

# Snimanje i obrada valnih oblika struje i napona zavojnice s pomoću računala

---

Oršulić, Marijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:107434>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**

*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**

**SNIMANJE I OBRADA VALNIH OBLIKA STRUJE I  
NAPONA ZAVOJNICE S POMOĆU RAČUNALA**

**Završni rad**

**Marijan Oršulić**

**Osijek, 2019.**

# Sadržaj

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada.....	1
<b>2. KORIŠTENI PROGRAMSKI ALATI I MJERNI UREĐAJI.....</b>	<b>2</b>
2.1. Programski alati .....	2
2.1.1. LabVIEW .....	2
2.1.2. MATLAB.....	2
2.2. Mjerni uređaji .....	3
2.2.1. DAQ kartice .....	3
2.2.2. Mjerne sonde.....	4
2.2.3. Osciloskop.....	6
<b>3. MJERNI KRUG I METODA MJERENJA.....</b>	<b>8</b>
<b>4. REZULTATI MJERENJA .....</b>	<b>16</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>19</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>2020</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>21</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>22</b>

# 1. UVOD

U elektroenergetskom sustavu zavojnice i transformatori imaju veliku ulogu. Iz tog razloga, u nizu primjena, važno je snimati, obrađivati i pohranjivati snimljene valne oblike struje i napona zavojnice, odnosno transformatora. Najčešće se to čini s pomoću računala i dodatnih sklopova te programskih alata koji su potrebni da bi se postigli željeni rezultati.

Jedna od primjena u kojoj je potrebno snimati, obrađivati i pohranjivati valne oblike struje i napona zavojnice, odnosno transformatora je određivanje zaostalog magnetskog toka. Naime, prilikom isključivanja napajanja, u magnetskoj jezgri ostaje zaostali magnetski tok koji se još naziva i remanentni magnetski tok. Njegov iznos važan je u nekoliko primjena – smanjenje udarne struje zavojnice ili transformatora pri uključanju napajanja, predviđanje pojave ferorezonancije te sprječavanje zasićenja strujnih transformatora.

U radu su snimani valni oblici napona i struje primara neopterećenog transformatora. Obradom snimljenih valnih oblika, određivan je zaostali magnetski tok u jezgri transformatora, s obzirom da se isti ne može izravno mjeriti. Napon i struja su snimani s pomoću sklopa spojenog s računalom te su njihovi valni oblici obrađivani s pomoću programskih alata LabVIEW i MATLAB.

U drugom poglavlju ovoga rada opisani su sklopovi i programski alati koji su korišteni za snimanje i obradu valnih oblika struje i napona transformatora s pomoću računala. U trećem poglavlju opisana je metoda mjerenja te mjerni krug, dok su u četvrtom poglavlju prikazani i analizirani rezultati mjerenja. U zadnjem, odnosno petom poglavlju, napisan je zaključak ovoga rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je snimiti i obraditi valne oblike struje i napona zavojnice, odnosno primara neopterećenog transformatora s pomoću računala. Također, potrebno je opisati metodu mjerenja struje i napona, kao i korištene sklopove te programske alate.

## **2. KORIŠTENI PROGRAMSKI ALATI I MJERNI UREĐAJI**

### **2.1. Programski alati**

#### **2.1.1. LabVIEW**

LabVIEW je skraćeni naziv za Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. To je programsko okruženje u kojemu se stvaraju programi koristeći grafičke zapise, a u tom smislu razlikuje se od uobičajenih programskih jezika kao što su Java, C, C++ u kojima se programira s pomoću teksta. LabVIEW je mnogo više od programskog jezika. To je interaktivni program, odnosno programsko razvojno okruženje s kojim se radi s pomoću računala koji imaju Windows, Mac OS X ili Linux operacijski sustav. LabVIEW je posebno dizajniran za mjerenje, analizu podataka i prezentiranja rezultata korisniku. Budući da LabVIEW ima raznovrsno grafičko korisničko sučelje koje je jednostavno programirati, idealan je za simulacije, prezentacije i opće programiranje. U njemu postoje opsežne biblioteke funkcija i potprograma koji pomažu tijekom pisanja programa na način da nema pokazivače, alociranja memorije i drugih programskih problema koji se nalaze u drugim konvencionalnim programskim jezicima. LabView također sadrži biblioteke specifične za primjenu kodova kod prikupljanja podataka (DAQ), GPIB (General Purpose Interface Bus) i serijske kontrole instrumenata, analize podataka, prezentacije podataka i komunikacije putem interneta. Sadrži velik broj korisnih funkcija, uključujući generiranje signala, obradu signala, filtre, prozore, statistiku, regresiju te linearnu algebru. Grafovi, dijagrami te korisnički definirani grafovi obuhvaćaju mali dio dostupnih izlaznih opcija. Njegovi programi su prenosivi na svim platformama [1].

#### **2.1.2. MATLAB**

MATLAB je programski jezik i programska okolina za numeričko i matricno računanje te za vizualizaciju. MATLAB omogućuje manipulaciju matricama, crtanje funkcija i podataka, implementaciju algoritama, kreiranje korisničkih sučelja te povezivanje s programima koji su pisani na drugim programskim jezicima među kojima su C, C++, C#, Java, Fortran i Python. MATLAB je namijenjen za numeričko računanje, ali s pomoću alata MuPad (simbolički pogon) moguć je pristup simboličkim računalnim mogućnostima. Uz dodatni paket Simulink, dodaje grafičku simulaciju više domena i dizajn temeljen na modelima za dinamičke i ugrađene sustave.

MATLAB je programski jezik koji nema stroga pravila pisanja, što znači da ima takav način pisanja koda kod kojega varijable mogu mijenjati tip koji sadrže tijekom pisanja programa. Varijable se mogu dodijeliti bez deklariranja njihovog tipa, u slučajevima kada ih se treba tretirati kao simbolične objekte i da se njihov tip može promijeniti. Vrijednosti varijabli mogu biti konstante, mogu biti izračunate uz pomoć drugih varijabli ili s pomoću izlaza neke funkcije. U MATLAB-u najosnovnija podatkovna struktura je matrica jer se program prema svim podacima ponaša kao da su matrice. Uz realne brojeve i matrice, MATLAB podržava kompleksne matrice i brojeve. MATLAB može pozvati funkcije i potprograme koji su napisani u programskim jezicima Fortran ili C. Onda dolazi do *wrap* funkcije koja šalje tipove podataka iz MATLAB-a i vraća ih u MATLAB. Biblioteke napisane u Javi, ActiveX-u, Net-u ili Perl-u mogu izravno biti pozvane iz MATLAB-a, a mnoge MATLAB biblioteke implementirane su kao omotači oko Java ili ActiveX biblioteka. Pozivanjem MATLAB-a iz Jave je složeniji postupak, ali se može izvesti s MATLAB-ovim alatom koji se nalazi u MathWorks-u ili programom JMI (Java-to-MATLAB Interface) [2].

