

# Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka s pomoću istosmjernog izvora male snage

---

Šestak, Vedran

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:200:488923>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**

*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**

**Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina  
primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju  
remanentnog toka s pomoću istosmjernog izvora male snage**

**Završni rad**

**Vedran Šestak**

**Osijek, 2022.**

## SADRŽAJ

<b>1.UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Metode određivanja remanentnog magnetskog toka .....</b>	<b>6</b>
<b>3. MJERNA NESIGURNOST I MONTE CARLO METODA .....</b>	<b>9</b>
<b>4. METODA ODREĐIVANJA REMANENTOG TOKA U MAGENTSKOJ JEZGRI UZ POMOĆ ISTOSMJERNOG IZVORA MALE SNAGE.....</b>	<b>16</b>
<b>5. PROCJENA PROPAGACIJA MJERNE NESIGURNOSTI MJERENIH VELIČINA PRIMJENOM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE.....</b>	<b>23</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>31</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>32</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>34</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>34</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>35</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>36</b>

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

Osijek, 15.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

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

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Vedran Šestak
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i
<b>Mat. br. Pristupnika, godina</b>	4734, 23.07.2019.
<b>OIB Pristupnika:</b>	19799801472
<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>	Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka s pomoću istosmjernog izvora male snage
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	Definirati remanentni magnetski tok i mjernu nesigurnost. Opisati adaptivnu Monte Carlo metodu. Navesti primjere iz prakse u kojima je važan utjecaj remanentnog magnetskog toka. Opisati metodu određivanja remanentnog toka u
<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 Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	15.09.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	21.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 22.09.2022.

**Ime i prezime studenta:**

Vedran Šestak

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

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

4734, 23.07.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju** 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

Elektroenergetski sustav nezamisliv je bez transformatora, čija je zadaća povećanje, odnosno snižavanje jedne razine napona na neku drugu razinu napona. U cijelom tom procesu se javlja remanentni (zaostali) tok. Ukoliko je njegova vrijednost nepoznata, može uzrokovati ozbiljne poteškoće u cjelokupnom elektroenergetskom sustavu [1].

Pri procjeni propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina može biti korisna Monte Carlo metoda koja je u uporabi od kraja dvadesetog stoljeća. Monte Carlo metoda primjenjuje se u više područja znanosti, kao što su fizikalna kemija, ekonomija, matematika, itd. [2].

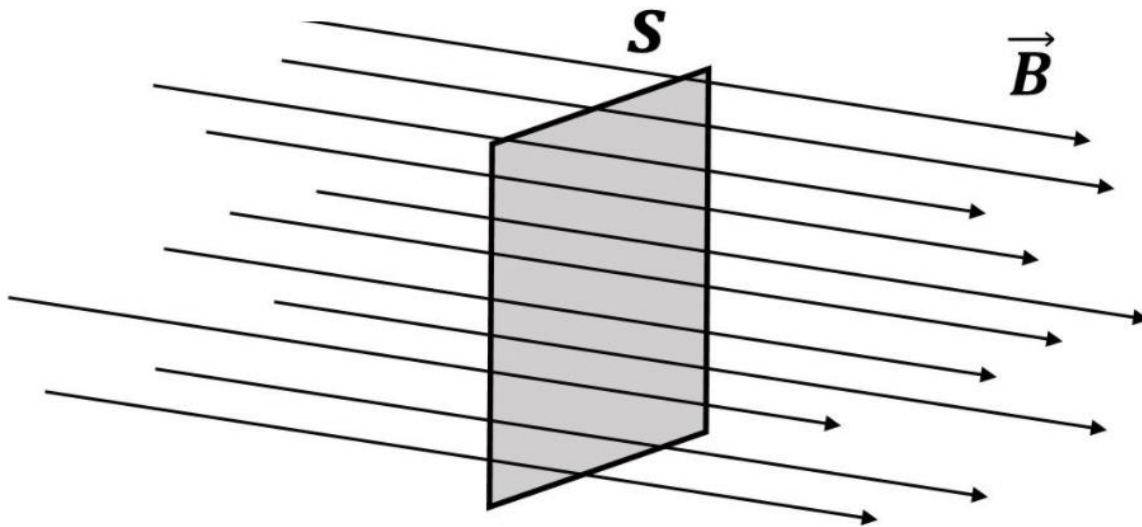
Mjerna nesigurnost se definira kao parametar koji se pridružuje rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti. U ovom slučaju mjerene veličine su struja primara i napon sekundara [3].

