-  $U_2 = -36 + 3 \cdot k$  [V], gdje je  $k = 0, 1, 2, \dots, 24$ ;

što ukupno daje 25 mjerenja.

### 4.3. Rezultati mjerenja

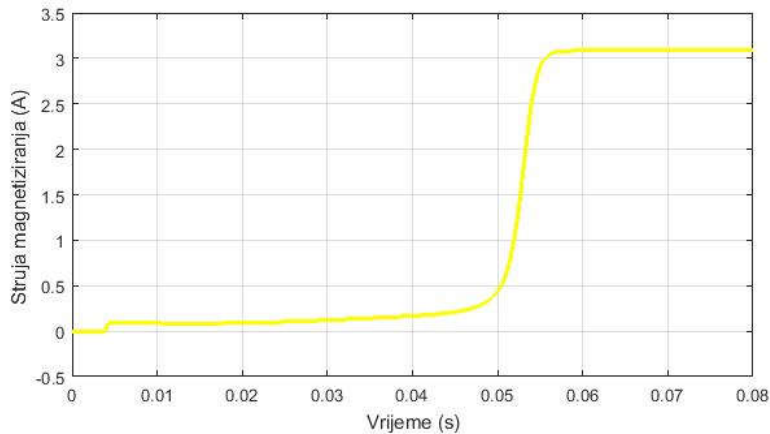
Kao rezultati za svako pojedino mjerenje, dobivaju se struja magnetiziranja i napon na sekundaru prilikom napajanja transformatora izvorom istosmjernog napona  $u_1$ , što je predstavljeno kao treći korak mjernog postupka. Također, dobiva se i valni oblik magnetskog toka tako što se koristi napon sekundarnog namota. Rezultati mjerenja dobiveni su obradom izmjerenih vrijednosti u programskom paketu MATLAB, a programski kodovi koji to potkrepljuju nalaze se u prilogima ovoga rada.

Prikaz valnog oblika napona na sekundaru za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = -36$  V vidljiv je na slici 4.10.



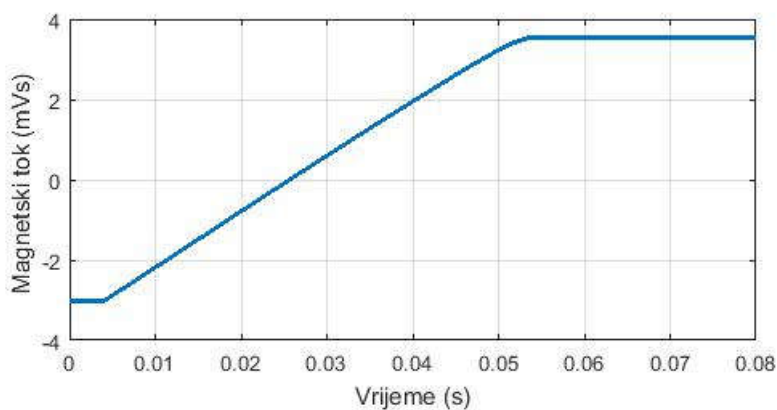
**Slika 4.10.** Valni oblik napona sekundara za  $U_2 = -36$  V

Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = -36$  V vidljiv je na slici 4.11.



**Slika 4.11.** Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za  $U_2 = -36$  V

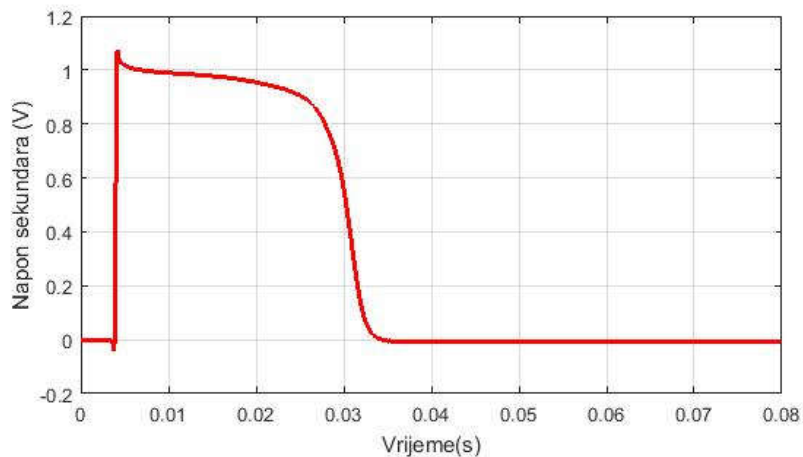
Prikaz valnog oblika magnetskog toka za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = -36$  V vidljiv je na slici 4.12.