## **2.2. Mjerni uređaji**

### **2.2.1. DAQ kartice**

DAQ (Data Acquisition) kartice koriste se za prikupljanje podataka. To je proces mjerenja fizikalnih veličina kao što su napon, struja, temperatura, tlak i zvuk s pomoću računala. DAQ sustav sastoji se od senzora, DAQ mjernog sklopa i računala s razvojnom okolinom za razvoj programske podrške. Uspoređujući s tradicionalnim mjernim sustavima, DAQ sustavi iskorištavaju procesorsku snagu, produktivnost, mogućnost prikaza i povezivanja mogućnosti standardnih računala koji pružaju snažnije, fleksibilnije i isplativije rješenje za mjerenje [1].

### 2.2.2. Mjerne sonde

Mjerne sonde koriste se za spajanje osciloskopa u strujni krug u kojem se vrši mjerenje. Standardne sonde osciloskopa sastoje se od oštrog vrha koji se može spojiti na mjerni krug pomicanjem plastične glave natrag i kopče za uzemljenje. Sonde se dijele na naponske i strujne. Naponska sonda se koristi za mjerenje napona u strujnom krugu, dok se strujna sonda koristi za mjerenje struje [3]. U ovom radu korištene su dvije sonde – strujna sonda (klijesta) Tektronix A622, te naponska sonda GW-Instek GDP-025.

Strujna sonda je električki uređaj koji generira napon proporcionalan struji u krugu koji se mjeri. Zbog poznavanja konstante proporcionalnosti, instrumenti kojima se mjeri napon, mogu se kalibrirati kako bi prikazivali vrijednost struje. Strujne sonde se otvaraju kako bi se omogućilo njihovo stezanje oko električkog vodiča i s time se omogućuje mjerenje struje koja teče kroz vodič bez ikakvog fizičkog kontakta s vodičem ili ikakvog prekidanja strujnog kruga. Mogu se koristiti s pomoću mjernih instrumenata te osciloskopa. U strujne sonde ubrajaju se Rogowski svitak i strujna klijesta. Postoji više tipova strujnih klijesta, a razlikuju se po jakosti struje koju mogu mjeriti. Uobičajena izvedba strujnih klijesta sastoji od strujnog transformatora kod kojeg je jedan namot načinjen od žičanog namota koji je namotan oko jedne ili obje polovice klijesta. Vodič koji provodi struju čini drugi namot tog transformatora. Kao i svaki transformator, ovaj tip radi samo s izmjeničnim valnim oblicima. Dok se vrši mjerenje, vodič protječan strujom predstavlja primarni namot, dok svitak u klijestima predstavlja sekundarni namot.



**Slika 2.1.** Strujna klijesta Tektronix A622.

Specifikacije se mogu pronaći u [4], a najznačajnije su navedene u nastavku.

Preciznost:  $\pm 3\%$   $\pm 50$  mA pri 100 mV/A;

$\pm 4\%$   $\pm 50$  mA pri 10 mV/A;

$\pm 15\%$  max pri 100 mV/A.

Raspon frekvencije: istosmjerno do 100 kHz (-3dB).

Maksimalni radni napon: 600 V.

Naponske sonde koriste se za mjerenje napona u strujnim krugovima. Da bi se osigurala velika preciznost, sonda i instrument s kojima se mjeri ne smiju utjecati na strujni krug. Zbog paralelnog spajanja sonde i instrumenta, njihova impedancija mora biti dovoljno velika da svojim spajanjem ne bi opteretili strujni krug. Visoka linearnost i točnost postiže se korištenjem otpornika s izrazito niskim naponskim koeficijentima. Naponske sonde dijele se na aktivne, pasivne, visokonaponske, opružne te diferencijalne sonde [5]. Diferencijalne sonde mogu se uvrstiti i u aktivne sonde zbog toga što sadrže poluvodiče, a koriste se kada se želi izbjeći opasnost kod mjerenja. Optimizirane su da dobiju samo diferencijalni signal između dvije ispitne točke. Uvijek odbacuju, odnosno ne mjere ili ne prikazuju bilo koju zajedničku vrstu signala. Kako bi se osiguralo i maksimiziralo takvo odbacivanje, dva signala moraju biti identična u smislu prigušenja, frekvencijskog odziva i vremenskog kašnjenja. Diferencijalna signalizacija koristi dva komplementarna signala suprotnog polariteta za prijenos, svaki na svom vodiču, od odašiljača do prijemnika. Okretanjem dva vodiča, štetni učinak kapacitivno spojenog signala je smanjen jer je jednako spojen s dva suprotna vodiča.

U radu je korištena diferencijalna sonda GW-Instek GDP-025.



**Slika 2.2.** Diferencijalna sonda GW-Instek GDP-025.



Njezine specifikacije mogu se pronaći u [6], a najznačajnije su navedene u nastavku.

Propusnost: 25 MHz.

Preciznost:  $\pm 2\%$ .

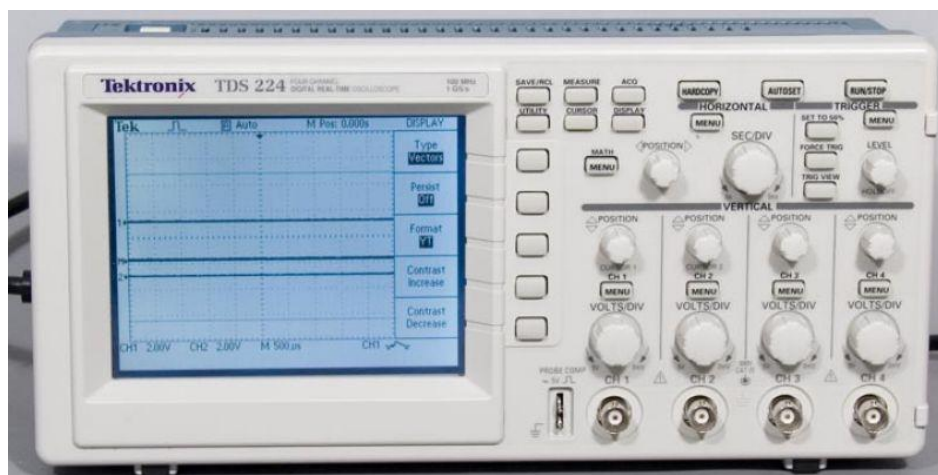
Ulazna impedancija: 4 M $\Omega$ .

Izlazna impedancija: 50  $\Omega$ .

### 2.2.3. Osciloskop

Osciloskop je elektronički instrument koji grafički prikazuje signale napona, obično kao dvodimenzionalni graf jednog ili više signala kao funkciju vremena ili međusobnu ovisnost dviju ili više veličina ovisno o broju ulaza osciloskopa. Prikaz se dijeli na horizontalne i vertikalne podjele. Na horizontalnoj osi prikazuje se vrijeme, dok se na vertikalnoj osi prikazuje trenutni napon. Starije verzije osciloskopa poznate su kao katodni osciloskopi. Katodni osciloskopi funkcioniraju na način da užarena katodna cijev emitira elektrone koji se usmjeravaju u uski snop te se s pomoću sustava pločica za horizontalni i vertikalni otklon usmjeravaju na zaslon osciloskopa (koji je premazan fosforom) gdje se vidi svjetlost u obliku točkica [3]. Moderniji osciloskopi elektronički repliciraju djelovanje katodne cijevi s pomoću zaslona s tekućim kristalima koji su slični onima na prijenosnim računalima. Najsofisticiraniji osciloskopi koriste računala za obradu i prikaz valnih oblika. Većina osciloskopa ima podesive horizontalne i vertikalne postavke pomicanja. U osciloskopima, vodoravno pomicanje mjeri se u sekundama po podioku (s/div). Vertikalno pomicanje mjeri se u voltima po podioku (V/div).