Drugo poglavlje ovoga rada definira remanentni magnetski tok te metode određivanja istoga. U trećem poglavlju opisuje se mjerna nesigurnost te Monte Carlo metoda. Četvrto poglavlje predstavlja metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri s pomoću istosmjernog izvora male snage, a u petom poglavlju je prikazana procjena propagacije mjerne nesigurnosti napona sekundara uz primjenu adaptivne Monte Carlo metode. Zaključak je izveden u šestom poglavlju ovoga završnog rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

U ovom radu je potrebno opisati zaostali magnetski tok i mjernu nesigurnost te opisati adaptivnu Monte Carlo metodu. Također, potrebno je navesti primjere u kojima remanentni tok ima važnu ulogu te opisati metodu određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri s pomoću istosmjernog izvora male snage. Korištenjem adaptivne Monte Carlo metode, potrebno je procijeniti propagaciju mjerne nesigurnosti mjerenih veličina pri određivanju remanentnog toka s pomoću programskog paketa MATLAB.

## 2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK



**Slika 2.1.** Ilustracija magnetskog toka koji prolazi kroz površinu  $S$  [4]

Na slici 2.1. je prikazan magnetski tok, kao prolazak magnetskih silnica kroz površinu  $A$ . Oznaka za magnetski tok je grčko slovo  $\Phi$ , a mjerna jedinica je veber (Wb). Izraz za izračunavanje magnetskog toka glasi:

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

gdje je:

$\Phi \rightarrow$  magnetski tok [Wb],

$S \rightarrow$  površina presjeka [ $m^2$ ],

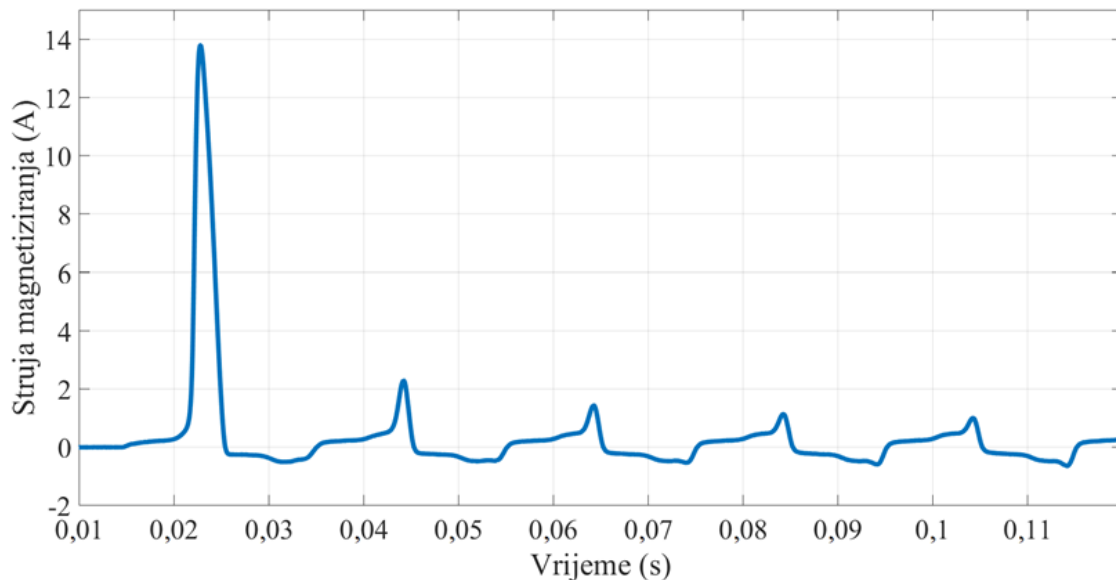
$B \rightarrow$  magnetska indukcija [T]

Materijali, u ovisnosti o vodljivosti magnetskog toka, dijele se na feromagnetske, paramagnetske i dijamagnetske [5].

Remanentni ili zaostali magnetski tok pojavljuje se u feromagnetskim materijalima koji imaju svojstvo da i nakon prestanka napajanja ostane određeni iznos istosmjernog magnetskog toka.

Materijal od kojega je jezgra napravljena te sami tip jezgre ključni su faktori koji utječu na remanentni tok, koji je stalnog iznosa i nije ga moguće izmjeriti klasičnim metodama za mjerenje magnetskog toka [6].

