

# Analiza i usporedba metoda određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri

---

**Delaš, Mihovil**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:200:430007>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**

*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**

**Analiza i usporedba metoda određivanja remanentnog toka  
u magnetskoj jezgri**

**Završni rad**

**Mihovil Delaš**

**Osijek, 2023.**

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| <b>1. UVOD</b> .....  | 1  |
| <b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....   | 1  |
| <b>2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK</b> .....  | 2  |
| <b>2.1. Neophodnost određivanja remanentnog magnetskog toka</b> .....   | 3  |
| <b>3. METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA</b> .....  | 6  |
| <b>3.1. Metoda snimanja napona na priključnicama tijekom isključenja napajanja</b> .....  | 6  |
| <b>3.2. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi ustaljenog stanja uslijed uključanja transformatora na nazivni izmjenični napon</b> ..... | 7  |
| <b>3.3. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključanja transformatora na izmjenični napon</b> .....        | 10 |
| <b>3.4. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključanja transformatora na niski istosmjerni napon</b> ..... | 12 |
| <b>3.6. Demagnetiziranje</b> .....  | 14 |
| <b>3.7. Predmagnetiziranje</b> .....  | 17 |
| <b>3.8. Mjerenje rasipnog toka</b> .....  | 18 |
| <b>3.9. Analiziranje valnog oblika udarne struje magnetiziranja</b> .....   | 18 |
| <b>4. USPOREDBA METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA</b> .....  | 20 |
| <b>4.1. Podjela i usporedba metoda po području primjene</b> .....   | 20 |
| <b>4.2. Usporedba metoda s obzirom na prednosti i nedostatke</b> .....  | 21 |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b> .....   | 27 |
| <b>LITERATURA</b> .....   | 29 |
| <b>SAŽETAK</b> .....  | 30 |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | 30 |
| <b>ŽIVOTOPIS</b> .....  | 31 |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 14.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

|   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime Pristupnika:</b>   | Mihovil Delaš   |
| <b>Studij, smjer:</b>   | Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija  |
| <b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>  | 4657, 22.07.2019.   |
| <b>OIB Pristupnika:</b>   | 80089181533   |
| <b>Mentor:</b>  | prof. dr. sc. Kruno Miličević   |
| <b>Sumentor:</b>  | dr. sc. Dragan Vulin  |
| <b>Sumentor iz tvrtke:</b>  |   |
| <b>Naslov završnog rada:</b>  | Analiza i usporedba metoda određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri   |
| <b>Znanstvena grana rada:</b>   | <b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>  |
| <b>Zadatak završnog rad:</b>  | Definirati magnetski tok. Opisati pojavu remanentnog magnetskog toka. Naveći primjere iz prakse u kojima je utjecaj remanentnog toka značajan. Detaljno opisati sve postojeće metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri te za svaku navesti područje primjene. Usporediti sve navedene metode na temelju nekoliko kriterija.<br>Sumentor: dr.sc. Dragan Vulin |
| <b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>  | Izvrstan (5)  |
| <b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b> | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda<br>Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda<br>Razina samostalnosti: 3 razina   |
| <b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>   | 14.09.2023.   |
| <b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>   | 24.09.2023.   |
| <b>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</b>  | <i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>  |
|   | Datum:  |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 25.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Mihovil Delaš

**Studij:**

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4657, 22.07.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza i usporedba metoda određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Kruno Miličević

i sumentora dr. sc. Dragan Vulin

moj vlastiti 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, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# 1. UVOD

Remanentni magnetski tok nalazi se u jezgri zavojnice ili transformatora te može prouzročiti razne probleme u elektroenergetskom sustavu ako njegov iznos nije određen.

Određivanje remanentnog toka bitno je u nekoliko područja, od kojih su najbitnija područje smanjenja udarne struje pri uklopu transformatora, područje sprječavanja zasićenja jezgre strujnog transformatora te područje predviđanja pojave ferorezonancije.

Najraširenija metoda određivanja remanentnog toka, korištena u područjima smanjenja udarne struje transformatora i predviđanja pojave ferorezonancije, je snimanje napona na jednom od namota tijekom isključenja transformatora [1]. Remanentni tok također može biti određen s još nekoliko metoda koje se opisuju dalje u radu.

Drugo poglavlje ovog rada definira magnetski tok, opisuje pojavu remanentnog magnetskog toka te navodi primjere iz stvarnog života gdje je utjecaj remanentnog toka značajan. Treće poglavlje detaljno opisuje sve postojeće metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri, za svaku od kojih se navode područja primjene, te se u četvrtom poglavlju sve navedene metode uspoređuju na temelju nekoliko kriterija. Zadnje poglavlje ovog završnog rada sadržava zaključak.

## 1.1. Zadatak završnog rada

U ovom radu potrebno je prvo definirati magnetski tok i opisati pojavu remanentnog magnetskog toka. Također je potrebno navesti slučajeve iz prakse gdje je utjecaj remanentnog magnetskog toka bitan. Zatim je potrebno detaljno opisati sve postojeće metode određivanja remanentnog toka, za svaku od metoda navesti područje primjene te na kraju usporediti sve navedene metode na temelju nekoliko kriterija.

## 2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK

Magnetski tok ( $\Phi$ ) je fizikalna veličina određena skalarnim produktom magnetske indukcije  $B$  i površine  $S$  kroz koju taj tok prolazi, te opisuje magnetsku indukciju kroz navedenu površinu. Uopćeno, magnetski tok kroz neku površinu razmjernan je broju silnica koje prolaze kroz tu površinu. Mjerna jedinica magnetskog toka je veber (Wb) [2].

Izraz za izračunavanje magnetskog toka:

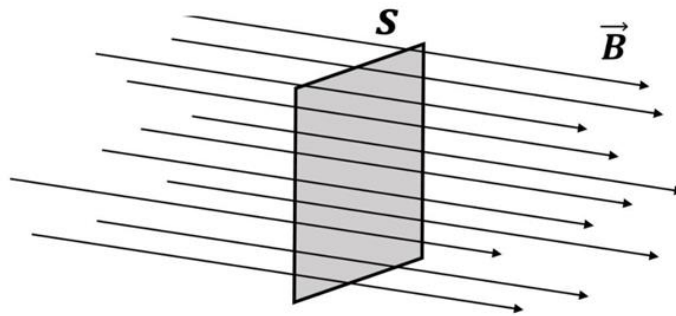
$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (2 - 1)$$

gdje su:

$\Phi$  - magnetski tok [Wb],

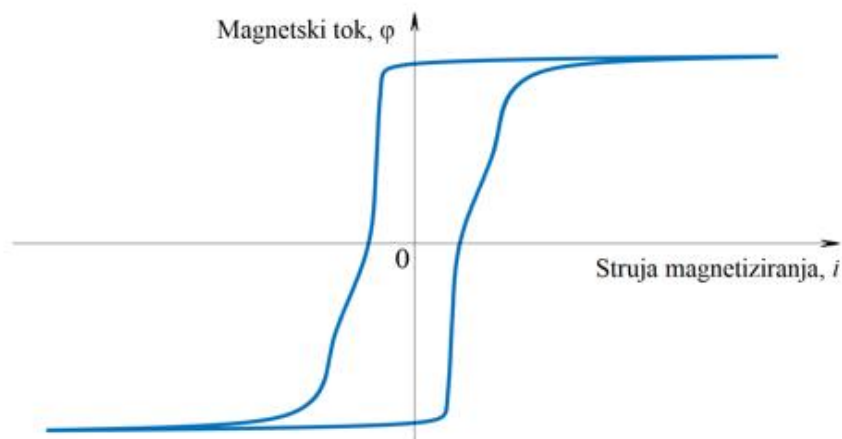
$B$  - magnetska indukcija [T],

$S$  - površina presjeka [ $m^2$ ]