U radu je korišten osciloskop Tektronix TDS 224.



Slika 2.3. Osciloskop Tektronix TDS 224.

Specifikacije se mogu pronaći u [7], a najznačajnije su navedene u nastavku.

Propusnost je 100 MHz.

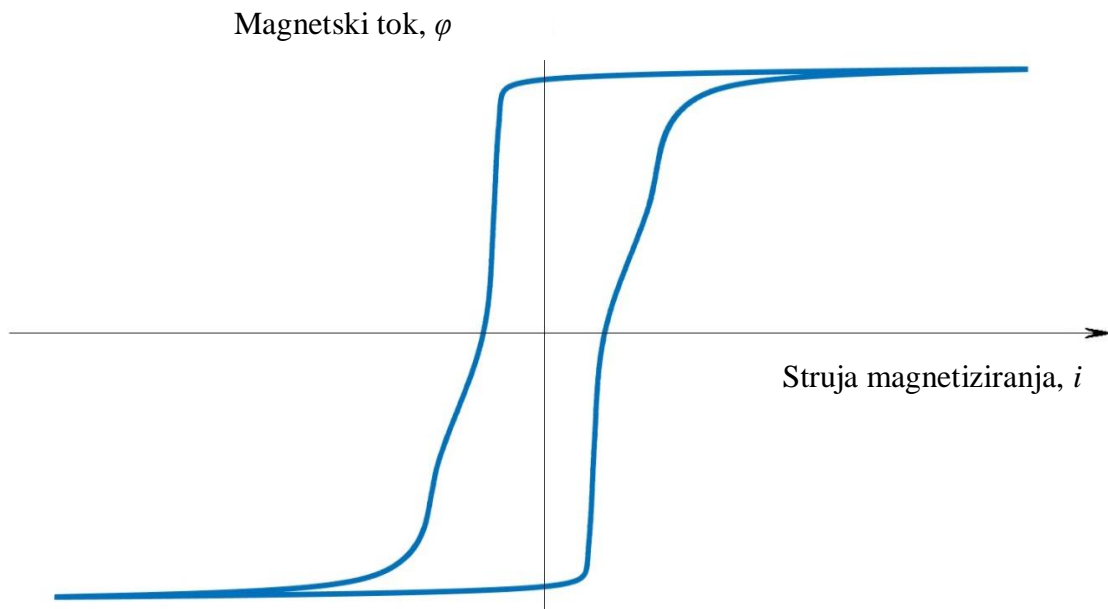
Brzina uzorkovanja 1 GS/s (svaki kanal).

Broj kanala: 4 identična kanala.

Istosmjerna preciznost:  $\pm 3\%$ .

### 3. MJERNI KRUG I METODA MJERENJA

Nakon isključenja napajanja, magnetska jezgra sadržavat će zaostali magnetski tok ( $\Phi_R$ ). Vrijednost zaostalog magnetskog toka može biti u intervalu između pozitivnog i negativnog magnetskog toka zasićenja, to jest između vrijednosti magnetskog toka u trenucima kada je struja magnetiziranja jednaka nuli. Odnos između magnetskog toka ( $\varphi$ ) i struje magnetiziranja ( $i$ ) prikazan je  $\varphi$ - $i$  karakteristikom, poznatom i kao petlja histereze. Primjer petlje histereze feromagnetskog materijala prikazan je na slici 3.1. Zaostali magnetski tok naziva se još i remanentni magnetski tok [8].

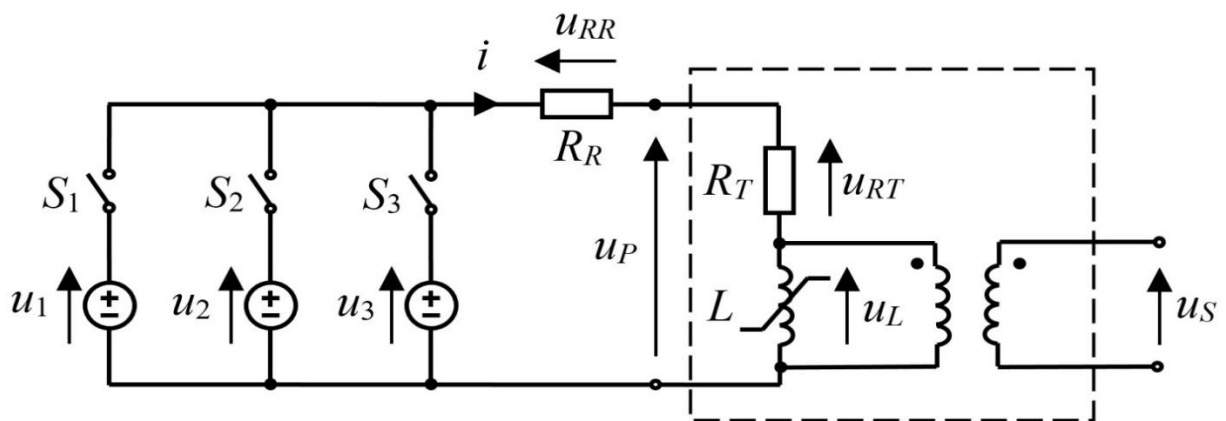


**Slika 3.1.** *Petlja histereza feromagnetskog materijala [8].*

Vrijednost zaostalog magnetskog toka nakon isključenja napajanja zavojnice ili transformatora važna je u nekoliko primjena, poput smanjenja udarne struje zavojnice ili transformatora, izbjegavanja zasićenja strujnog transformatora i predviđanja pojave ferorezonancije. U gotovo svim primjenama magnetska jezgra tvori zatvorenu petlju pa je zaostali magnetski tok zatvoren unutar same jezgre i ne postoji način da se izravno mjeri bez fizičke intervencije u jezgri što u većini slučajeva u praksi nije opcija [8]. Međutim, postoje određene metode kojima se neizravno određuje zaostali magnetski tok. Neki od primjera su mjerenje napona na priključnicama za vrijeme isključenja napajanja, te mjerenje rasipnog magnetskog toka i analiza valnog oblika