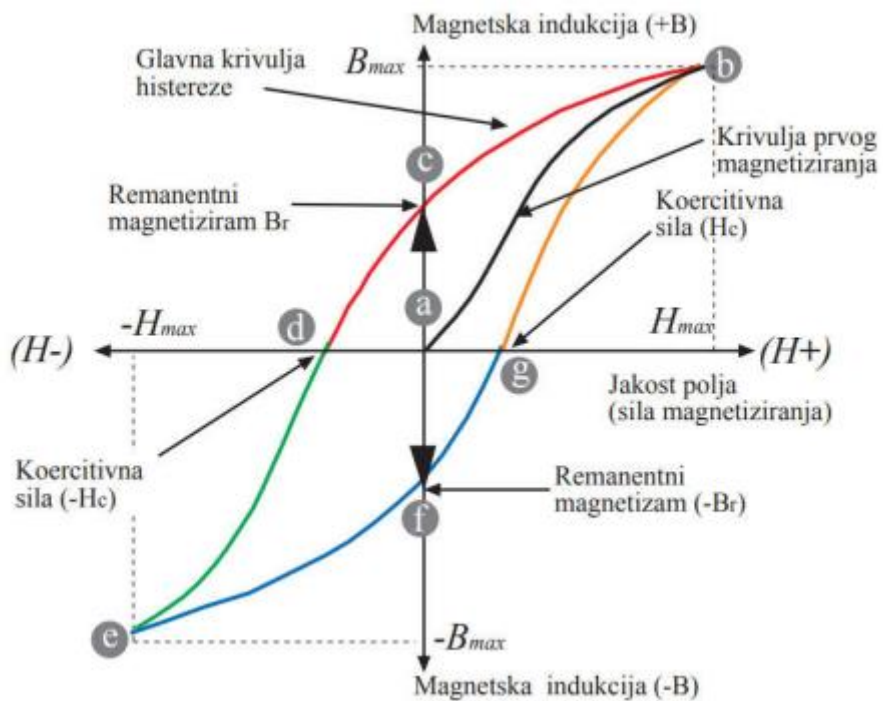
Remanentni tok najveće probleme stvara prilikom uklopa neopterećenog transformatora, pri čemu može uzrokovati udarnu struju magnetiziranja [1]. Primjer valnog oblika udarne struje magnetiziranja je prikazan na slici 2.2.



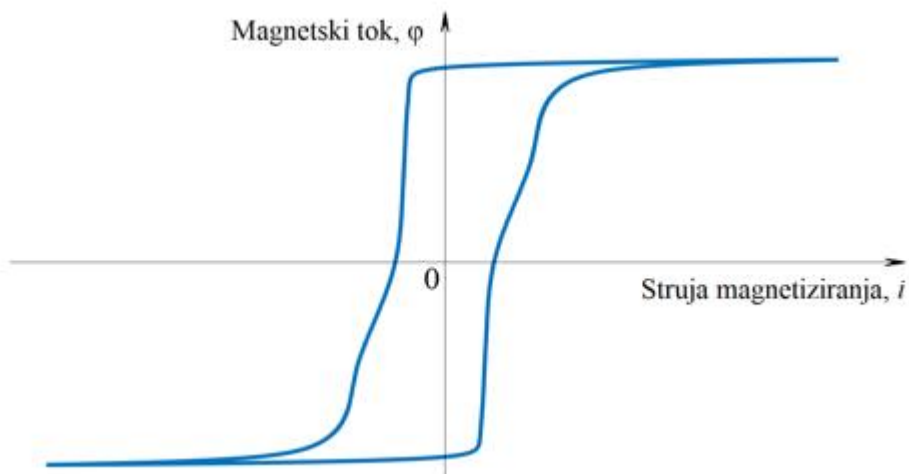
**Slika 2.2.** Udarne struje magnetiziranja [1]

Karakteristika koja povezuje magnetsko polje i magnetsku indukciju kod većine feromagnetskih materijala tvori petlju histereze, primjer koje je prikazan na slici 2.3. [7]. Petlja može biti prikazana i u  $\varphi$ - $i$  ravnini, u kojoj se povezuje magnetski tok ( $\varphi$ ) i struja magnetiziranja ( $i$ ), kao što je prikazano na slici 2.4. [1].