**Slika 4.12.** Prikaz valnog oblika magnetskog toka za  $U_2 = -36$  V

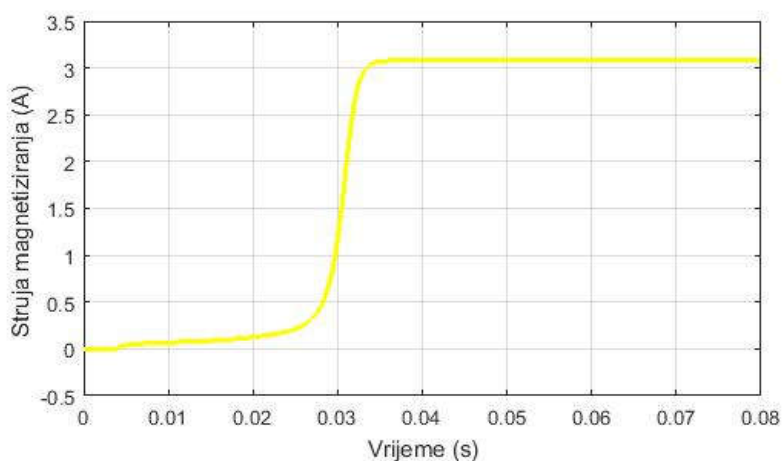
Na slikama 4.10., 4.11. i 4.12. vidljivo je da napon na sekundaru u trenutku  $t = 0,055$  s pada na vrijednost nula, dok struja magnetiziranja u tom trenutku dolazi u stanje zasićenja, kao i magnetski tok koji kao početnu vrijednost ima remanentni tok u iznosu od -3 mVs.

Prikaz valnog oblika napona na sekundaru za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 0$  V vidljiv je na slici 4.13.



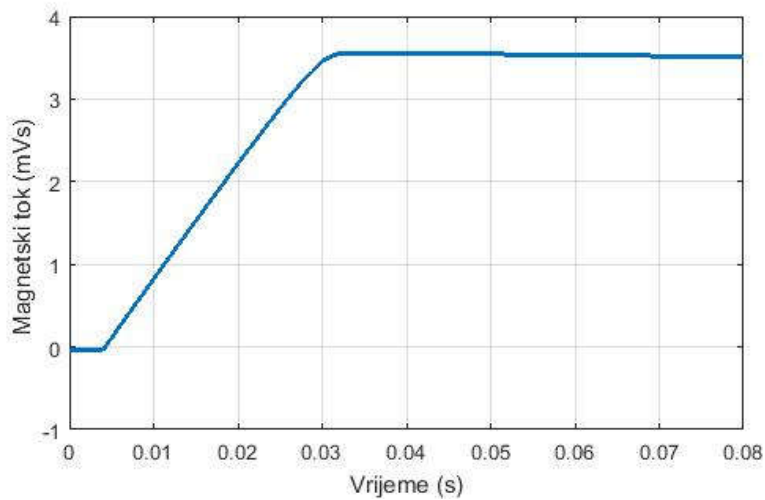
**Slika 4.13.** Valni oblik napona sekundara za  $U_2 = 0$  V

Prikaz valnog oblika struja magnetiziranja za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 0$  V vidljiv je na slici 4.14.



**Slika 4.14.** Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za  $U_2 = 0$  V

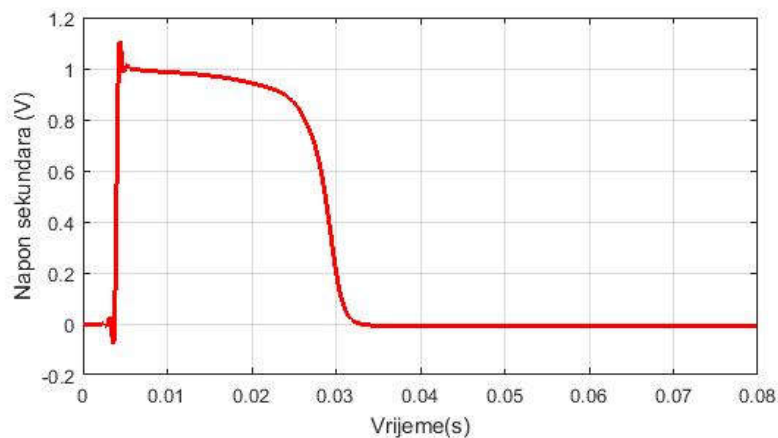
Prikaz valnog oblika magnetskog toka za vrijednost efektivnog napona izmjeničnog izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 0$  V vidljiv je na slici 4.15.



**Slika 4.15.** Prikaz valnog oblika magnetskog toka za  $U_2 = 0$  V

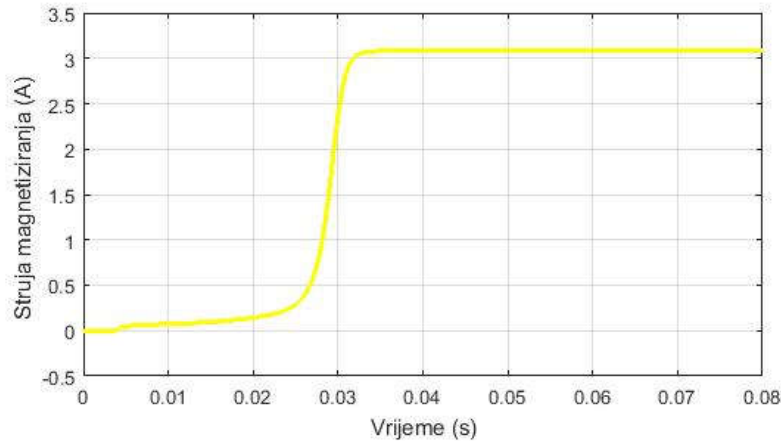
Na slikama 4.13., 4.14. i 4.15. vidljivo je da napon na sekundaru u trenutku  $t = 0,033$  s pada na vrijednost nula, dok struja magnetiziranja u tom trenutku dolazi u stanje zasićenja, kao i magnetski tok, koji kao početnu vrijednost ima remanentni tok u iznosu od 0 mVs.