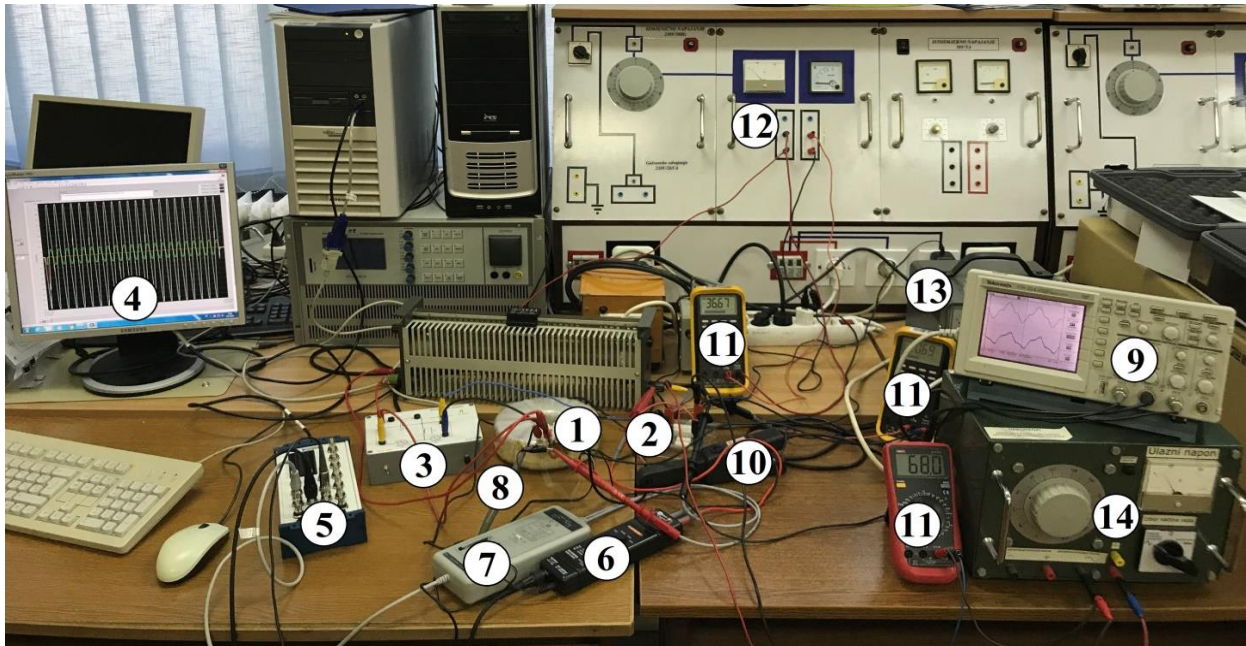
struje. Uz to postoje i demagnetizacija i predmagnetizacija kao tehnike koje zapravo ne određuju zaostali tok, već ga postavljaju na nultu, odnosno na maksimalnu vrijednost.

Mjerni krug s modelom prikazanim na slici 3.2. konstruiran je kako bi se odredio zaostali tok ( $\Phi_R$ ) analizom valnog oblika napona induktiviteta ( $u_L$ ) neopterećenog transformatora. Različiti početni uvjeti magnetskog toka u trenutku isključenja napajanja i faznog kuta uklopa napona napajanja ( $\alpha$ ) bit će primijenjeni kako bi se dokazala valjanost predložene metode neovisno o početnim uvjetima.



Slika 3.2. Model mjernog kruga.

Model mjernog kruga sastoji se od transformatora s dva namota, dodatnog otpora,  $R_R$ , tri izmjenična izvora napajanja ( $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ), dvije elektronički upravljane sklopke ( $S_1$  i  $S_2$ ) i obične mehaničke sklopke ( $S_3$ ).



**Slika 3.3.** Realizacija mjernog kruga.

Transformator (1) ima toroidnu jezgru, 47 namota na primarnoj strani i 7 namota na sekundarnoj strani. Jezgra je izrađena od dinamo limova (tip M5). Nadalje, za ožičenje oba namota koristi se trostruka bakrena žica kružnog poprečnog presjeka površine  $1,3 \text{ mm}^2$ . Površina poprečnog presjeka toroidne jezgre iznosi  $20 \text{ cm}^2$ . Nominalna efektivna vrijednost napona primarnog namota je  $30 \text{ V}$ . Otpor primarnog namota iznosi  $R_T = 0,19 \text{ }\Omega$ . Induktivitet primarnog namota je  $L = 0,59 \text{ H}$  u nezasićenom području. Transformator je modeliran otporom  $R_T$  i savršenim transformatorom spojenim u seriji kao što je prikazano na slici 3.2. Magnetska karakteristika ( $\varphi$ - $i$  karakteristika) nelinearnog induktiviteta  $L$  prikazana je na slici 3.1.

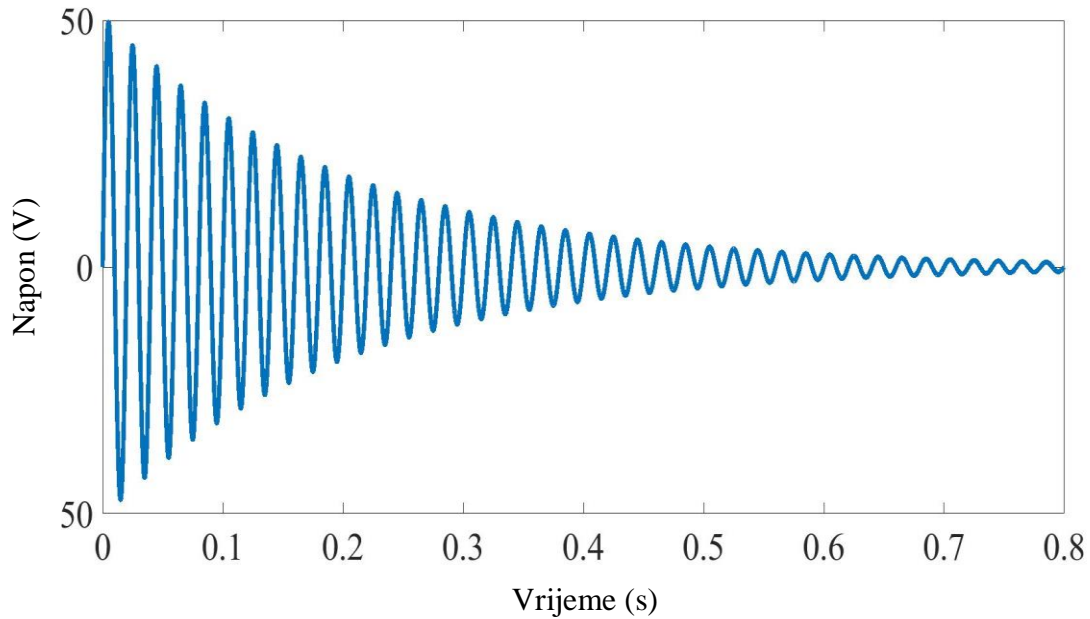
Dodatni otpornik (2) mora biti dodan u seriju s primarnim namotom transformatora za ograničavanje udarne struje ( $i$ ) pri uključanju transformatora na nazivni napon ili veći napon od nazivnog. Otpor dodatnog otpornika je  $R_R = 1,22 \text{ }\Omega$ , što znači da je ukupni otpor jednak zbroju dodatnog otpora i otpora primarnog namota  $R = R_T + R_R = 1,41 \text{ }\Omega$ . Bez dodatnog otpornika, jakost ulazne struje dosegla bi približno  $120 \text{ A}$ , što je previsoka vrijednost za opremu koja se koristi u ovom eksperimentu. Sekundarni namot transformatora je neopterećen i koristi se jedino za mjerenje inducirano napona ( $u_S$ ) koji je potreban za određivanje magnetskog toka ( $\varphi$ ).