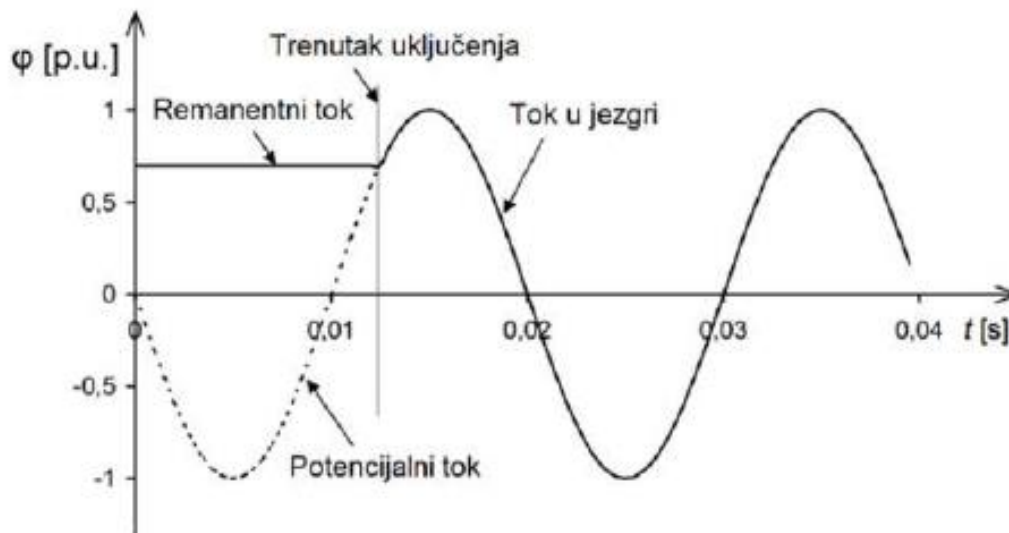
Slika 2.3.  $B$ - $H$  karakteristika [7]



Slika 2.4.  $\phi$ - $i$  karakteristika [1]

Po krivulji između točke a i b (slika 2.3.), odvija se prvo magnetiziranje. Nakon toga, vrijednost jakosti polja i magnetske indukcije se smanjuje, što je vidljivo od točke b do točke e. S obzirom da karakteristika ima svojstvo histereznosti, magnetski tok različit je od nule pri prolasku struje kroz nulu, što je vidljivo u točki c. Ta vrijednost je remanentni magnetizam ( $B_r$ ), odnosno remanentni magnetski tok u  $\varphi$ - $i$  karakteristici. Koercitivna sila  $H_c$  (točke d i g) označava iznos magnetskog polja u trenutku prolaska petlje kroz nultu magnetsku indukciju [6,7].

Najbolji način kako izbjeći udarnu struju magnetiziranja je odabir faznog kuta napona napajanja u trenutku uklopa koji odgovara iznosu remanentnog toka u jezgri na način da je potencijalni tok jednak remanentnom toku u trenutku uklopa, što se vidi na slici 2.5. [1].



**Slika 2.5.** Prikaz optimalnog trenutka uklopa [8]

Na slici 2.5. vidi se najbolji trenutak za uklop transformatora uz prisustvo remanentnog toka.

Transformator je optimalno uklopiti kada fazni kut napona odgovara vrijednosti remanentnog magnetskog toka u pretpostavljenom ustaljenom stanju. Tada transformator neće imati prijelaznih pojava, već će ući odmah u ustaljeno stanje, što se može vidjeti na slici 2.5. [6].

Ukoliko transformator ne uklopi u optimalnom trenutku, doći će do povećanja stvarnog toka u jezgri u odnosu na potencijalni tok. Posljedica zasićene jezgre je velika udarna struja.

## 2.1. Metode određivanja remanentnog magnetskog toka

Postoje razni načini, odnosno metode određivanja vrijednosti remanentnog toka. Metoda koja se najčešće koristi zapravo samo integrira napon transformatora prije isklopa. Ova metoda ima široku primjenu zbog njene jednostavnosti, a osnove ove metode svode se na snimanje napona transformatora uoči isklopa, te uz pomoć tog napona izračunava se tok u jezgri transformatora. Iznos remanentnog toka ekvivalentan je vrijednosti izračunatog magnetskog toka prilikom isklopa. Najveća prednost ove metode je ta da je metoda jednostavna i jeftina za izvesti, budući da većina transformatora današnjice ima ugrađene sustave nadzora koji se između ostalog mogu koristiti i u svrhu snimanja napona. Jedan od sustava za praćenje rada transformatora je „Končar TMS“ (TRANSFORMER MONITORING SYSTEM). Nedostatak ove metode je što se mora pretpostaviti da iznos remanentnog toka ostaje nepromijenjen sve do idućeg uklopa transformatora [1].



Slika 2.6. Končar TMS, sustav nadzora rada transformatora [19]

Nadalje, iznos remanentnog toka može se odrediti i mjerenjem dinamičkog induktiviteta, koji se mjeri na jednom od namota transformatora. Kako bi se uopće započela ova metoda mora se prije samog mjerenja odrediti ovisnost remanentnog toka o dinamičkom induktivitetu, što se prikazuje kao funkcija. Jedna od prednosti ovog pristupa je ta što se prilikom provođenja same metode, koristi relativno mali napon koji neće uzrokovati promjenu remanentnog toka u jezgri. Međutim, manjkavost ove metode je to što se dinamički induktivitet promijeni za 5 % prilikom promjene samog remanentnog toka od nule do najveće moguće vrijednosti pa se iz tog razloga ova metoda ne smatra preciznom [1].