**Slika 2.1.** Magnetski tok koji prolazi kroz površinu  $S$  [7]

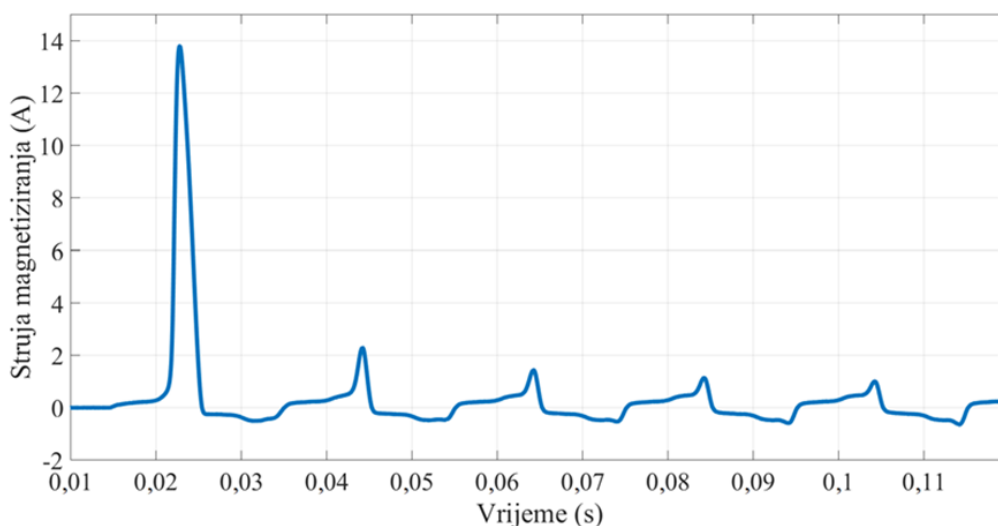
Remanentni magnetski tok ( $\Phi_R$ ) je pojava koja nastaje u feromagnetskim materijalima, poput željeza (Fe) i kobalta (Co). Nakon isključenja napajanja, u tim materijalima se pojavljuje remanentni ili zaostali magnetski tok. Pošto je on istosmjernan i konstantan, ne može ga se izmjeriti neizravnim metodama jer se napon ne inducira na priključnicama. Magnetske karakteristike prikazuju se najčešće uz pomoću  $\phi$ - $i$  ravnine, koja prikazuje zavisnost magnetskog toka ( $\phi$ ) o struji magnetiziranja ( $i$ ). Ako je transformator u ustaljenom stanju, dobiva se zatvorena petlja, petlja histereze, prikazana na slici 2.2. [1].



**Slika 2.2.** Primjer petlje histereze u  $\phi$ - $i$  ravnini [1]

## 2.1. Neophodnost određivanja remanentnog magnetskog toka

Remanentni tok stvara probleme pri uklapanju neopterećenog transformatora na nazivni napon, gdje je moguća pojava udarne struje magnetiziranja. Udarne struja magnetiziranja može izazvati pojavu nekoliko neželjenih učinaka, poput poremećaja u radu osigurača i zaštitnih releja, mehaničkih oštećenja namota, rezonancije i pada napona [1]. Slika 2.3. prikazuje valni oblik udarne struje magnetiziranja.

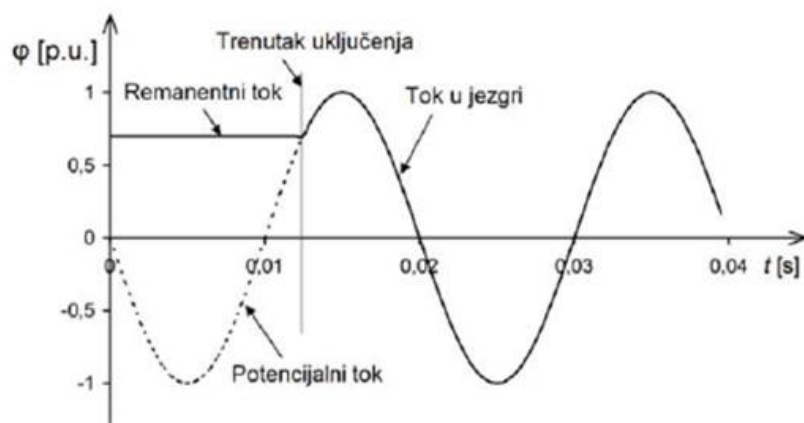


**Slika 2.3.** Valni oblik udarne struje magnetiziranja [1]



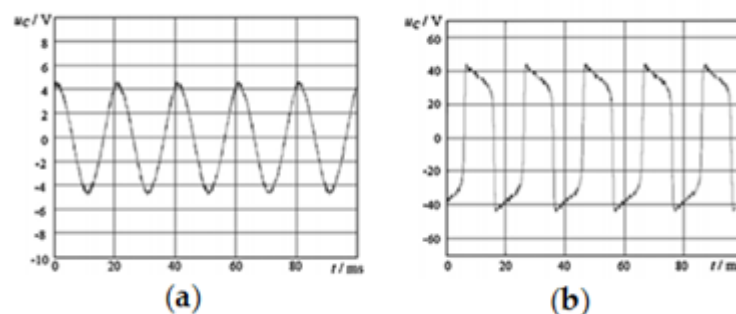
Optimalan način za izbjegavanje udarne struje magnetiziranja je da se odabere kut faze napona napajanja u trenutku uključenja, koji će po iznosu odgovarati remanentnom toku u jezgri, na način da iznos potencijalnog toka bude jednak iznosu remanentnog toka u trenutku uključenja (slika 2.4.) [1].

Ako transformator nije uključen u pravilnom trenutku, dolazi do povećanja toka u jezgri s obzirom na potencijalni tok, što uzrokuje zasićenje jezgre, te je posljedica velik iznos udarne struje.



**Slika 2.4.** Optimalan trenutak uklopa [3]

Također, remanentni tok ima bitnu ulogu u predviđanju pojave ferorezonancije. Ferorezonancija je prijelaz iz monoharmonijskog u višeharmonijsko ustaljeno stanje (slika 2.5.). Karakteriziraju ju penaponi koji uzrokuju oštećenje mjerne opreme i izobličeni valni oblici napona i struje. Sama pojava ferorezonancije je rijetka i teško se predviđa zbog nepreciznosti mjerenja početnih uvjeta. Upravo se zbog te činjenice mjeri remanentni magnetski tok uz pomoću kojeg se određuje zavisnost pojave ferorezonancije o početnim uvjetima.



**Slika 2.5.** Prikaz monoharmonijskog (a) i ferorezonantnog (b) ustaljenog stanja [4]

Zadnje područje gdje remanentni magnetski tok posjeduje bitnu funkciju je sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora, pošto ono negativno utječe na rad zaštitnih releja, posebno tokom prijelaznog stanja, i rezultira izobličenjima izlaznih signala. Ovaj problem je posebno izražen u režimu automatskog ponovnog uključivanja sustava. U takvim slučajevima, nakon defekta i isključivanja odgovarajućeg prekidača, značajan iznos remanentnog magnetskog toka ostaje zadržan u jezgri strujnog transformatora. Ključne strategije za sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora uključuju upotrebu jezgre sa zračnim rasporom, upotrebu materijala jezgre sa značajnom permeabilnošću i veoma niskim maksimalnim remanentnim magnetskim tokom, te primjenu elektroničkih strujnih transformatora.

### **3. METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA**

U ovom radu opisano je devet metoda korištenih za određivanje remanentnog magnetskog toka:

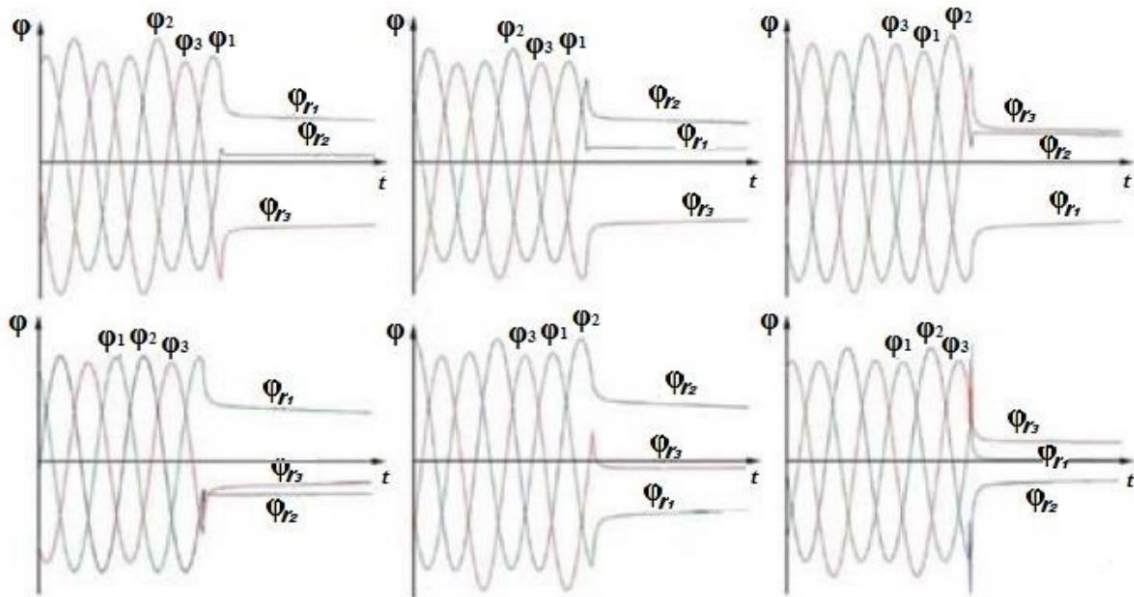
1. Metoda snimanja napona na priključnicama tijekom isključenja napajanja
2. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi ustaljenog stanja uslijed uključanja transformatora na nazivni izmjenični napon
3. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključanja transformatora na izmjenični napon
4. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključanja transformatora na niski istosmjerni napon
5. Analiza male petlje histereze
6. Demagnetiziranje
7. Predmagnetiziranje
8. Mjerenje rasipnog toka
9. Analiziranje valnog oblika udarne struje magnetiziranja