Prikaz valnog oblika napona na sekundaru za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 3$  V vidljiv je na slici 4.16.



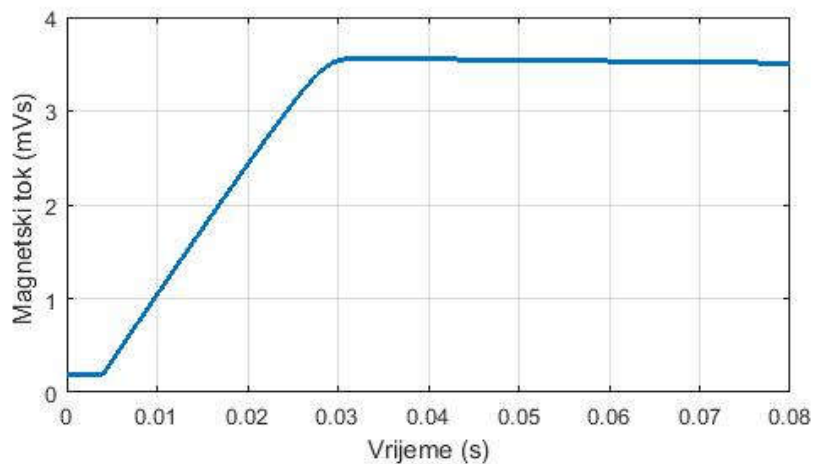
**Slika 4.16.** Valni oblik napona sekundara za  $U_2 = 3$  V

Prikaz valnog oblika struja magnetiziranja za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 3$  V vidljiv je na slici 4.17.



**Slika 4.17.** Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za  $U_2 = 3$  V

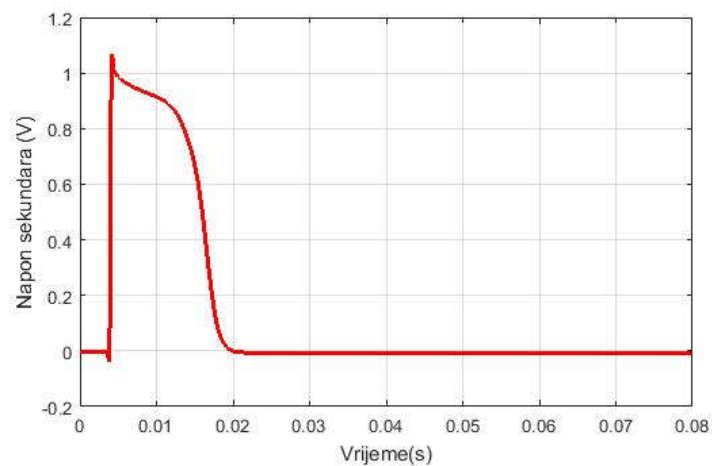
Prikaz valnog oblika magnetskog toka za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 3$  V vidljiv je na slici 4.18.



**Slika 4.18.** Prikaz valnog oblika magnetskog toka za  $U_2 = 3$  V

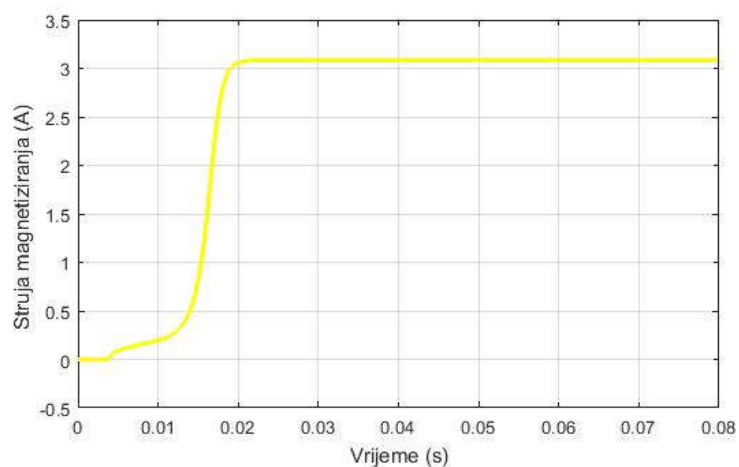
Na slikama 4.16., 4.17. i 4.18. vidljivo je da napon na sekundaru u trenutku  $t = 0,024$  s pada na vrijednost nula, dok struja magnetiziranja u tom trenutku dolazi u stanje zasićenja kao i magnetski tok koji kao početnu vrijednost ima remanentni tok u iznosu od 0,186 mVs.

Prikaz valnog oblika napona na sekundaru za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 27$  V vidljiv je na slici 4.19.