Sklopke  $S_1$  i  $S_2$  realizirane su s pomoću trijaka koji su dio elektroničkog sklopnog uređaja (3) upravljanog od strane mikrokontrolera koji pokreće softver instaliran na računaru (4).

Mjerni rezultati se snimaju s pomoću kartice za prikupljanje podataka (DAQ kartice) (5) i odgovarajućeg programskog alata instaliranog na računalo. Valni oblik struje magnetiziranja ( $i$ ) dobiva se snimanjem napona na dodatnom otporniku ( $R_R$ ) s pomoću aktivne diferencijalne sonde (6) i primjenom Ohmovog zakona za izračunavanje valnog oblika. Napon primarnog namota ( $u_P$ ) snima se također aktivnom diferencijalnom sondom (7). Napon sekundarnog namota ( $u_S$ ) snima se pasivnom sondom (8) s omjerom 1:1, što znači da je izmjereni napon izravno doveden na DAQ karticu bez djelitelja i posljedičnog izobličenja. Vrlo je važno imati signal sekundarnog napona ( $u_S$ ) bez izobličenja i šuma zato što se taj signal kasnije integrira kako bi se dobio izračunati magnetski tok ( $\varphi_C$ ). Frekvencija uzorkovanja za svaki kanal bila je 50 kHz. Osciloskop (9) sa strujnom sondom (10) i dvije pasivne naponske sonde koristi se jedino za kontrolu dobivenih rezultata u DAQ softveru. Digitalni multimetri (11) koriste se za podešavanje i upravljanje naponima promjenjivih izmjeničnih izvora. Elektronički sklopni uređaj, računalo, izmjenični izvori i osciloskop galvanski su izolirani od elektroenergetske mreže.

Promjenjivi izmjenični naponski izvor  $u_1$  (12) koristi se za napajanje transformatora. Kut uklopa napona ( $\alpha$ ) izmjeničnog izvora  $u_1$  podešava se s pomoću elektronički upravljane sklopke  $S_1$ . Promjenjivi izmjenični naponski izvor  $u_2$  (13) koristi se za podešavanje vrijednosti toka u trenutku isključenja napajanja transformatora preko elektronički upravljane sklopke  $S_2$ . Promjenjivi izmjenični naponski izvor  $u_3$  (14) koristi se za demagnetiziranje jezgre preko obične mehaničke sklopke  $S_3$ . Frekvencija sva tri izmjenična izvora je 50 Hz.

Svako pojedinačno mjerenje provodi se u tri koraka. Prvi korak je izmjenično demagnetiziranje jezgre s pomoću izmjeničnog izvora  $u_3$  i sklopke  $S_3$ . Izvodi se tako da se polako smanjuje napon promjenjivog izmjeničnog izvora  $u_3$  s efektivne vrijednosti od 36 V na nulu, kao što je prikazano na slici 3.4. Demagnetiziranje je važan preduvjet za postavljanje željene vrijednosti toka isključenja u drugom koraku, posebno kada se žele postaviti niske vrijednosti.



**Slika 3.4.** Demagnetizacija.

Drugi korak je postavljanje vrijednosti toka isključenja ( $\Phi_S$ ) s pomoću izmjeničnog izvora  $u_2$  i sklopke  $S_2$ . Magnetski tok ( $\varphi$ ) povezan je s naponom sekundarnog namota ( $u_s$ ) sljedećom jednadžbom:

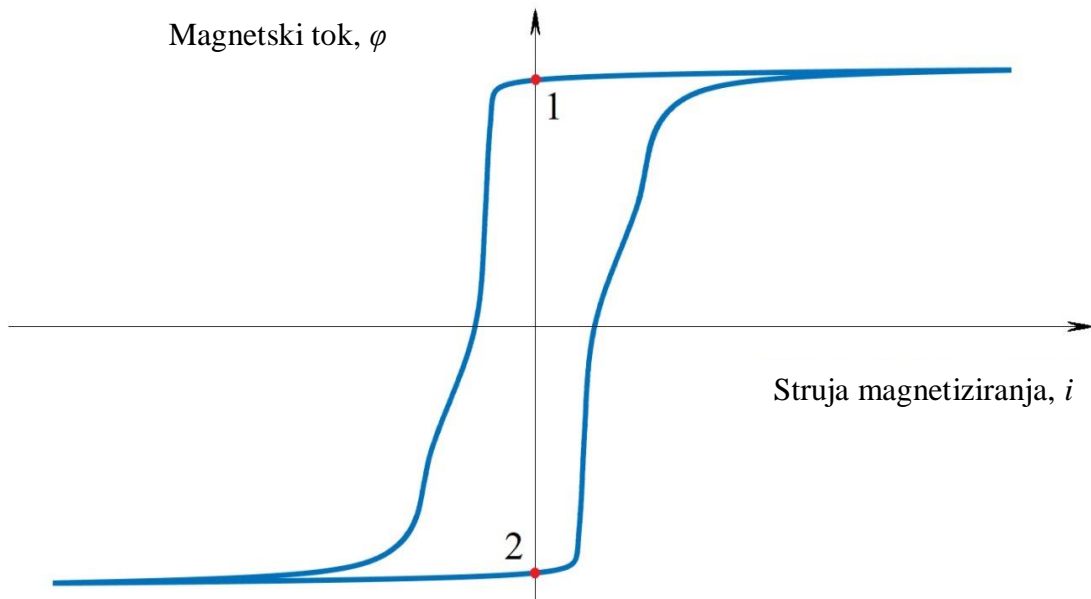
$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t u_s(\tau) d\tau + \varphi(0), \quad (3-1)$$

gdje je  $N_2$  broj namota sekundara, a  $\varphi(0)$  je vrijednost magnetskog toka u trenutku 0. Međutim, prije otvaranja sklopke  $S_2$ , transformator je u ustaljenom stanju u kojemu je istosmjerna komponenta magnetskog toka jednaka nuli. S obzirom na to, magnetski tok može se izraziti kao:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t u_s(t) dt, \quad (3-2)$$

To znači da se vrijednost magnetskog toka u trenutku otvaranja sklopke  $S_2$ , to jest u trenutku isključenja može izračunati na jednostavan način. Elektronički upravljana sklopka  $S_2$  postavljena

je da se otvori u trenutku kada je primarna struja transformatora ( $i$ ) jednaka nuli, kao što se vidi na slici 3.5.