#### **3.1. Metoda snimanja napona na priključnicama tijekom isključenja napajanja**

Metoda snimanja napona na priključnicama tijekom isključenja transformatora s napajanja je često korištena u praksi. Funkcionira tako da se napon na priključnicama snimi neposredno prije isključenja transformatora s napajanja. Pretpostavljajući konstantnost remanentnog magnetskog toka između isključenja i ponovnog uključanja transformatora, magnetski tok u jezgri se računa integriranjem snimljenog napona. Vrijednost izračunatog magnetskog toka u trenutku isključenja bit će jednaka vrijednosti remanentnog toka. Jednostavnost ove metode je glavni razlog njene široke primjene u praksi. Pošto se koristi napon samo jednog namota, ova metoda će biti jeftinija u usporedbi s drugim metodama jer je velik broj transformatora već opremljen sustavom za nadzor koji se može koristiti za mjerenje napona. Također, ova metoda je jedina metoda koja se koristi za predviđanje pojave ferorezonancije.

Najveći nedostatak ove metode je sama pretpostavka da će remanentni magnetski tok ostati nepromijenjen do idućeg uključanja transformatora, pošto se remanentni tok može promijeniti nakon isključenja, pod uvjetom da se transformator spoji na mrežu putem prekidača s paralelno spojenim kondenzatorima. Kod isključenja transformatora, dolazi do slučajeva prikazanih na slici

3.1. [5], koja prikazuje nekolicinu izmjerenih karakteristika remanentnog toka prilikom isključenja trofaznog transformatora.

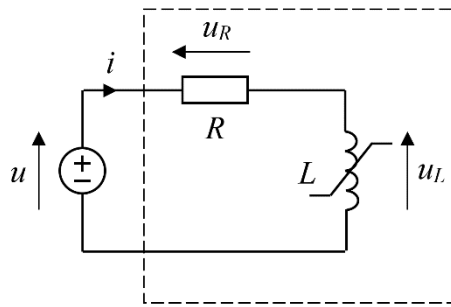


**Slika 3.1.** Izmjereni remanentni magnetski tokovi pri isključenju trofaznog transformatora [5]

Remanentni magnetski tok je sklon promjenama uslijed magnetske viskoznosti u slučajevima kada nema vanjskog utjecaja jer se demagnetizirana jezgra može nalaziti u nekom stanju koje nije nužno u energetskej ravnoteži. Također, bitan nedostatak je da se remanentni magnetski tok ne može odrediti ako se napon na jednom od namota nije snimio tokom isključenja.

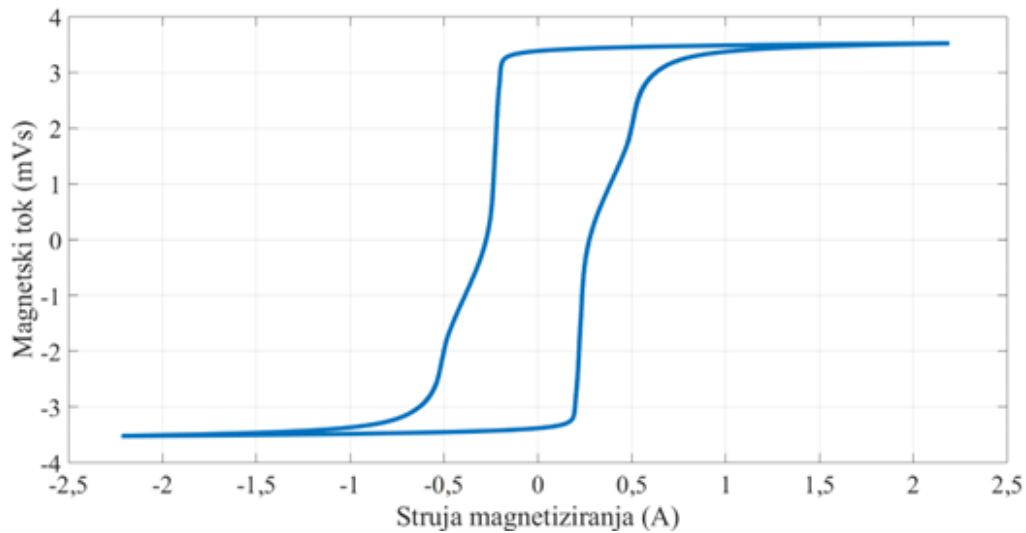
### 3.2. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi ustaljenog stanja uslijed uključenja transformatora na nazivni izmjenični napon

Ova metoda je zasnovana na pretpostavci da će kod ustaljenog stanja, kada je primijenjen izmjenični napon, magnetski tok unutar jezgre transformatora biti potpuno izmjeničan te neće sadržavati istosmjernu komponentu [1]. Nužno je izvršiti integraciju napona na neopterećenom sekundaru transformatora od trenutka uklopa do postizanja ustaljenog stanja, što će omogućiti određivanje valnog oblika magnetskog toka u jezgri transformatora. Model transformatora koji se koristi pri ovoj metodi prikazan je slikom 3.2.



**Slika 3.2.** Model neopterećenog transformatora spojenog na izmjenični izvor

Sastavni dijelovi modela su linearni otpor  $R$  i nelinearni induktivitet  $L$  spojeni u seriju. Ako se na primarnom namotu neopterećenog transformatora primijeni izmjenični monoharmonijski napon, dobiva se karakteristika nelinearnog induktiviteta  $L$  [6] (Slika 3.3.).



**Slika 3.3.** Karakteristika nelinearnog induktiviteta  $L$

Ako napon izvora  $u$  iznosi:

$$u(t) = U \sin \omega t \quad (3 - 1)$$

gdje je :

$U$  – vršna vrijednost napona izvora

$\omega$  – frekvencija izvora

$t$  – vremenska varijabla

Jednadžba mreže bit će:

$$iR + N \frac{d\varphi}{dt} = U \sin \omega t \quad (3 - 2)$$

gdje je:

$\varphi$  – magnetski tok induktiviteta

$N$  – broj zavoja induktiviteta

Pošto se remanentni tok određuje u ustaljenom stanju, jednadžba (3-2) se izrazi s istosmjernim vrijednostima:

$$I(0)R + N \frac{d\Phi(0)}{dt} = U(0) \quad (3 - 3)$$

gdje je:

$I(0)$  – istosmjerna komponenta struje magnetiziranja ( $i$ )

$\Phi(0)$  – istosmjerna komponenta magnetskog toka ( $\varphi$ )

$U(0)$  – istosmjerna komponenta napona izvora ( $u$ )

Magnetski tok induktiviteta iznosi:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau + \Phi_R \quad (3 - 4)$$

gdje je:

$\Phi_R$  – remanentni magnetski tok

$\tau$  – vremenska varijabla

Kako bi se u ustaljenom stanju izrazila istosmjerna varijabla magnetskog toka  $\Phi(0)$ , koristi se jednadžba (3-4):

$$\Phi(0) = \frac{1}{T} \int_{t_{US}}^{t_{US}+T} \left[ \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau + \Phi_R \right] dt \quad (3 - 5)$$

gdje je:

$T$  – period napona

$t_{US}$  – trenutak u ustaljenom stanju

Pošto je  $\Phi(0)$  u ustaljenom stanju jednak nuli, moguće je izraziti remanentni magnetski tok uvrštavajući  $\Phi(0) = 0$  u jednadžbu (3-5):

$$\Phi_R = -\frac{1}{T} \int_{t_{US}}^{t_{US}+T} \left[ \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau \right] dt \quad (3-6)$$

Uvođenjem dodatne varijable valnog oblika magnetskog toka  $\varphi_{VO}$  jednadžba (3-6) se pojednostavljuje:

$$\varphi_{VO} = \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau \quad (3-7)$$

Konačno, remanentni tok se može izraziti:

$$\Phi_R = -\frac{1}{T} \int_{t_{US}}^{t_{US}+T} \varphi_{VO}(t) dt \quad (3-8)$$

Bitno je da se srednja vrijednost varijable  $\varphi_{VO}$  izračuna iz periode u ustaljenom stanju. Jednadžba (3-8) prikazuje da će remanentni magnetski tok biti jednak negativnoj srednjoj vrijednosti varijable  $\varphi_{VO}$  [1].