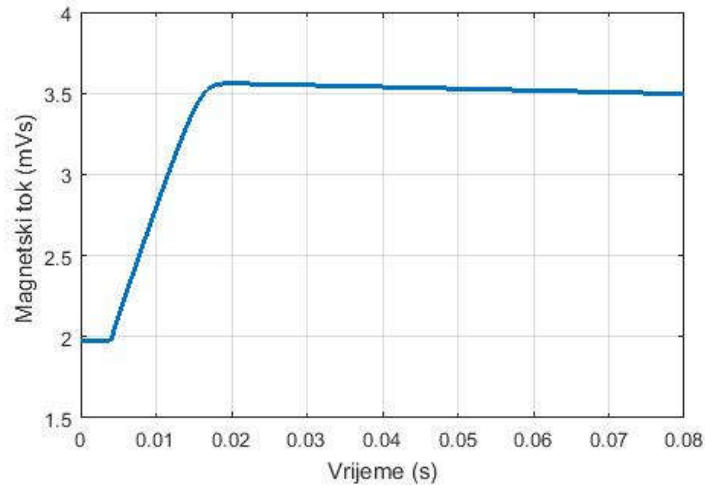
**Slika 4.19.** Valni oblik napona sekundara za  $U_2 = 27$  V

Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 27$  V vidljiv je na slici 4.20.



**Slika 4.20.** Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za  $U_2 = 27$  V

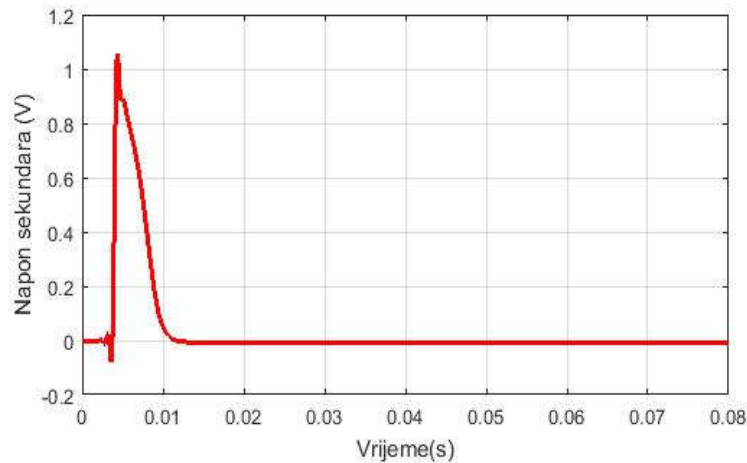
Prikaz valnog oblika magnetskog toka za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 27$  V vidljiv je na slici 4.21.



**Slika 4.21.** Prikaz valnog oblika magnetskog toka za  $U_2 = 27 \text{ V}$

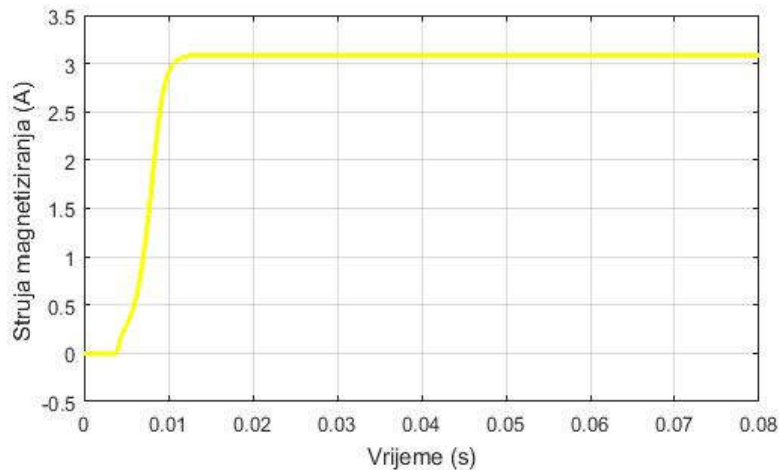
Na slikama 4.19., 4.20. i 4.21. vidljivo je da napon na sekundaru u trenutku  $t = 0,018 \text{ s}$  pada na vrijednost nula, dok struja magnetiziranja u tom trenutku dolazi u stanje zasićenja, kao i magnetski tok koji kao početnu vrijednost ima remanentni tok u iznosu od  $1,98 \text{ mVs}$ .

Prikaz valnog oblika napona na sekundaru za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 36 \text{ V}$  vidljiv je na slici 4.22.



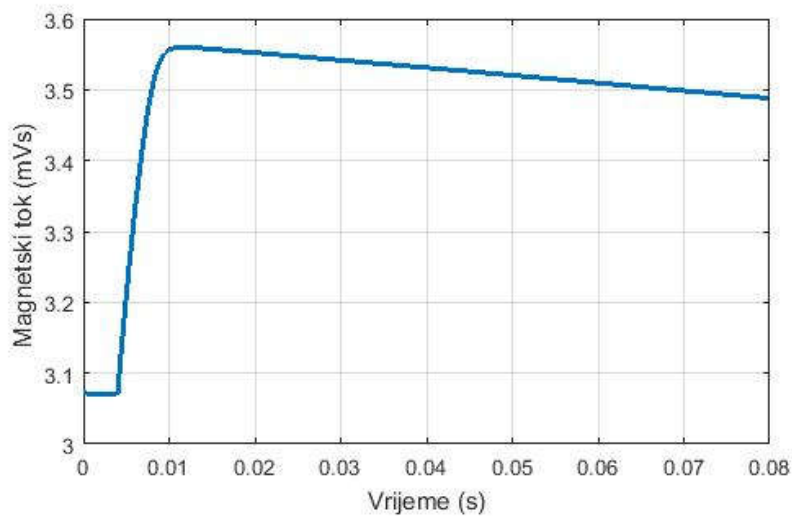
**Slika 4.22.** Valni oblik napona sekundara za  $U_2 = 36 \text{ V}$

Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 36 \text{ V}$  vidljiv je na slici 4.23.