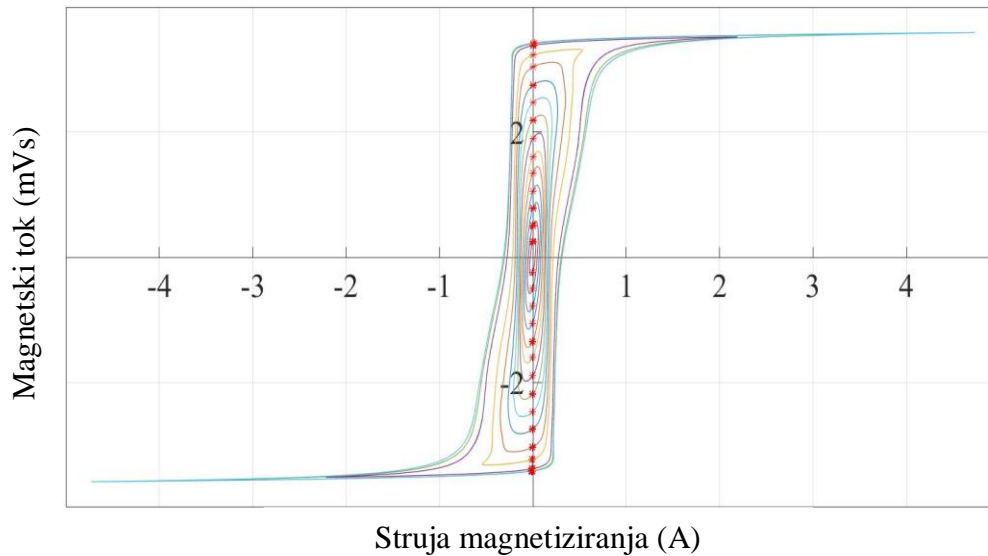


**Slika 3.5.** *Trenutci isključenja.*

Postoje dva moguća slučaja kada struja prolazi kroz nultu vrijednost, što je i prikazano na slici 3.5. kao točka 1 i točka 2. Pri postavljanju pozitivnog toka isključenja, sklopka  $S_2$  će iskllopiti u točki 1, a pri postavljanju negativnog toka isključenja, isklopit će u točki 2.

Ukupno je u ovom pokusu dobiveno 12 različitih  $\varphi$ - $i$  karakteristika, koje su prikazane na slici 3.6.





**Slika 3.6.**  $\varphi$ - $i$  karakteristike.

Vrijednost toka isključenja ( $\Phi_S$ ) postavlja se promjenom efektivne vrijednosti napona izmjeničnog izvora  $u_2$  i trenutkom isklapanja sklopke  $S_2$  (kada struja poprima nultu vrijednost) kao što je prikazano na slici 3.6. Vrijednosti toka isključenja ( $\Phi_S$ ) koje odgovaraju efektivnim vrijednostima napona izmjeničnog izvora  $u_2$  prikazane su u tablici 3.1. (prikazane su samo pozitivne vrijednosti zbog simetrije  $\varphi$ - $i$  karakteristike).

**Tablica 3.1.** *Odgovarajuće vrijednosti zaostalog magnetskog toka i efektivne vrijednosti napona promjenjivog izmjeničnog naponskog izvora  $U_2$ .*

$U_2$ (V)	$\Phi_S$ (mVs)	$U_2$ (V)	$\Phi_S$ (mVs)
36	3.234	18	1.604
33	3.042	15	1.350
30	2.750	12	1.053
27	2.474	9	0.781
24	2.190	6	0.401
21	1.896	3	0.193

Treći korak je uklop primara transformatora koristeći izmjenični izvor  $u_1$ . Efektivna vrijednost napona izmjeničnog izvora  $u_1$  postavljena je na 36 V, što je 20 % više od nazivnog napona primarnog namota transformatora kako bi se brže postiglo ustaljeno stanje. Naime, vremenska

konstanta koja utječe na duljinu prijelaznog stanja je  $L/(R_T+R_R)$ , pri čemu induktivnost induktiviteta  $L$  nije konstantna vrijednost, već se računa kao:

$$L = \frac{d\varphi}{di} \quad (3-3)$$

Iz toga se vidi da kada jezgra uđe u zasićenje, induktivnost  $L$  je značajno manja nego u linearnom dijelu. Što je niža induktivnost  $L$ , niža je i vremenska konstanta, što predstavlja brži ulazak u ustaljeno stanje. To je važno zato što se vrijednost zaostalog toka ( $\Phi_R$ ) dobiva kao negativna vrijednost istosmjerne komponente izračunatog magnetskog toka ( $\varphi_C$ ) u ustaljenom stanju. Drugi početni uvjet, kut uklopa napona napajanja ( $\alpha$ ) je postavljen s pomoću računalom upravljane sklopke  $S_1$ .

Kako bi se dokazalo da različiti početni uvjeti toka isključenja ( $\Phi_S$ ) i kut uklopa napona napajanja ( $\alpha$ ) ne utječu na valjanost predložene metode, mjerenja su provedena sa sljedećim paramterima:

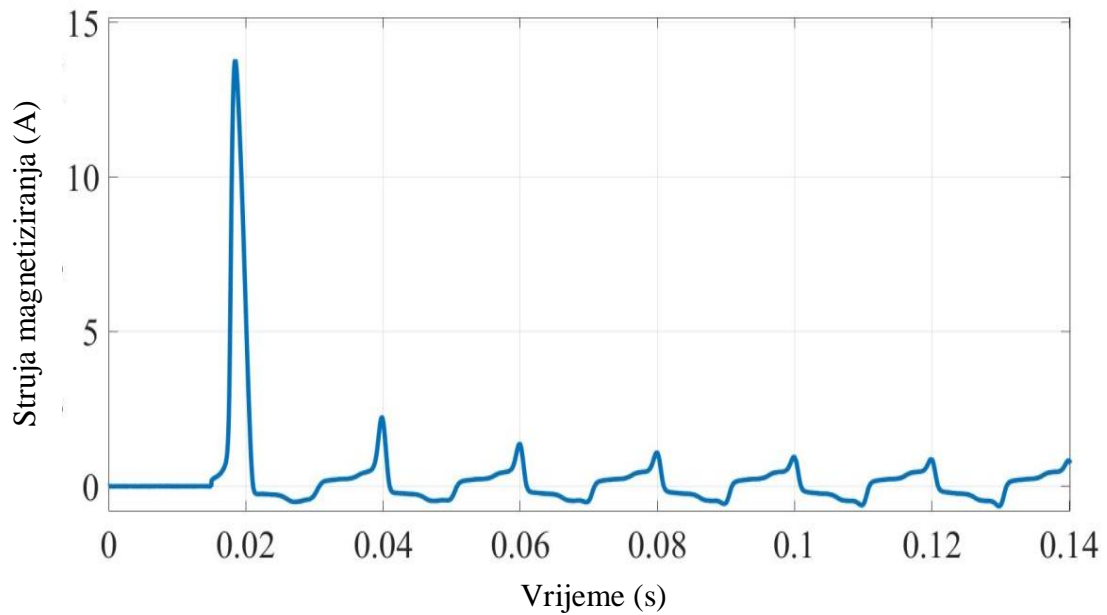
$U_2 = -36 + 3 \cdot k$  [V], gdje je  $k = 0, 1, 2, \dots, 24$ ;

$\alpha = 0^\circ + m \cdot 30^\circ$ , gdje je  $m = 0, 1, 2, \dots, 6$ ;

što ukupno čini 175 mjerenja.