### **3.3. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključenja transformatora na izmjenični napon**

Ova se metoda bazira na prijašnjem određivanju točke u  $\varphi$ -i ravnini, koja će biti prolazna točka krivulje magnetiziranja pri spajanju transformatora na izmjenični napon. Nakon određivanja točke, napon neopterećenog sekundara se integrira, koji će po iznosu odgovarati naponu na induktivitetu, počevši od trenutka uključenja sve do trenutka kada radna točka doseže odabranu točku u  $\varphi$ -i

ravnini s vrijednostima koje su prethodno određene. U većini slučajeva se to događa tokom prve periode napona izvora. Točka u  $\varphi$ -i ravnini odabire se tako da se nalazi u području zasićenja s pravilno odabranim iznosima magnetskog toka i struje magnetiziranja, koje se u ovom slučaju definiraju kao tok zasićenja  $\Phi_Z$  i struja zasićenja  $I_Z$ . Kako bi se točka odabrala, potrebno je da pri određenom iznosu struje magnetiziranja postoji jedinstven iznos magnetskog toka na glavnoj petlji histereze. Optimalna točka će biti ona pri kojoj struja ima najniži iznos.

Kako bi se dokazala ispravnost metode, upotrebljen je model transformatora prikazan slikom 3.2. Ako napon izvora ( $u$ ) iznosi:

$$u(t) = \hat{U} \sin \omega t \quad (3 - 9)$$

Kirchoffov zakon napona modela bit će:

$$iR + u_L = \hat{U} \sin \omega t \quad (3 - 10)$$

Magnetski tok induktiviteta iznosi:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau + \Phi_R \quad (3 - 11)$$

Gledajući jednadžbu (3-11), tok zasićenja  $\Phi_Z$  iznositi će:

$$\Phi_Z = \varphi(t_Z) = \frac{1}{N} \int_0^{t_Z} u_L(t) dt + \Phi_R \quad (3 - 12)$$

gdje je:

$t_Z$  – trenutak u kojem će radna točka dostići odabranu točku zasićenja

Pošto su vrijednosti toka i struje zasićenja poznate, remanentni magnetski tok izrazi se kao:

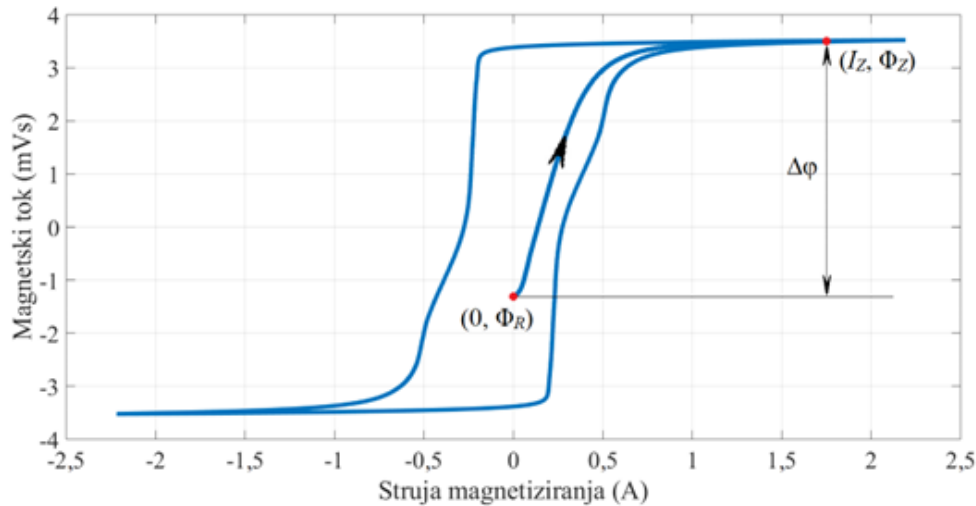
$$\Phi_R = \Phi_Z - \frac{1}{N} \int_0^{t_Z} u_L(t) dt \quad (3 - 13)$$

Razlika između toka zasićenja i remanentnog toka može se opisati kao magnetski tok razlike  $\Delta\varphi$ :



$$\Delta\varphi = \Phi_Z - \Phi_R = \frac{1}{N} \int_0^{t_Z} u_L(t) dt \quad (3 - 14)$$

Na slici 3.4. [1] prikazani su iznosi remanentnog toka  $\Phi_R$ , toka zasićenja  $\Phi_Z$ , struje zasićenja  $I_Z$  te magnetski tok razlike  $\Delta\varphi$ .



**Slika 3.4.** Magnetski tok zasićenja, razlike, remanentni magnetski tok i struja zasićenja u  $\varphi$ - $i$  ravnini [1]

### 3.4. Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključenja transformatora na niski istosmjerni napon

Teorijska podloga ove metode jednaka je onoj opisanoj u potpoglavlju 3.3. Razlika se nalazi u činjenici da se kod ove metode transformator uklapa na niski istosmjerni napon. Također, ima dvije prednosti s obzirom na metodu u potpoglavlju 3.3. Prva prednost je da neće biti slučajeva u kojima je remanentni magnetski tok nemoguće izmjeriti, dok je druga prednost uključenje transformatora na napon koji je niži od nazivnog [1]. Upotrebom ove metode moguće je precizno izmjeriti remanentni magnetski tok u jezgri bez poznavanja prethodnih stanja jezgre. Kao u prethodno opisanoj metodi, nužno je snimiti glavnu petlju histerenze i odrediti točku zasićenja prije početka mjerenja [1].

### 3.5. Analiza male petlje histereze

Metoda koja koristi analizu male petlje histereze može učinkovito i detaljno izmjeriti remanentni magnetski tok na kraju perioda neuklopljenosti transformatora, što je karakteristika i prethodne dvije metode opisane u ovom poglavlju. Međutim, ova metoda može također odrediti remanentni tok pod uvjetom da njegova vrijednost ostane nepromijenjena nakon provedbe mjerenja. Ova metoda ima značajnu prednost jer omogućuje proširenje mjernog područja primjene na smanjenje udarne struje magnetiziranja, uz kontrolirani proces uklopa. Osim toga, to predstavlja značajnu prednost u usporedbi s najčešće korištenom metodom integriranja napona na jednom namotu, jer primjenom metode integriranja napona nije moguće izmjeriti remanentni magnetski tok ukoliko su prethodna stanja nepoznata, točnije ako se napon nije zabilježio prije isključivanja. Također, uporabom analize male petlje histereze, remanentni tok se određuje neposredno prije uklopa transformatora. To implicira da ova metoda ostaje pouzdana, bez obzira na eventualne promjene remanentnog toka koje se mogu dogoditi nakon posljednjeg isključivanja transformatora zbog magnetske viskoznosti i vanjskih utjecaja. Nadalje, još jedna prednost ove metode je korištenje izvora s relativno niskim naponom, upotrebljavanim pri generiranju testnog signala za određivanje remanentnog magnetskog toka, posebice važno kada se mjerenje vrši nad visokonaponskim energetske transformatorima. Osim toga, metoda je neinvazivna jer nema potrebe za fizičkom intervencijom u bilo koji dio transformatora [1]. Bitan nedostatak ove metode je činjenica da je transformator potrebno testirati prije uporabe metode.