**Slika 4.23.** Prikaz valnog oblika struje magnetiziranja za  $U_2 = 36V$

Prikaz valnog oblika magnetskog toka za vrijednost efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $U_2 = 36 V$  vidljiv je na slici 4.24.



**Slika 4.24.** Prikaz valnog oblika magnetskog toka za  $U_2 = 36 V$

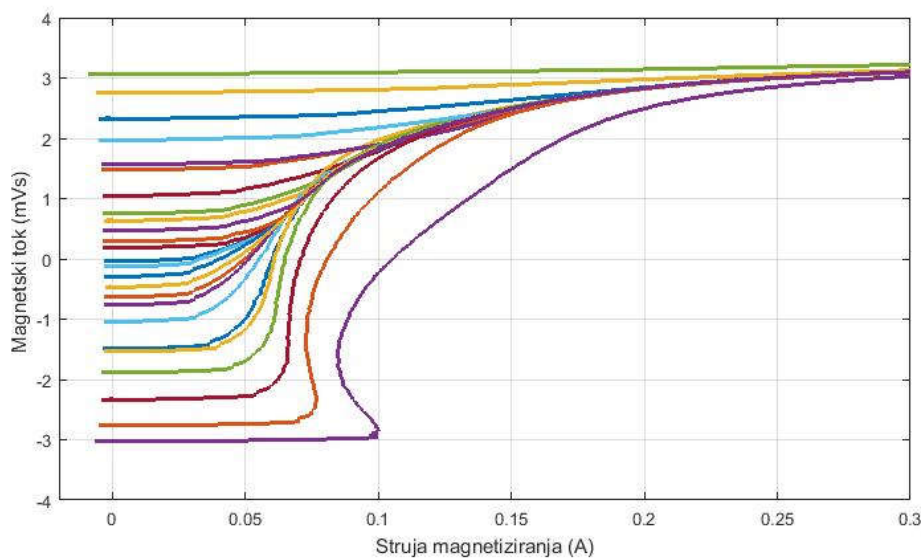
Na slikama 4.22., 4.23. i 4.24. vidljivo je da napon na sekundaru u trenutku  $t = 0,01 s$  pada na vrijednost nula, dok struja magnetiziranja u tom trenutku dolazi u stanje zasićenja, kao i magnetski tok koji kao početnu vrijednost ima remanentni tok u iznosu od 3,07 mVs.

Promjenom vrijednosti efektivnog napona izvora izmjeničnog napona  $u_2$ , zamjećuje se da se mijenja i vrijeme u kojem napon na sekundaru pada na vrijednost nula, te struja magnetiziranja i



magnetski tok ulaze u ustaljeno stanje. Najduže vrijeme od 0,055 s je za napon  $U_2 = -36$  V, a najkraće (0,01 s) za napon  $U_2 = 36$  V, što znači da se promjenom napona iz negativne u pozitivnu vrijednost skraćuje vrijeme dolaska u ustaljeno stanje. Prikaz programskog koda za dobivene odzive nalazi se u prilogu P.4.1.

Putanje radne točke za svako mjerenje prilikom napajanja istosmjernim izvorom, što je predstavljeno trećim korakom u realizaciji mjernog postupka, prikazane su na istom grafu na slici 4.19.



**Slika 4.19.** Prikaz putanje radne točke za svako mjerenje prilikom istosmjernog napajanja transformatora

Prikaz programskog koda za dobivene odzive nalazi se u prilogu P.4.2.

Vrijednost remanentnog magnetskog toka za svako mjerenje dobiva se tako da se koristi jednačina (4-4), odnosno kao razlika između magnetskog toka zasićenja  $\Phi_S$  i izračunatog diferencijalnog magnetskog toka  $\Delta\phi$  [17]. Dobivene vrijednosti remanentnog magnetskog toka  $\Phi_R$  prikazane su u tablici 4.1.

U tablici 4.1. prikazane su i efektivne vrijednosti napona izvora izmjeničnog napona  $u_2$  koji ispred sebe imaju predznake + ili – ovisno o trenutku isklopa sklopke  $S_2$ , odnosno je li postavljen pozitivan ili negativan tok isključenja [17]. Dodatno, u tablici 4.1. se nalaze i odgovarajuće vrijednosti toka isključenja  $\Phi_D$ , kao i omjeri dobivenih vrijednosti remanentnog magnetskog toka  $\Phi_R$  i vrijednosti toka isključenja  $\Phi_D$ .