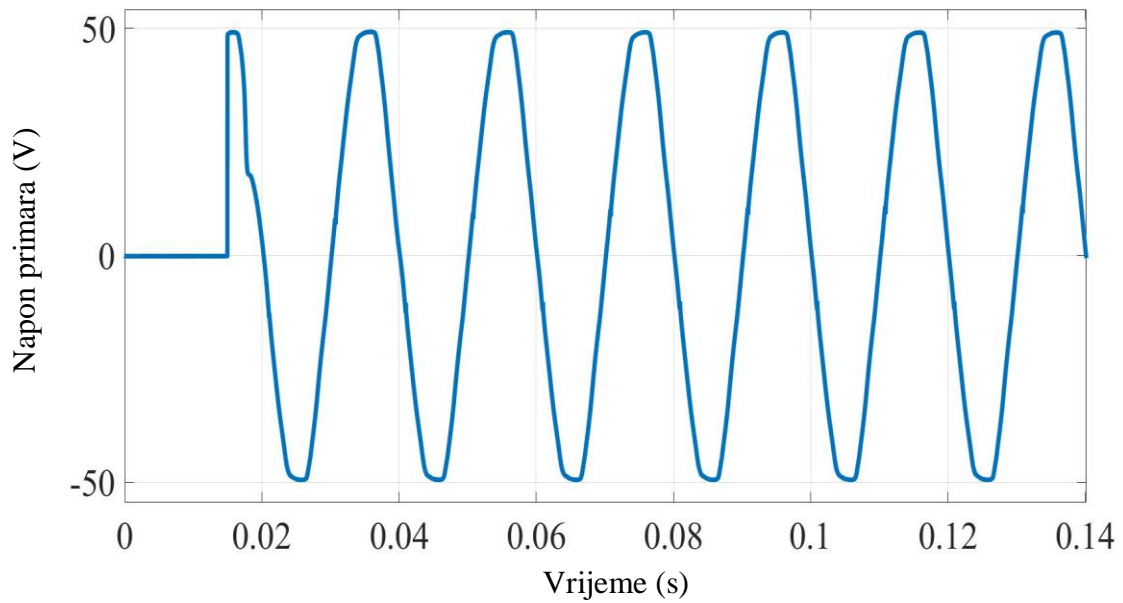
## 4. REZULTATI MJERENJA

Dobiveni rezultati za svako mjerenje uključuju struju magnetiziranja ( $i$ ), napon primara ( $u_P$ ), napon sekundara ( $u_S$ ) i izračunati magnetski tok ( $\varphi_C$ ). Primjer valnog oblika struje magnetiziranja ( $i$ ) prikazan je na slici 4.1.



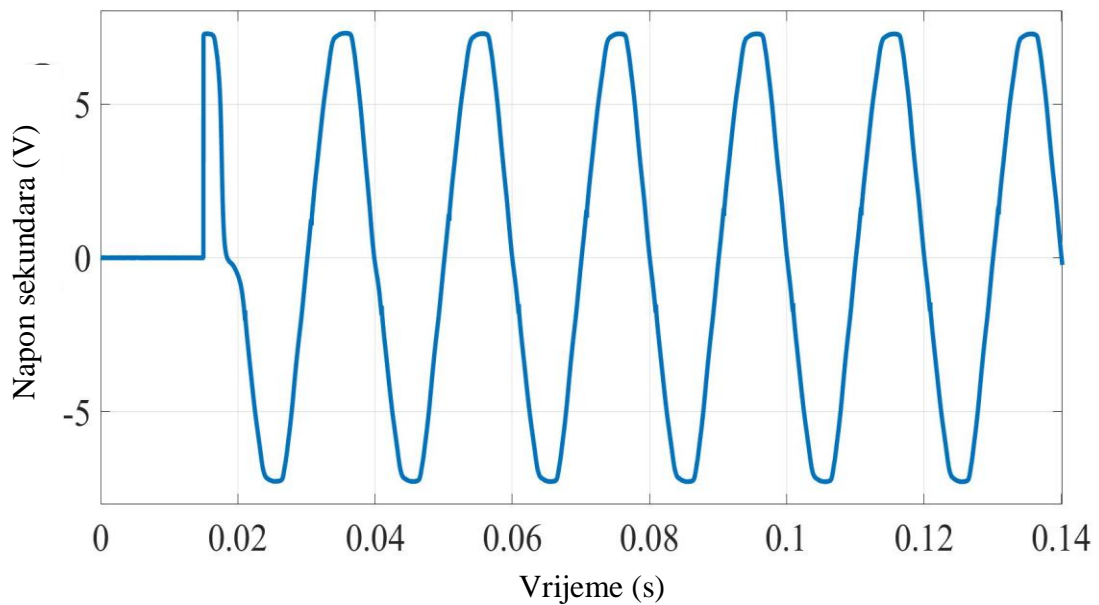
**Slika 4.1.** Struja magnetiziranja ( $i$ ) pri naponu  $U_2 = 18$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Primjer valnog oblika napona primara transformatora ( $u_P$ ) prikazan je na slici 4.2.



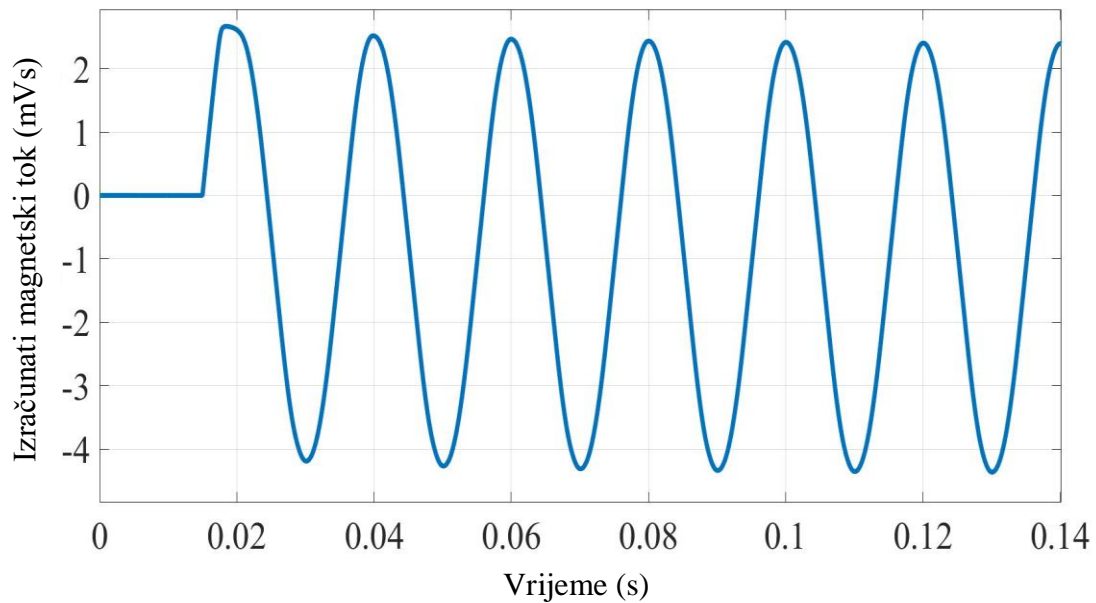
**Slika 4.2.** Napon primara transformatora pri naponu  $U_2 = 18 \text{ V}$  i  $\alpha = 90^\circ$ .