Kako bi se odredio remanentni tok, nakon primjene testnog signala potrebno je analizirati struju primara i napon na sekundaru. Kako bi se izbjegao slučaj da remanentni tok dostigne maksimalnu vrijednost, umjesto istosmjernog, mora se koristiti izmjenični napon kao testni signal. U tom slučaju, tok u jezgri ostat će istog iznosa nakon mjerenja. Nadalje, ako se na primaru neopterećenog transformatora nalazi izmjenični napon, pri novom ustaljenom stanju tok u jezgri će biti izmjeničan, što se može vidjeti iz jednadžbe (3-3) te karakteristike prikazane na slici 3.3. Ako se jednadžba (3-2) integrira po vremenu od trenutka  $t = 0$  do  $t = T$ , gdje je  $T$  period testnog signala [1]:

$$R \int_0^T i dt + N \int_0^T \frac{d\phi}{dt} dt = \int_0^T \hat{U} \sin \omega t dt \quad (3 - 15)$$

Pošto istosmjerna komponenta napona primara iznosi nula, integral napona primara će također biti jednak nuli. Ako se ta vrijednost unese u jednadžbu (3-15), dobiva se zapis:

$$R \int_0^T i dt = -N \int_{\varphi(0)}^{\varphi(T)} d\varphi = -N[\varphi(T) - \varphi(0)] \quad (3 - 16)$$

Magnetski tok u jezgri u trenu  $t = T$  bit će:

$$\varphi(T) = \varphi(0) - \frac{R}{N} \int_0^T i dt \quad (3 - 17)$$

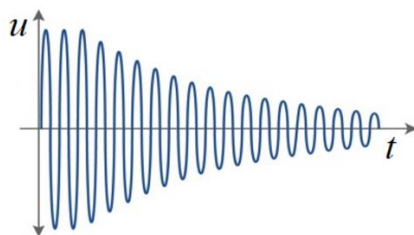
Može se primijetiti da remanentni tok u jezgri neće održati istu vrijednost tokom mjernog potupka. To je posljedica činjenice da napon induktiviteta ( $u_L$ ), koji je razmjernan naponu sekundara ( $u_S$ ), nije jednak nuli [1]. Kako bi se izbjegla nejednakost remanentnog magnetskog toka, testni napon na primaru ne smije prouzročiti zasićenje jezgre.

Može se zaključiti da tri uvjeta moraju biti zadovoljena kako bi se ova metoda mogla provesti:

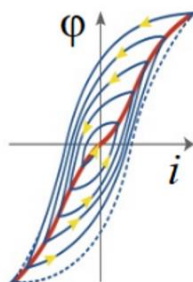
1. Testni signal na primaru transformatora mora biti izmjenični
2. Testni signal mora biti što kraćeg trajanja
3. Testni signal mora uzrokovati minimalnu promjenu magnetskog toka unutar jezgre

### **3.6. Demagnetiziranje**

Uporabom demagnetiziranja remanentni tok ne može se odrediti jer njegova vrijednost neće biti poznata. S ovom metodom nepoznata vrijednost remanentnog toka postaviti će se na nulu prije sljedećeg isključenja. Demagnetiziranje jezgre moguće je provesti na nekoliko načina, od kojih je uobičajeno izmjenično demagnetiziranje, koje se izvodi korištenjem izmjeničnog izvora napajanja postupnim snižavanjem napona promjenjivog izmjeničnog izvora koji je spojen na jedan od namota transformatora ili na zavojnicu [4], prikazano na slikama 3.5. i 3.6. [4].

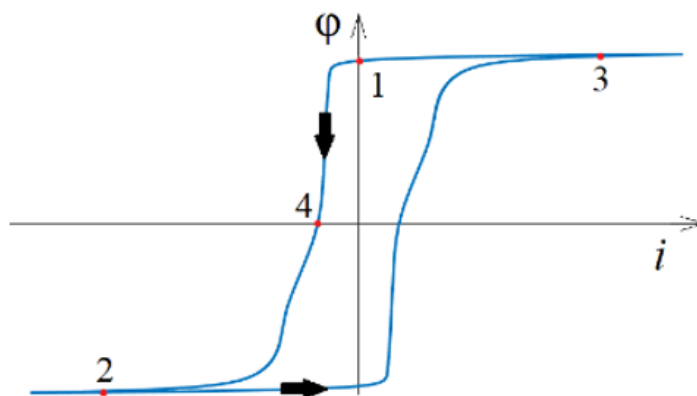


**Slika 3.5.** Izmjenično demagnetiziranje napona induktiviteta [4]



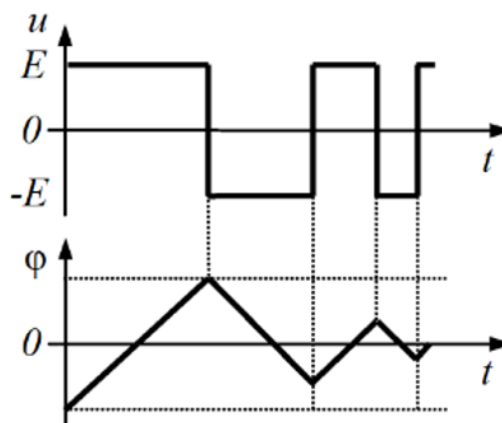
**Slika 3.6.**  $\phi$ - $i$  karakteristika tijekom postupka demagnetiziranja [4]

Naime, ovaj način se ne koristi pri sprječavanju zasićenja jezgre strujnog transformatora i pri smanjenju udarne struje magnetiziranja zbog dva razloga. Prvi od njih je vrlo visoka cijena promjenjivog izmjeničnog izvora velike snage, dok je drugi razlog vrijeme potrebno za postupak demagnetiziranja. Prilikom sprječavanja zasićenja strujnog transformatora, demagnetiziranje se mora obaviti u vremenu koje mora biti kraće od vremena trajanja intervala u kojem će prekidač biti otvoren, što najčešće iznosi 200 ms [6]. Zbog navedenih razloga, kako bi se spriječilo zasićenje strujnog transformatora i kako bi se smanjila udarna struja magnetiziranja, koristi se metoda CVVF (engl. *Constant Voltage Variable Frequency*), čiji su koraci prikazani na slici 3.7. [4], u kojoj se demagnetiziranje odvija konstantnim naponom promjenjive frekvencije. Na početku ove metode, potrebno je dovesti jezgru iz nepoznate vrijednosti remanentnog magnetskog toka (točka 1, slika 3.7.) u negativno zasićenje (točka 2, slika 3.7.), što se postiže dovođenjem negativnog istosmjernog napona na transformator. Nadalje, mjeri se koliko vremena traje prijelaz jezgre iz negativnog u pozitivno zasićenje (točka 3, slika 3.7.) kada se promijeni polaritet napona izvora. Napon izvora će zatim ponovno promijeniti polaritet i magnetizirat će jezgru u vremenskom periodu koje je jednako iznosu pola prethodno izmjerenog vremena. U završnom koraku dobiva se jezgra kojoj je remanentni tok postavljen na nulu (točka 4, slika 3.7.), odnosno demagnetiziranu jezgru [1].



**Slika 3.7.** Postupak demagnetiziranja korištenjem CVVF metode [4]

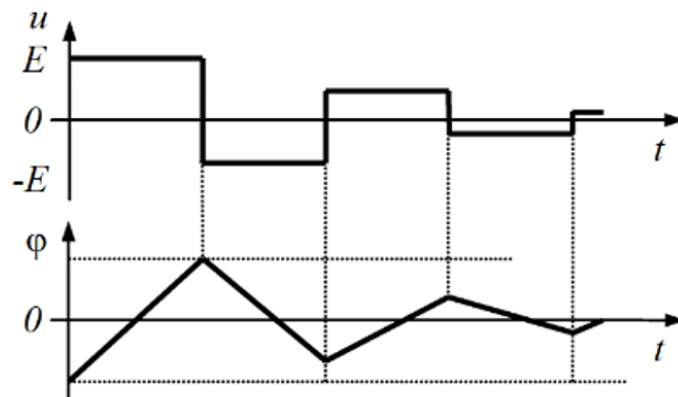
Postoji još jedan oblik CVVF metode, koji također koristi istosmjerni izvor konstantnog napona, ali demagnetiziranje se provodi tako da se frekvencija promjene polariteta napona izvora postupno povećava. Time se postiže smanjenje amplitude magnetskog toka u jezgri kroz svaku periodu sve dok ne dostigne nultu vrijednost (slika 3.8.). Kako bi se odredilo optimalno vrijeme trajanja prvog intervala, što je izrazito važno za ovu metodu, potrebno je izračunati površinu ispod krivulje napona [1].