**Tablica 4.2.** Prikaz vrijednosti remanentnog magnetskog toka i toka isključenja te njihovog omjera

Napon $U_2$ (V)	Remanentni magnetski tok, $\Phi_R$ (mVs)	Tok isključenja, $\Phi_D$ (mVs)	Remanentni tok / tok isključenja
36 (-)	-3.026	-2.997	100.97 %
33 (-)	-2.764	-2.752	100.42 %
30 (-)	-2.329	-2.364	98.49 %
27 (-)	-1.885	-2.040	92.37 %
24 (-)	-1.534	-1.728	88.77 %
21 (-)	-1.306	-1.441	90.58 %
18 (-)	-1.035	-1.152	89.79 %
15 (-)	-0.764	-0.901	84.77 %
12 (-)	-0.631	-0.650	97.12 %
9 (-)	-0.461	-0.433	106.52 %
6 (-)	-0.288	-0.140	206.19 %
3 (-)	-0.129	-0.061	211.09 %
0	-0.038	0.000	
3 (+)	0.186	0.061	304.63 %
6 (+)	0.288	0.140	206.09 %
9 (+)	0.472	0.433	108.94 %
12 (+)	0.638	0.650	98.26 %
15 (+)	0.751	0.901	83.32 %
18 (+)	1.055	1.152	91.51 %
21 (+)	1.305	1.441	90.51 %
24 (+)	1.569	1.728	90.76 %
27 (+)	1.975	2.040	96.83 %
30 (+)	2.330	2.364	98.55 %
33 (+)	2.760	2.752	100.30 %
36 (+)	3.072	2.997	102.50 %

Za vrijednosti napona izvora izmjeničnog napona  $u_2$  koje imaju istu apsolutnu vrijednost, apsolutne vrijednosti remanentnog magnetskog toka moraju, odnosno trebale bi biti iste. To znači da bi remanentni magnetski tok trebao imati istu apsolutnu vrijednost za vrijednost napona  $U_2$  od 20 (+) V i 20 (-) V. Iz rezultata u tablici 4.1. vidljivo je da su dobivene vrijednosti remanentnog magnetskog toka između 83 % i 108 % odgovarajućih vrijednosti toka isključenja i

to u većini slučajeva. Međutim, dogodile su se neke iznimke i to za vrijednosti efektivnog napona:  $U_2 = 3 (+) \text{ V}$ ,  $U_2 = 3 (-) \text{ V}$ ,  $U_2 = 6 (+) \text{ V}$  i  $U_2 = 6 (-) \text{ V}$ . Razlog tih iznimki mogao bi se naći u relativno malim apsolutnim vrijednostima dobivenog remanentnog magnetskog toka i odgovarajućeg toka isključenja, a koji mogu uzrokovati veću mjernu nesigurnost. Također, postoje i određena odstupanja u ostalim dobivenim rezultatima, ali ona nisu značajna. Uglavnom se pojavljuju zbog drugog koraka mjernog postupka, odnosno zbog toga što tok isključenja nije uvijek točno postavljen, ali naravno, postoje i nesavršenosti mjernog kruga koje uzrokuju odstupanja [17]. Kako podaci u tablici 4.1. pokazuju da određene vrijednosti remanentnog magnetskog toka odgovaraju vrijednostima toka isključenja, smatra se da su predložene laboratorijske postavke i mjerni postupak valjani i ispravno odrađeni.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu detaljno je objašnjen i predstavljen laboratorijski postav i mjerni postupak preko kojih se određuje remanentni magnetski tok, odnosno magnetski tok koji je zaostao u jezgri neopterećenog transformatora prilikom prestanka napajanja. Određivanje remanentnog magnetskog toka izvodi se tako što se vrše mjerenja veličina kao što su napon sekundara i struja magnetiziranja, a zatim se preko jednadžbi uz pomoć izmjerenih vrijednosti izračunava remanentni magnetski tok. Prije provedbe same metode, potrebno je za ispitivani transformator dobiti petlju histereze preko koje se utvrđuje referentna točka koja sadrži magnetski tok zasićenja i struju zasićenja.

Određivanje remanentnog magnetskog toka provodi se u tri koraka, gdje je prvi korak izmjenična demagnetizacija, što je važan preduvjet za drugi korak u kojemu se postavlja željena vrijednost toka isključenja tako što se mijenja efektivni napon izvora izmjeničnog napona. Treći korak slijedi odmah nakon drugog koraka, gdje se neopterećeni transformator napaja istosmjernim izvorom konstantnog napona od 4,23 V. Uz pomoć poznatih vrijednosti struje i toka zasićenja, izračunava se remanentni magnetski tok za različite vrijednosti efektivnog napona izvora.

Prednost ove metode je što se neopterećeni transformator napaja istosmjernim izvorom male snage, što je bitno ako se promatra visokonaponski transformator, a što znači da se mjerenja mogu obaviti bez da se koristi visoki nazivni napon transformatora. Također, u ovoj metodi nije potrebna fizička intervencija u jezgri ili neke druge dijelove transformatora.

Glavni nedostatak ove metode je što se nakon provođenja mjernog postupka vrijednost remanentnog toka postavlja na najveću vrijednost. Ova metoda ne zadržava određenu vrijednost remanentnog magnetskog toka nakon mjerenja, što je ujedno i njezino glavno ograničenje.