Također, iznos remanentnog toka može se odrediti mjerenjem rasipnog magnetskog toka u blizini jezgre transformatora. Osnova ove metode je procjena remanentnog toka s pomoću izmjenog rasipnog magnetskog toka netom prije uklopa. Navedeni rasipni magnetski tok mjeri se uz pomoć trajno instaliranih senzora u blizini jezgre. Kako bi se ova metoda uspješno primijenila, mora se prethodno odrediti ovisnost rasipnog toka o magnetskom toku u samoj jezgri. Jedna od prednosti ove metode mjerenja rasipnog magnetskog toka u blizini jezgre u svrhu smanjenja udarne struje magnetiziranja je procjena vrijednosti remanentnog toka netom prije uklopa transformatora. Nedostatak ove metode je upotreba senzora što je tehnički zahtjevnije, odnosno skuplje, jer senzori moraju biti otporni na visoku temperaturu u kućištu transformatora [1].

Postoji i metoda u kojoj se remanentni tok određuje i analizom struje magnetiziranja u trenutku uklopa. Osnova ove metode je snimanje valnog oblika struje kada neki od namota uklapa na istosmjerni izvor niskog napona. Prije početka primjene metode, potrebno je testirati transformator i odrediti struju magnetiziranja kod uklopa, odnosno odrediti njen valni oblik za sve vrijednosti remanentnog toka. Nakon što se odredi valni oblik struje magnetiziranja, transformator se uklapa na istosmjerni izvor, snima se struja magnetiziranja, odnosno njen valni oblik te se uspoređuje s ranije snimljenim valnim oblicima. Iznos zaostalog toka je točka u kojoj se valni oblici struje magnetiziranja preklapaju. Nedostatak ove metode je poprimanje maksimalne vrijednosti remanentnog toka u jezgri nakon mjerenja, tj. zaostali tok koji je dobiven ovom metodom, neće biti očuvan nakon mjerenja [1].

Također, postoje i postupci što postavljaju remanentni tok na neku vrijednost, a ne da se s tom metodom izračunava iznos. Na primjer, demagnetiziranje, u kojemu remanentni tok poprima vrijednost nula. Postoji više načina demagnetiziranja, odnosno postoje razni načini kako postići demagnetiziranje jezgre. Također, postoji i postupak koji se naziva predmagnetiziranje, a tim postupkom remanentni tok poprima maksimalnu vrijednost [1].

Postoje brojne metode za određivanje iznosa remanentnog toka, a u ovom potpoglavlju su izdvojene samo neke. Navedene metode su ukratko objašnjene i navedene su im prednosti i nedostaci. U četvrtom poglavlju ovog završnog rada detaljnije će biti objašnjena metoda određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri uz pomoć istosmjernog izvora male snage.

### 3. MJERNA NESIGURNOST I MONTE CARLO METODA

Svaki rezultat koji se mjeri mora se na neki način iskazati. Mjerenje omogućava provjeru teoretskih izvoda, odnosno mjerenje je postupak kojim se eksperimentalnim putem dolazi do prave vrijednosti mjerene veličine. Također, može se reći da je mjerenje zapravo uspoređivanje same mjerene veličine i mjerne jedinice koja pripada toj mjerenoj veličini [9].

Mjerenje je nastalo još u dalekoj prošlosti, kada se čovjek služio svojim dijelovima tijela. Zbog toga i postoje u svijetu dekadski brojevi sustav koji proizlazi iz čovjekovih deset prstiju na udovima [10]. Razvojem samog čovjeka, pa i industrije i tehnologije, morao je postojati nekakav standard po kojem će svi mjeriti, odnosno iskazivati mjerni rezultat. Stoga je danas u upotrebi Međunarodni sustav jedinica („Le Systeme International d Unites“), kratice SI. 11. Opća konferencija Međunarodnog odbora 1960. godine usvaja naziv “Le Systeme International d Unites” (skraćeno SI).

Uz sve standarde koji postoje, uključujući i spomenuti SI sustav, i dalje dolazi do odudaranja između mjerene i prave vrijednosti. Postoje mnogi uzroci te pojave. Primjerice, osoba koja mjeri nije dovoljno precizna, sami uređaji nisu precizni ili nisu umjereni, itd. Takve pogreške se nazivaju apsolutnim pogreškama mjerenja.

U mjeriteljstvu postoje tri vrste različitih pogrešaka: grube, sistematske i slučajne.