**Slika 3.8.** Prikaz smanjenja amplitude magnetskog toka pri korištenju CVVF metode [4]

Također, postoji metoda zvana VVCF (engl. *Variable Voltage Constant Frequency*), koja, za razliku od CVVF metode, koristi istosmjerni izvor promjenjivog napona pri čemu je frekvencija promjena polariteta konstantnog iznosa. VVCF se provodi tako da se istosmjerni napon postupno smanjuje u svakom nadolazećem intervalu promjene polariteta napona, pri čemu su vremenski intervali jednakog trajanja. Uslijed toga, magnetski tok će se postupno smanjivati u svakom

intervalu (prikazano na slici 3.9. [4]). Kako bi postupak započeo, jezgra je primjenom pozitivnog istosmjernog napona dovedena u pozitivno zasićenje [4].

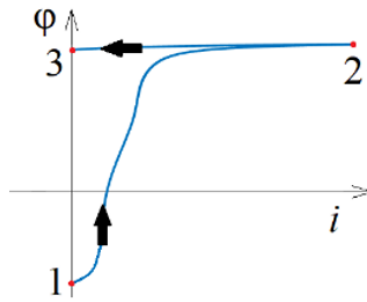


Slika 3.9. Demagnetiziranje pomoću VVCF metode [4]

### 3.7. Predmagnetiziranje

Kao i kod demagnetiziranja, iznos remanentnog toka ne može se izmjeriti. Zato je svrha ove metode postavljanje vrijednosti remanentnog toka s neke nepoznate na maksimalnu vrijednost, koja može biti negativna ili pozitivna. Temeljna ideja je postavljanje toka na maksimalan iznos remanentnog magnetskog toka prije uključivanja, nakon čega je moguće izračunati optimalan kut uklopa. Predmagnetiziranje je korišteno pri smanjenju udarne struje magnetiziranja [1].

Osnovno načelo metode temelji se na tvrdnji da će iznos remanentnog magnetskog toka, negativan ili pozitivan, unutar jezgre biti maksimalan nakon djelovanja predmagnetiziranja, neovisno o tome kako su zavojnica ili transformator konstruirani [8]. Prvi korak je određivanje maksimalne vrijednosti remanentnog toka za pojedini transformator ili zavojnicu s pomoću  $\phi$ - $i$  karakteristike. Zatim, injektirajući struju zasićenja u namote zavojnice ili transformatora, remanentni tok se postavlja što bliže prethodno određenoj vrijednosti [8]. U sljedećem koraku smanjivanjem struje na nultu vrijednost postiže se maksimalni remanentni tok u jezgri, prikazano na slici 3.10. [4].



**Slika 3.10.** Postupak predmagnetiziranja [4]

Postupak predmagnetiziranja počinje u točki 1 (slika 3.10.), gdje je vrijednost remanentnog toka nepoznata. Povećanjem toka s pomoću pozitivne struje, tok će otići u područje zasićenja, prikazano točkom 2 (slika 3.10.). U zadnjem koraku struja se smanjuje na nulu i tok poprima vrijednost maksimalnog pozitivnog remanentnog toka (točka 3, slika 3.10.).

### 3.8. Mjerenje rasipnog toka

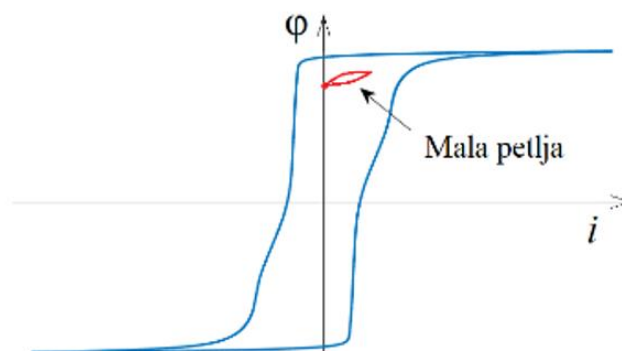
Mjerenje rasipnog toka je metoda koja se koristi pri smanjenju udarne struje magnetiziranja, ali u teoriji može se koristiti i kod drugih slučajeva. Glavna svrha metode je direktno mjeriti magnetski tok u blizini jezgre te analizom dobivenih podataka odrediti remanentni magnetski tok. Kada je transformator priključen na nazivni napon te je neopterećen, izmjereni tok u blizini jezgre je zbroj magnetskog toka Zemlje i rasipnog toka. U prvom koraku potrebno je, uz korištenje razvijenih algoritama, odvojiti rasipni tok iz ukupnog toka [9]. Zatim je moguće primijeniti metodu određivanja remanentnog toka mjerenjem rasipnog toka. Nakon mjerenja rasipnog toka uz pomoć senzora koji su instalirani u blizini jezgre, potrebno je procijeniti remanentni tok. Prije samog početka mjerenja, nužno je izraziti prijenosnu funkciju između rasipnog toka i toka unutar same jezgre. Tok u jezgri se najčešće određuje integriranjem napona na otvorenom sekundaru pri nazivnom naponu primara u ustaljenom stanju. Zadnji korak se sastoji od mjerenja rasipnog toka prije uklopa i određivanja iznosa remanentnog magnetskog toka s pomoću prijenosne funkcije [4].

### 3.9. Analiziranje valnog oblika udarne struje magnetiziranja

Određivanje remanentnog toka analizom valnog oblika struje magnetiziranja je korišteno pri smanjenju udarne struje magnetiziranja, no u teoriji se može primijeniti i u drugim slučajevima.

Sam princip metode je spajanje transformatora ili zavojnice na istosmjerni izvor pri niskom naponu te određivanje remanentnog magnetskog toka na temelju analize valnog oblika struje. Ipak, ova je metoda provjerena samo putem simulacija. S druge strane, sličan pristup je isproban eksperimentalno i razlikuje se po tome što se primjenom te metode anulira izmjereni remanentni magnetski tok, odnosno postavi se nova vrijednost koja će biti nepoznata [10].

Osnovna ideja podrazumijeva analizu valnog oblika struje magnetiziranja nastale kao odziv na poticaj istosmjernim naponom. Zadatak je stvoriti malu petlju unutar maksimalne petlje histereze s pomoću malog istosmjernog signala, prikazano na slici 3.11. [4]. Bitno je da istosmjerni napon promijeni polaritet u drugoj fazi postupka, što znači da u jednom vremenskom intervalu na induktivitetu djeluje pozitivan napon, a u idućem jednakom intervalu djeluje negativan napon istog iznosa. Uslijed toga, generirat će se mala petlja na temelju koje je moguće odrediti iznos remanentnog magnetskog toka. Istosmjerni napon bi trebao biti što manji kako ne bi utjecao na remanentni magnetski tok [4].



**Slika 3.11.** Mala petlja unutar maksimalne petlje histereze [4]

Slična, eksperimentalno dokazana metoda za određivanje remanentnog toka, ima značajan nedostatak. Naime, primjenom te metode poništava se remanentni tok nakon određivanja. Remanentni magnetski tok se određuje nakon spajanja istosmjernog izvora napajanja na temelju valnog oblika struje magnetiziranja. Prethodno testiranje transformatora ili zavojnice je neophodno. To uključuje bilježenje odziva za različite vrijednosti remanentnog magnetskog toka. Nakon što su testiranja obavljena i odzivi sačuvani, dobiveni valni oblik struje se uspoređuje sa snimljenim odzivima kako bi se utvrdila usklađenost [4]. Remanentni tok se određuje na temelju te usporedbe, u trenu kada je bio u jezgri pri spajanju na istosmjerni izvor napajanja.