## LITERATURA

- [1] Bilandžija D., Diplomski rad, Estimacija parametara nadomjesne sheme transformatora programom za simulacije elektromagnetskih polja, str. 11-13, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek 2017.
- [2] Majnarić I., Predavanje 8. Magnetografija, str. 1-10, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, katedra za tisak, Zagreb 2013. url:  
[http://tisak.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/Predavanje%20Dit%208a.pdf](http://tisak.grf.unizg.hr/media/download_gallery/Predavanje%20Dit%208a.pdf) (30.6.2020.)
- [3] Hok M., Završni rad, Načini smanjena struje uklopa trofaznih transformatora, str. 1-8, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek Osijek 2017.
- [4] Vulin D., Kvalifikacijski doktorski ispit, Pregled i usporedba metoda određivanja remanentnog magnetskog toka, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2020.
- [5] O. Bego, G. Petrović, T. Kilić, Smanjenje udarnih struja uklopa trofaznog energetskog transformatora, *Energija*, god. 57(2008), br. 3., str. 350-367, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića bb 21000 Split Hrvatska, Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb.
- [6] C. K. Cheng, J. F. Chen, T. J. Liang, S. D. Chen, "Transformer design with consideration of restrained inrush current," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, sv. 28, br. 2, str. 102–108, 2006.
- [7] S. G. Abdulsalam, W. Xu, "A sequential phase energization method for transformer inrush current reduction-transient performance and practical considerations," *IEEE Trans. Power Deliv.*, sv. 22, br. 1, str. 208–216, 2007.
- [8] V. Molcette, J. L. Kotny, J. P. Swan, J. F. Brudny, "Reduction of inrush current in single-phase transformer using virtual air gap technique," *IEEE Trans. Magn.*, sv. 34, br. 4 PART 1, str. 1192–1194, 1998.
- [9] E. Hajipour, M. Salehizadeh, M. Vakilian, M. Sanaye-Pasand, "Residual Flux Mitigation of Protective Current Transformers Used in an Autoreclosing Scheme," *IEEE Trans. Power Deliv.*, sv. 31, br. 4, str. 1636–1644, 2016.

- [10] J. Duan, Z. Jin, Y. Lei, "Residual flux suppression of protective current transformers for autoreclosure process," 2017 IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2017, 2017.
- [11] Y. C. Kang, U. J. Lim, S. H. Kang, Y. G. Kim, "Compensating algorithm for use with measurement type current transformers for protection," 2005 IEEE Russ. Power Tech, PowerTech, str. 1–7, 2005.
- [12] M. Yang, W. Sima, L. Chen, P. Duan, P. Sun, T. Yuan, "Suppressing ferroresonance in potential transformers using a model-free active-resistance controller," Int. J. Electr. Power Energy Syst., sv. 95, str. 384–393, 2018.
- [13] D. Tishuai, Z. Bi-De, F. Chun-En, L. Wei, R. Xiao, C. Chuanjiang, "Influence of system transients on the residual flux of three-phase transformers," ICEPE-ST 2017 – 4th Int. Conf. Electr. Power Equipment- Switch. Technol., sv. 2017–Decem, str. 970–973, 2017.
- [14] B. Kovan, F. De Leon, D. Czarkowski, Z. Zabar, L. Birenbaum, "Mitigation of inrush currents in network transformers by reducing the residual flux with an ultra-low-frequency power source," IEEE Trans. Power Deliv., sv. 26, br. 3, str. 1563–1570, 2011.
- [15] D. Cavallera, V. Oiring, J. L. Coulomb, O. Chadebec, B. Caillault, F. Zgainski, "A new method to evaluate residual flux thanks to leakage flux, application to a transformer," IEEE Trans. Magn., sv. 50, br. 2, 2014.
- [16] W. Ge, Y. Wang, Z. Zhao, X. Yang, Y. Li, "Residual Flux in the Closed Magnetic Core of a Power Transformer," IEEE Trans. Appl. Supercond., sv. 24, br. 3, str. 3–6, 2014.
- [17] Vulin D., Biondić I., Miličević K., Vinko D., Znanstveni rad, Laboratory setup for determining residual magnetic flux value using low voltage DC source, *Electr Eng* 102, 1707-1714 (2020), Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2020.

## SAŽETAK

U ovom radu definiran je remanentni magnetski tok, navedeni su primjeri iz prakse u kojima je važan utjecaj remanentnog magnetskog toka i opisane su neke od metoda za određivanje remanentnog magnetskog toka. Detaljno je opisana metoda za određivanje remanentnog magnetskog toka istosmjernim izvorom male snage, laboratorijski postav i mjerni postupak. Rezultati mjernog postupka prikazani su odgovarajućim slikama i vrijednostima prikazanim u tablici.

**Ključne riječi:** remanentni magnetski tok, transformator, struja magnetiziranja, napon sekundara

## ABSTRACT

### **Determining residual magnetic flux value of transformer using low power DC source**

In this paper, residual magnetic flux is defined, examples from practice are given in which the influence of residual magnetic flux is important, and some of the methods for determining remanent magnetic flux are described. A method for determining the residual magnetic flux using a low-power direct current source, laboratory setup and measurement procedure are described in detail. The results of the measurement procedure are presented with the corresponding figures and values shown in the table.