Grube pogreške uzrokovane su čovjekovim propustom ili naglom promjenom u okolini, npr. može se dogoditi da osoba koja vrši mjerenje kod analognih instrumenata očitava potpuno drugu, krivu skalu. Takve greške mogu se otkloniti pažnjom i koncentriranošću na mjerenje. Gruba pogreška je velika i obično taj mjereni rezultat se u potpunosti odbacuje i mora se ponoviti mjerenje [9].

Sistematske pogreške imaju nekakvu vrijednost i predznak pa se one mogu uzeti u obzir za iskazivanje mjernog rezultata. One nastaju zbog nesavršenosti u cijelom procesu mjerenja (mjernog postupka, mjernog objekta, mjerila, itd.) [9].

Slučajne pogreške nastaju u mjernim objektima i mjerilima, ali nastaju i zbog utjecaja osobe koja mjeri te okoline. Takve pogreške rezultat čine nesigurnim [9].

Iz svega navedenog se vidi da je gotovo nemoguće izbjeći pogreške u samom postupku mjerenja, zato je potrebno dobro poznavati tematiku mjernih pogrešaka kako bi rezultat bio što precizniji i točniji, a uz to potrebno je znati ispravno služiti se mjernim uređajima, te truditi se smanjiti mjerne pogreške koliko se god može, a na onaj dio koji se ne može utjecati, mora se jasno naznačiti i iskazati ih u rezultatu.

U procesu mjerenja, odnosno iskazivanja mjernog rezultata, iskazuje se i mjerna nesigurnost. Ona se definira kao čimbenik koji se pridružuje rezultatu te opisuje rasipanje vrijednosti veličine koja se mjeri [11].

Postoje dvije vrste mjerne nesigurnosti, a to su: standardna mjerna nesigurnost i proširena mjerna nesigurnost.

Standardna mjerna nesigurnost se označava malim slovom  $u$ . Izražavanje mjernog rezultata sa standardnom mjernom nesigurnosti prikazano je izrazom (3-1) [12].

$$M = \{M \pm u\} [M] \quad (3-1)$$

Gore navedno iskazivanje mjernog rezultata je iskazivanje na srednjoj (S) razini. Također, postoji i visoka (V) razina te niska (N) razina. Visoka razina se primjenjuje u znanstvenim radovima i sl., a niska u svakodnevnom radu, odnosno mjerenju gdje nije potrebna visoka točnost mjerene veličine. Srednja razina, ujedno i najupotrebljivanija, koristi se u industrijskim mjerenjima [13].

Pri iskazivanju mjernog rezultata na N razini, upotrebljava se zaokruživanje na L-tu decimalu, što se računa prema izrazu:

$$L = \text{ent} \left[ \log \left( \frac{\{u\}}{1,2} \right) \right] \quad (3-2)$$

Mjerni rezultat na N razini se iskazuje prema izrazu:

$$M = \{M\} [M] \quad (3-3)$$

Proširena mjerna nesigurnost označava se velikim slovom  $U$  te se računa prema izrazu:

$$U = k * u \quad (3-4)$$

Kada se govori o mjernoj nesigurnosti, može se još raščlaniti na mjernu nesigurnost A-tipa i B-tipa.

Mjernu nesigurnost A-tipa se određuje tako što ćemo ponavljati mjerenje u istim uvjetima. Buduće ima više mjerenja, može se odrediti aritmetičku sredinu te standardno odstupanje. Ona se temelji na Gaussovoj razdiobi.

Aritmetička sredina računa se prema izrazu [14]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3-5)$$

Standardno odstupanje računa se prema izrazu [9]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-6)$$

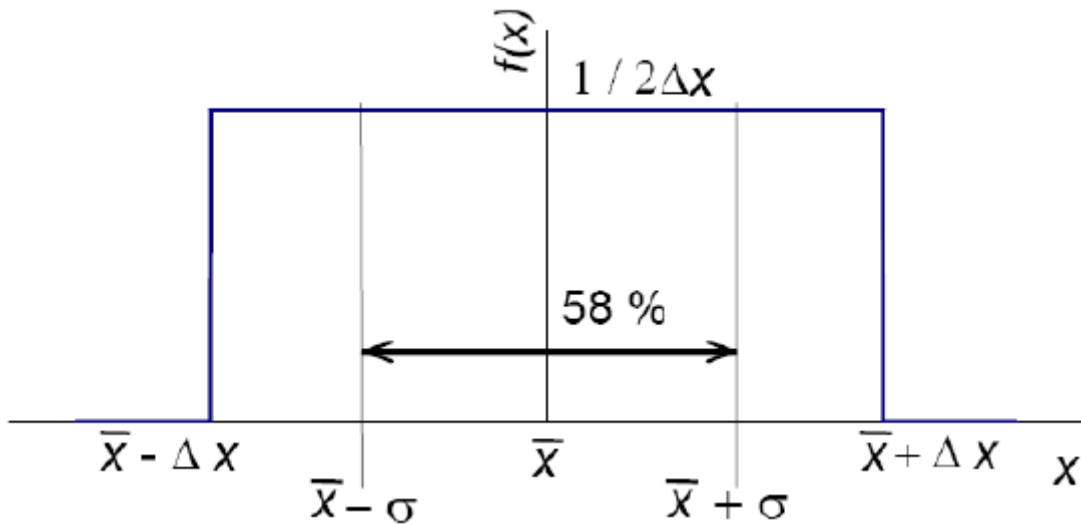
Mjerna nesigurnost A-tipa prikazana je standardnim odstupanjem aritmetičke sredine [15]:

$$u_a = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3-7)$$

Mjerna nesigurnost A tipa može se smanjiti na način da se povećava broj mjerenja, ali opet treba biti umjeren u ponavljanju broja mjerenja jer nakon nekog broja standardno odstupanje zanemarivo se smanjuje.



Mjerna nesigurnost B tipa, za razliku od mjerne nesigurnosti A tipa, ne ovisi o broju mjerenja. Ona se prikazuje pomoću pravokutne razdiobe, te se određujemo pomoću značajki mjerne opreme, prijašnjih rezultata sličnih mjerenja, broja digita, itd.



**Slika 3.1.** Pravokutna razdioba [12]

Slika 3.9. prikazuje pravokutnu razdiobu koja se povezuje s mjernom nesigurnosti B tipa te vrijedi:

$$\Delta x = G \quad (3-8)$$

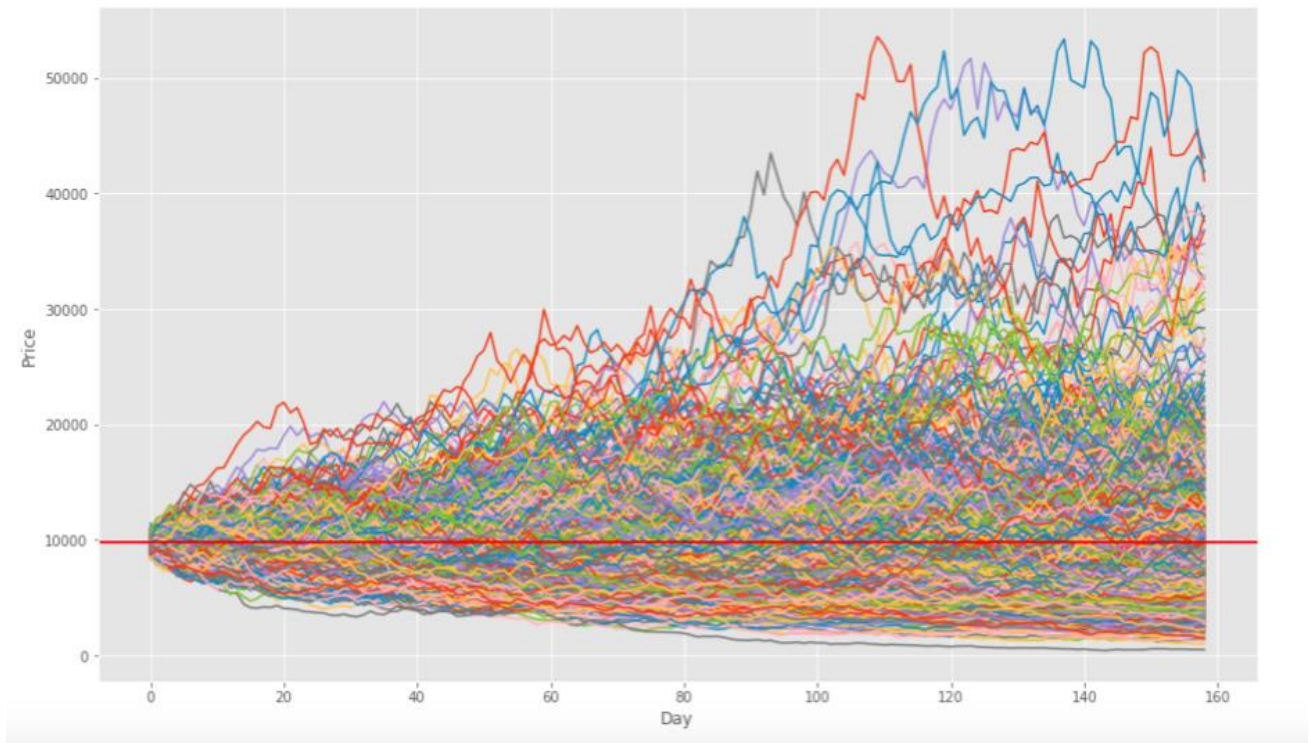
$$u_B = s = \frac{G}{\sqrt{3}} \quad (3-9)$$

Slovo G predstavlja podatke o graničnim pogreškama, te ono ne sadrži pravu vrijednost pogreške. Stoga kada ne postoji točnija informacija, pretpostavlja se da su sve vrijednosti pogrešaka unutar intervala granice pogrešaka [13].