Primjer valnog oblika napona na sekundaru transformatora ( $u_s$ ) prikazan je na slici 4.3.



**Slika 4.3.** Napon na sekundaru transformatora ( $u_s$ ) pri naponu  $U_2 = 18 \text{ V}$  i  $\alpha = 90^\circ$ .

Primjer valnog oblika izračunatog magnetskog toka ( $\varphi_c$ ) prikazan je na slici 4.4.



**Slika 4.4.** Izračunati magnetski tok pri naponu  $U_2 = 18 \text{ V}$  i  $\alpha = 90^\circ$ .

Za svako mjerenje, vrijednost zaostalog toka ( $\Phi_R$ ) dobivena je kao negativna vrijednost istosmjerne komponente izračunatog magnetskog toka ( $\varphi_C$ ) u ustaljenom stanju. U nastavku na slici 4.5. prikazan je kod u MATLAB-u s pomoću kojega je izračunata vrijednost zaostalog magnetskog toka ( $\Phi_R$ ).

```
clear all;close all;clc;

Rl=1.4; %Iznos djelatnog otpora primara transformatora [Ohm]

file_name = 'r0m36.mat'; %Mjerenje pri faznom kutu napona uklopa od 0 stupnjeva te pri
postavljenom maksimalnom negativnom remanentnom toku

load(['C:\Users\Oršulić\Desktop\Marijan Oršulić\FinalnaMjerenja_Matlab\' file_name]);

t = data(:,1);
u1 = data(:,2);
iL = data(:,4);
u2 = data(:,6);

flux1 = cumtrapz(t,u1-Rl*iL); %Magnetski tok izračunat kao integral napona
induktiviteta dobivenog na način da je ukupni napon zavojnice umanjnjen za pad napona na
djelatnom otporu
flux2 = cumtrapz(t,u2); %Magnetski tok izračunat kao integral napona sekundara
transformatora koji je proporcionalan iznosu toka u jezgri
```

**Slika 4.5.** Programski kod MATLAB-a koji je korišten u radu.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je jedna od metoda kojom se snimaju naponi i struje zavojnice, te se računao zaostali magnetski tok u magnetskoj jezgri.

Struja i napon zavojnice snimani su s pomoću strujnih i naponskih sondi. Dobiveni mjerni signali su s pomoću DAQ kartice uvezeni u računalo. Nakon toga, s pomoću programskih alata LabVIEW i MATLAB navedeni mjerni signali su obrađeni i pohranjeni.

U radu su se snimali napon primarnog i sekundarnog namota transformatora te struja magnetiziranja. Struja magnetiziranja snimala se tako što se snimao napon na dodatnom otporniku. Uz pomoć snimljenog napona i primjenom Ohmovog zakona, dobio se valni oblik struje magnetiziranja. Napon sekundara snimao se pasivnom sondom u omjeru 1:1 jer ne smije imati nikakva izobličenja s obzirom da se taj signal kasnije integrira radi računanja magnetskog toka.

Svako pojedinačno mjerenje zaostalog magnetskog toka izvodilo se u tri koraka. Prvo se magnetska jezgra izmjenično demagnetizirala jer je demagnetizacija važan preduvjet za postavljanje niskih željenih vrijednosti zaostalog toka isključenja. Nakon toga, u drugom koraku se postavljala vrijednost magnetskog toka isključenja, a to se postizalo promjenom efektivne vrijednosti napona izmjeničnog izvora. U trećem koraku uklopljen je primar transformatora čiji napon je postavljen na 120 % nazivnog napona jer se tako brže postiglo ustaljeno stanje. Važno je postići ustaljeno stanje zbog toga što se u tome stanju vrijednost zaostalog magnetskog toka dobiva kao negativna vrijednost istosmjerne komponente izračunatog magnetskog toka.

Mjerenja su provedena tako da se napon izmjeničnog izvora mijenjao od  $-36\text{ V}$  do  $36\text{ V}$  u koracima po  $3\text{ V}$  te kut uklopa napona od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  u koracima od  $30^\circ$ . Dobivene vrijednosti zaostalog magnetskog toka su očekivane. Pri jednakim naponima izvora, a različitim kutevima uklapanja, vrijednost zaostalog magnetskog toka bila je približno jednaka. Za iste vrijednosti napona izvora, ali drugačijeg predznaka, vrijednost zaostalog toka je u apsolutnom iznosu bila jednaka. Iz toga se može zaključiti da je metoda kojom je provedeno mjerenje dobro postavljena.

## LITERATURA

- [1] National Instruments (2019), [www.ni.com](http://www.ni.com) , zadnja posjeta 23.8.2019.
- [2] The Mathworks Inc.(1994), Mathworks, [www.mathworks.com/products/matlab.html](http://www.mathworks.com/products/matlab.html) . Zadnja posjeta 23.8.2019.
- [3] V. Bego Mjerenja u elektrotehnici Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [4] Tektronix Inc (2019), Tektronix <https://download.tek.com/manual/A622-Current-Probe-Instructions-070888305.pdf> , zadnja posjeta 22.8.2019.
- [5] C. F. Coombs (1994.), Electronic instrument handbook
- [6] Good Will Instrument Co., Ltd.(2018), Good Will Instrument <https://www.gwinstek.com/en-global/products/downloadSeriesDownNew/418/82> , zadnja posjeta 22.8.2019.
- [7] Tektronix Inc (2019), Tektronix, <https://uk.tek.com/datasheet/tds200-series> , zadnja posjeta 20.8.2019
- [8] Kuzmanović, B. Osnove elektrotehnike I Zagreb: Element, 2000.

## SAŽETAK

U ovom radu opisan je način na koji se snimaju struja i napon zavojnice te izračunava zaostali magnetski tok. Valni oblik magnetskog toka dobiven je integriranjem napona sekundarnog namota neopterećenog transformatora. Iznos remanentnog magnetskog toka jednak je negativnoj vrijednosti istosmjerne komponente izračunatog magnetskog toka u ustaljenom stanju.

**Ključne riječi:** struja zavojnice, napon zavojnice, zaostali magnetski tok.

## **Obtaining and processing waveforms of current and voltage of a coil using computer**

### **ABSTRACT**

This paper describes how to measure current and voltage of a coil and obtain residual magnetic flux value. Waveform of magnetic flux is obtained by integrating the secondary winding voltage. Value of residual magnetic flux is equal to the negative value of the DC component of the calculated steady state magnetic flux.

**Key words:** coil current, coil voltage, residual magnetic flux.



## **ŽIVOTOPIS**

Marijan Oršulić rođen je 21. prosinca 1996. godine u Vinkovcima. Nakon završetka Osnovne škole Josipa Kozaraca u Vinkovcima, upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima. Godine 2015. upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek, danas Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Na drugoj godini studija opredjeljuje se za izborni blok elektroenergetika.

---