## 4. USPOREDBA METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA

### 4.1. Podjela i usporedba metoda po području primjene

Metode navedene u ovom radu mogu se podijeliti na tri područja primjene :

1. Smanjenje udarne struje magnetiziranja
2. Sprječavanje zasićenja strujnog transformatora
3. Predviđanje pojave ferorezonancije

**Tablica 4.1.** Podjela metoda po područjima primjene

| Područje primjene                              | Metode   |
|--|--|
| Smanjenje udarne struje magnetiziranja         | Snimanje napona na priključnicama tijekom isključenja napajanja;<br>Analiza male petlje histereze;<br>Demagnetiziranje;<br>Predmagnetiziranje;<br>Mjerenje rasipnog toka;<br>Analiziranje valnog oblika struje magnetiziranja  |
| Sprječavanje zasićenja strujnog transformatora | Demagnetiziranje   |
| Predviđanje pojave ferorezonancije             | Snimanje napona na priključnicama tijekom isključenja napajanja;<br>Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi ustaljenog stanja uslijed uključanja transformatora na nazivni izmjenični napon; Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog |

|  |  |
|--|--|
|  | stanja uslijed uključenja transformatora na izmjenični napon;<br>Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključenja transformatora na niski istosmjerni napon;<br>Analiza male petlje histereze |
|--|--|

## 4.2. Usporedba metoda s obzirom na prednosti i nedostatke

Nadalje, svaka metoda ima specifične prednosti i nedostatke, opisane u nastavku poglavlja i prikazane u tablici 4.2.

### 1) Snimanje napona na priključnicama tijekom isključenja napajanja

Najveću prednost metode predstavlja njena praktičnost. Remanentni magnetski tok moguće je odrediti iz snimanja i integriranja napona na priključnicama, što također znači da je ova metoda, u usporedbi s drugim metodama, relativno niske cijene. Sam sustav nadzora koji se nalazi na velikom broju transformatora i zavojnica može biti korišten za snimanje napona. Najveći nedostatak ove metode je nepouzdanost, koja proizlazi iz pretpostavke da remanentni magnetski tok neće mijenjati svoju vrijednost nakon isključenja napajanja. Remanentni tok može promijeniti vrijednost ukoliko se pojavi tranzijent u sustavu. Također, još jedan nedostatak ove metode je manjak sustava nadzora s pomoću kojeg se napon snima. U tom slučaju cijena primjene ove metode znatno raste.

### 2) Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi ustaljenog stanja uslijed uključenja transformatora na nazivni izmjenični napon

Najveća prednost ove metode je mogućnost preciznog i pouzdanog određivanja remanentnog magnetskog toka bez poznavanja prethodnih vrijednosti jezgre i parametara transformatora. Također, potrebno je samo izmjeriti napon sekundara da bi se remanentni magnetski tok odredio. Nedostatak ove metode je činjenica da će remanentni magnetski tok poprimiti nepoznatu vrijednost nakon mjerenja.

### **3) Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključanja transformatora na izmjenični napon**

Najveća prednost ove metode je mogućnost preciznog određivanja remanentnog magnetskog toka bez prethodnog poznavanja vrijednosti jezgre.

Glavni nedostatak metode je činjenica da nije moguće odrediti remanentni magnetski tok pri svakom mjerenju [1].

### **4) Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključanja transformatora na niski istosmjerni napon**

Najveća prednost ove metode je činjenica da se remanentni magnetski tok može izmjeriti pri svakom mjerenju, za razliku od prethodne metode. Također, transformator se uklapa na napon koji je bitno niži od nazivnog, što je od velike važnosti kod energetskih transformatora visokog napona [1].

Najveći nedostatak metode je nužno korištenje dodatnog istosmjernog izvora, što povećava troškove primjene s obzirom na prethodnu metodu [1].

### **5) Analiza male petlje histereze**

Ova metoda ima mnoge prednosti. S njom je moguće precizno i pouzdano izmjeriti remanentni magnetski tok na kraju perioda neuklopljenosti transformatora, i može izmjeriti remanentni magnetski tok bez da njegova vrijednost bude promijenjena, što je ključna prednost s obzirom na prethodne tri metode. Također, metoda koristi niski napon za generiranje signala, što je ključno kod visokonaponskih energetskih transformatora, te je neinvazivna jer nema potrebe za fizičkom interakcijom s jezgrom [1]. Najveći nedostatak ove metode je potreba za testiranjem transformatora prije početka mjerenja.

### **6) Demagnetiziranje**

Jedna od prednosti demagnetiziranja je pouzdanost pošto se remanentni magnetski tok određuje postavljanjem njegove vrijednosti na nulu. Brzim i preciznim demagnetiziranjem jezgre veoma se efikasno može spriječiti zasićenje strujnog transformatora. Kada se ova metoda koristi pri smanjenju udarne struje magnetiziranja, mora biti upotrebljena s kontroliranim sklapanjem. Najveći nedostatak ove metode je veliki trošak primjene, pošto zahtjeva dodatne sklopove kako bi se realizirala. Također, povećava složenost jer zahtijeva poznavanje parametara svakog transformatora prije procesa demagnetiziranja. Još jedan bitni nedostatak je činjenica da je vrijeme potrebno za demagnetiziranje velikih energetskih transformatora vrlo veliko.

### **7) Predmagnetiziranje**

Najveća prednost predmagnetiziranja je činjenica da precizno postavlja tok na poznatu vrijednost. Kada se koristi kod smanjenja udarne struje magnetiziranja, kao i kod demagnetiziranja, mora se koristiti u kombinaciji s kontroliranim sklapanjem. Najveći nedostatak ove metode je visok trošak primjene zbog potrebe za dodatnim sklopovima kako bi predmagnetiziranje bilo izvedivo. Također, predmagnetiziranje je kompleksnija metoda u usporedbi s demagnetiziranjem, pošto maksimalna vrijednost remanentnog magnetskog toka mora biti prethodno poznata, što je jedan parametar više nego kod demagnetiziranja.

### **8) Mjerenje rasipnog toka**

Glavna prednost ove metode je razmatranje svake moguće promjene vrijednosti remanentnog magnetskog toka od trenutka isključenja, pošto se samo mjerenje odvija prije ponovnog uključenja. Mjerenje rasipnog toka ima više nedostataka nego prednosti. Neki od nedostataka su nepreciznost, visoka cijena implementacije, složenost te veoma kompliciran proces instalacije senzora unutar transformatorskog kotla.

### **9) Analiziranje valnog oblika udarne struje magnetiziranja**

U potpoglavlju 3.8. opisana su dva načina provedbe ove metode, te metoda analiziranja male petlje histereze nije uzeta u obzir pošto nije eksperimentalno dokazana [4]. Glavna prednost druge metode je činjenica da razmatra svaku promjenu remanentnog magnetskog toka nakon posljednjeg isključenja. Glavni nedostatak metode je poništavanje prethodno izmjerene vrijednosti remanentnog magnetskog toka. Ovaj nedostatak stavlja znatna ograničenja na metodu, te se zbog toga ona koristi samo za testiranje drugih metoda. Također, metoda je neprecizna i ima visoke troškove primjene zbog potrebe za dodatnim sklopovima.

**Tablica 4.2.** Prednosti i nedostaci metoda određivanja remanentnog magnetskog toka

| <b>Metoda</b>   | <b>Prednosti</b>  | <b>Nedostaci</b>  |
|---|---|---|
| Snimanje napona na priključnicama tijekom isključenja napajanja   | Jednostavnost provedbe;<br>Praktičnost;<br>Relativno niski troškovi   | Nepouzdanost;<br>Potrebna implementacija sustava za nadzor;<br>Nije moguće odrediti remanentni magnetski tok neposredno prije uključanja; |
| Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi ustaljenog stanja uslijed uključanja transformatora na nazivni izmjenični napon | Preciznost;<br>Pouzdanost;<br>Potrebno izmjeriti samo napon sekundara | Remanentni magnetski tok poprima nepoznatu vrijednost nakon mjerenja  |
| Određivanje remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključanja transformatora na izmjenični napon        | Preciznost  | Remanentni magnetski tok neće se moći odrediti pri svakom mjerenju  |
| Određivanje remanentnog magnetskog toka na  | Remanentni tok je određen pri svakom mjerenju;                        | Potreba za dodatnim istosmjernim izvorom  |