**Key words:** residual magnetic flux, transformer, magnetizing current, secondary voltage

## ŽIVOTOPIS

Ante Tolić rođen je 29. rujna 1995. u Slavonskom Brodu. Završava Osnovnu školu „Vladimir Nazor“ u Slavonskom Brodu 2010. godine. Zatim iste godine upisuje tehničku školu "Slavonski Brod" u Slavonskom Brodu, opredjeljuje se za smjer elektrotehničar, kojeg završava 2014. godine s vrlo dobrim uspjehom.

2014. godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij, smjer elektrotehnika, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek te se na drugoj godini opredijelio za smjer Elektroenergetika kojeg završava 2018. godine s temom završnog rada „Pogon za proizvodnju i pakiranje bezalkoholnih pića „Dam-daj d.o.o Slavonski Brod““ i stekao naziv univ. bac. ing. el.

2018. godine upisuje diplomski sveučilišni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek i opredjeljuje se za modul Industrijska elektroenergetika (DEC).

Znanja koja je stekao tijekom studijskog obrazovanja su poznavanje engleskog jezika na nižoj razini, opće i stručna znanja vezana uz struku, poznavanje programskih paketa AutoCAD, Matlab, Easy Power i dr.

Ante Tolić

U Osijeku, 15. rujna 2020.

---



## PRILOZI

### PRILOG P.4.1. Prikaz programskog koda u MATLAB-u za dobivanje odziva struje magnetiziranja, magnetskog toka i napona sekundara u ovisnosti o vremenu

```
1:
2:     t = data(:,1);
3:
4:     us = data(:,6);
5:     ip = data(:,4);
6:     N = 4000;
7:
8:     Tablica_Flux(redak , stupac) = Flux(1);
9:
10:    if length(fileNameString1) == length(plot_case)
11:        if fileNameString1 == plot_case
12:
13:
14:            figure(2);
15:            plot(data(:,1), data(:,2));
16:            grid on;
17:            figure(3);
18:            ip = filtfilt(B_filt,A_filt, data(:,4));
19:            plot(t(1:N), ip(1:N), 'y', 'linewidth', 2 );
20:            xlabel('Vrijeme (s)');
21:            ylabel('Struja magnetiziranja (A) ');
22:            grid on;
23:            figure(4);
24:            us = filtfilt(B_filt,A_filt, data(:,6));
25:            plot(t(1:N), us(1:N), 'r', 'linewidth', 2);
26:            xlabel('Vrijeme(s)');
27:            ylabel('Napon sekundara (V)');
28:            grid on;
29:            figure(5);
30:            plot(t(1:N), Flux(1:N), 'linewidth', 2);
31:            xlabel('Vrijeme (t)');
32:            ylabel('Magnetski tok (mVs) ');
33:            grid on;
34:        end
35:    end
```

## PRILOG P.4.2. Prikaz programskog koda u MATLAB-u za dobivanje odziva struje magnetiziranja u ovisnosti o magnetskom toku (odziv putanje radne točke)

```
1: clear all;close all;clc;
2:
3: file_dir_1 = 'C:\DCmjerjenjaPonovljeno_Matlab_reducirano\';
4: plot_case = 'dc0p2.mat';
5: fileList = dir(file_dir_1);
6: A1 = struct2table(fileList);
7: fileNameList1 = A1.name;
8: [B_filt,A_filt] = butter(5,0.05);
9:
10: figure(1);
11: Napon_All = [];
12: Legenda = [];
13: StrCount = 1;
14: Tablica_Flux=zeros(25,3);
15: for file_count=3:size(fileNameList1)
16:     fileNameString1 = A1.name{file_count};
17:     StrLength = length(fileNameString1);
18:     if fileNameString1(1) == 'd' && fileNameString1(2) == 'c'
19:         load([file_dir_1 fileNameString1]);
20:         if StrLength == 9
21:             NaponPH = str2num(fileNameString1(3))
22:
23:             Legenda{StrCount} = fileNameString1(3);
24:         elseif StrLength == 10
25:             NaponPH = str2num([fileNameString1(3)
26:
27: fileNameString1(4)])
28:             Legenda{StrCount} = fileNameString1(3:4);
29:         end
30:
31:         stupac = str2num(fileNameString1(end-4));
32:         if fileNameString1(end-5) == 'p'
33:             redak = 13 + round(NaponPH/3);
34:         elseif fileNameString1(end-5) == 'm'
35:             redak = 13 - round(NaponPH/3);
36:         end
37:         Napon_All = [Napon_All NaponPH];
38:
39:         struja = filtfilt(B_filt,A_filt, data(:,4));
40:         Flux = (cumtrapz(data(:,1), data(:,6)))/7;
41:         Flux = (Flux - max(Flux) + 3.56e-3)*1000;
42:         figure(1);
43:         xlabel('Struja magnetiziranja (A)');
44:         ylabel('Magnetski tok (mVs) ');
45:         plot(struja , Flux , 'linewidth', 2 ); hold all;
```