|   |   |  |
|---|---|--|
| osnovi prijelaznog stanja<br>uslijed uključenja<br>transformatora na niski<br>istosmjerni napon | Transformator se uklapa na<br>napon niži od nazivnog                        |  |
| Analiza male petlje<br>histereze  | Pouzdanost;<br>Preciznost;<br>Koristi niski napon za<br>generiranje signala | Potreba za testiranjem<br>transformatora prije početka<br>mjerenja   |
| Demagnetiziranje  | Efikasnost provedbe metode;<br>Pouzdanost                                   | Složenost zbog potrebe za<br>dodatnim sklopovima;<br>Visoki troškovi<br>implementacije;<br>Nije moguće odrediti<br>vrijednost remanentnog<br>magnetskog toka |
| Predmagnetiziranje  | Preciznost;<br>Pouzdanost   | Visoki troškovi<br>implementacije;<br>Potreba za dodatnim<br>sklopovima;<br>Složenija metoda od<br>demagnetiziranja  |
| Mjerenje rasipnog toka  | Određivanje iznosa<br>remanentnog magnetskog<br>toka netom prije uključenja | Nepreciznost;<br>Visoki troškovi<br>implementacije;<br>Složenost;<br>Kompliciran proces<br>instalacije senzora   |

|  |  |  |
|--|--|--|
| <p>Analiziranje valnog oblika udarne struje magnetiziranja</p> | <p>Određivanje iznosa remanentnog magnetskog toka netom prije uključanja</p> | <p>Poništavanje prethodno izmjerene vrijednosti remanentnog magnetskog toka;<br/>         Potreba za dodatnim sklopovima;<br/>         Nepreciznost;<br/>         Visoki troškovi implementacije</p> |
|--|--|--|

## 5. ZAKLJUČAK

U djelovanju elektroenergetskog sustava, remanentni magnetski tok ima šansu uzrokovati ozbiljne poteškoće ako se njegov iznos ne izmjeri. U praksi je nemoguće izravno izmjeriti iznos remanentnog magnetskog toka, stoga se koriste metode koje ga određuju neizravno.

Metoda snimanja napona na priključnicama tijekom isključenja je najčešće korištena metoda zbog njezine jednostavnosti i niskih troškova, no tom metodom nije moguće odrediti vrijednost remanentnog magnetskog toka neposredno prije uključenja. Metoda određivanja remanentnog magnetskog toka na osnovi ustaljenog stanja uslijed uključenja transformatora na nazivni izmjenični napon ima mogućnost preciznog mjerenja remanentnog magnetskog toka bez informacija o prethodnim stanjima i parametrima transformatora, što se postiže mjerenjem napona neopterećenog sekundara.

Metoda određivanja remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključenja transformatora na nazivni izmjenični napon, kao i prethodna metoda, može precizno izmjeriti remanentni magnetski tok bez informacija o prethodnom stanju transformatora. Bitna razlika od prethodne metode je činjenica da prije početka mjerenja iznosi toka zasićenja i struje moraju biti određeni, te glavna petlja histereze mora biti određena. Metoda određivanja remanentnog magnetskog toka na osnovi prijelaznog stanja uslijed uključenja transformatora na niski istosmjerni napon, kao i dvije prethodne metode, može precizno izmjeriti remanentni magnetski tok bez informacija o prethodnom stanju transformatora. Za razliku od dvije prethodne navedene metode, remanentni magnetski tok poprima maksimalni iznos nakon mjerenja. Metoda analiziranja male petlje histereze ima mogućnosti primjene u području ferorezonancije, kao i metode navedene u potpoglavljima 3.2., 3.3. i 3.4., ali zbog činjenice da može odrediti remanentni magnetski tok bez da promijeni njegovu vrijednost nakon mjerenja, može se primijeniti i na smanjenje udarne struje magnetiziranja. Demagnetiziranje je najefikasnija i najpouzdanija metoda za sprječavanje zasićenja jezgre, ali zahtijeva dodatne sklopove kako bi se primijenila. Metode korištene kod smanjenja udarne struje magnetiziranja imaju više nedostataka nego prednosti. Predmagnetiziranje je skupa metoda koja može precizno postaviti tok na poznatu vrijednost. Metoda mjerenja rasipnog toka ima mogućnost određivanja remanentnog toka neposredno prije uključenja, ali je njena implementacija vrlo složena. Analiziranje valnog oblika udarne struje magnetiziranja također ima



moćnost određivanja remanentnog toka neposredno prije ukljućenja, ali poništava prethodno izmjerene vrijednosti magnetskog toka, što ju čini pogodnim samo za testiranje drugih metoda.

Iz prikazanih usporedba i opisa metoda može se vidjeti da je metoda snimanja napona na priključnicama tijekom iskljućenja efikasna metoda u području smanjenja udarne struje magnetiziranja i predviđanja pojave ferorezonancije. Metode navedene u potpoglavljima 3.2., 3.3., 3.4. i 3.5. su novorazvijene metode koje mogu riješiti problem pouzdanog i preciznog određivanja remanentnog toka na kraju razdoblja neuklopljenosti transformatora bez informacija o prethodnim stanjima transformatora, što ih čini upotrebljivim u praksi. Ostale metode, sa izuzetkom demagnetiziranja, imaju velike nedostatke, te je potrebno dodatno poboljšanje kako bi se mogle efikasno koristiti.

## LITERATURA

- [1] D. Vulin; FERIT, Doktorski rad, Metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri, 2020.g.
- [2] Magnetski tok. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.; <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=38058>, pristupljeno 3.5.2023.
- [3] 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.
- [4] Vulin D., Pregledni rad, 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, 2008. , br. 3., str. 361, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića bb 21000 Split Hrvatska, Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb; <https://hrcak.srce.hr/file/45535>
- [6] E. Hajipour, M. Salehizadeh, M. Vakilian, and M. Sanaye-Pasand, “Residual Flux Mitigation of Protective Current Transformers Used in an Autoreclosing Scheme,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 4, pp. 1636–1644, 2016.
- [7] Euditorij e-skole; URL: [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7582\\_Magnetsko\\_polje\\_elektricne\\_struje.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7582_Magnetsko_polje_elektricne_struje.html), zadnja posjeta stranici 5.5.2023.
- [8] V. O. De Castro Cezar, L. L. Rouve, J. L. Coulomb, F. X. Zgainski, O. Chadebec, and B. Caillault, “Elimination of inrush current using a new prefluxing method. Application to a single-phase transformer,” *Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2014*, pp. 1717–1723, 2014.
- [9] D. Cavallera, V. Oiring, J. L. Coulomb, O. Chadebec, B. Caillault, and F. Zgainski, “A new method to evaluate residual flux thanks to leakage flux, application to a transformer,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, 2014.
- [10] W. Ge, Y. Wang, Z. Zhao, X. Yang, and Y. Li, “Residual Flux in the Closed Magnetic Core of a Power Transformer,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, pp. 3–6, 2014.

## SAŽETAK

U ovom radu opisan je remanentni magnetski tok, područja u praksi gdje je važno odrediti njegovu vrijednost, devet metoda određivanja remanentnog magnetskog toka te su sve opisane metode uspoređene s obzirom na područja primjene, prednosti i nedostatke. Za svaku od devet navedenih metoda opisana je pripadajuća teorijska podloga te je opisan proces provedbe mjerenja.

**Ključne riječi:** remanentni magnetski tok, područja primjene određivanja remanentnog toka, analiza metoda određivanja remanentnog magnetskog toka, usporedba metoda određivanja remanentnog magnetskog toka

## ABSTRACT

### ANALYSIS AND COMPARISON OF METHODS FOR DETERMINING REMANENT FLUX IN A MAGNETIC CORE

This paper describes the remanent magnetic flux, practical areas where determining its value is important, nine methods for determining remanent magnetic flux, and all described methods are compared with respect to their application areas, advantages, and disadvantages. For each of the nine listed methods, the corresponding theoretical background is described, and the measurement process is explained.

**Keywords:** remanent magnetic flux, application areas for determining remanent flux, analysis of methods for determining remanent magnetic flux, comparison of methods for determining remanent magnetic flux

## **ŽIVOTOPIS**

Mihovil Delaš rođen je 28.2.2001. godine u Vinkovcima. Upisuje glazbenu školu Josipa Runjanina u Vinkovcima 2009. godine, gdje kao temeljni polaže gitaru, te ju završava 2015. godine. Po završetku Osnovne škole Matija Gubec u Jarmini, 2015. godine upisuje Gimnaziju Matije Antuna Reljkovića u Vinkovcima, matematički smjer, te završava srednju školu 2019. godine. Iste godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, te se na drugoj godini opredjeljuje za izborni blok Elektroenergetika.