Monte Carlo metoda je statistička metoda koja se koristi kako bi se riješili matematički problemi pomoću slučajnih varijabli. Naziv ima po području u kneževini Monako, koja je poznata po brojnim kockarnicama, koja se često veže uz igru rulet, a što je primjer generiranja slučajnih brojeva. Primarni cilj Monte Carlo metode je pokušati simulirati realnu situaciju, odnosno ponašanje stvarnih varijabli i predvidjeti ishod te razvijanje nekog slučaja [16]. Povijest Monte Carlo metode počinje u četrdesetim godinama prošlog stoljeća, kada je američka vojska razvijala svoje prvo nuklearno oružje, što je poznatije pod nazivom „Projekt Manhattan“. Budući da u to doba računala nisu imala moć kakvu imaju danas, niti sama Monte Carlo metoda nije bila iskorištena potpuno. Stoga, kako su se računala razvijala, paralelno se razvijala i Monte Carlo metoda [2].

Monte Carlo metoda daje odgovor na moguće ishode i vjerojatnosti nekakvog događaja. Ova metoda izvodi analizu tako što izrađuje model mogućih rezultata zamjenom raspona vrijednosti. Rezultati se uvijek iznova izračunavaju te se koriste drugačiji skupovi slučajnih vrijednosti. Monte Carlo metoda može imati čak i nekoliko desetaka tisuća ponovnih izračuna kako bi bila dovršena, a to sve ovisi o broju nesigurnosti i rasponima određenima za tu nesigurnost [17].

Primjer Monte Carlo metode prikazan je na slici 3.2. Navedena slika prikazuje ishod za razvoj cijene jedne od najpoznatijih kriptovaluta- Bitcoina. Simulacija je provedena uz 1000 ponavljanja u programskom jeziku „Python“.



**Slika 3.2.** Prikaz primjene Monte Carlo metode [18]

Na slici 3.2. vidi se 1000 potencijalnih ishoda za vrijednost kriptovalute „Bitcoin“ u vremenskom razdoblju od 158 dana. Među svim tim ishodima, postoje i oni ekstremni. Primjerice, jedan od ishoda predviđa cijenu od 40.000 američkih dolara (USD), dok drugi ekstremni ishod predviđa cijenu Bitcoina u vrijednosti od 400 američkih dolara (USD).

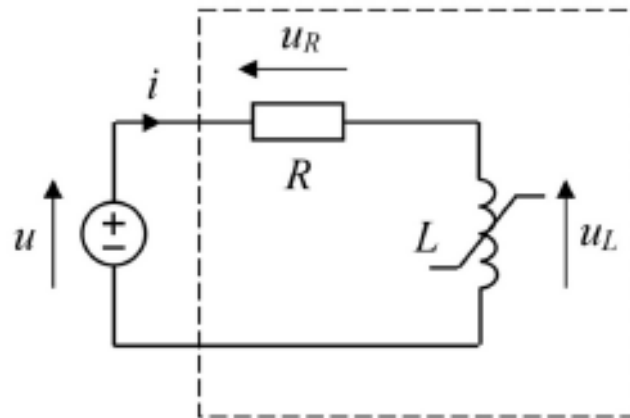
Osnovni koraci kako provoditi metodu su [20]:

1. Određivanje svih ulaznih varijabli i utvrđivanje njihovog međusobnog odnosa
2. Definiranje parametara distribucije
3. Uzimanje uzorka iz svake od distribucija i integriranje rezultata na temelju točke 1.
4. Ponavljanje procesa

Neki od primjera primjene Monte Carlo metode su: simulacija širenja virusa COVID-19, procjena rizika po ljudsko zdravlje od toksičnih elemenata u južnokorejskom kupusu, razni složeni sustavi u financijama, itd. Ova metoda će biti primjenjena i u ovome završnom radu, što će biti detaljnije objašnjeno u petom poglavlju ovoga rada. S pomoću Monte Carlo metode će biti procijenjena propagacija mjerne nesigurnosti napona sekundara. Sami algoritam MC metode bit će odrađen uz pomoć programskog paketa MATLAB.

#### 4. METODA ODREĐIVANJA REMANENTOG TOKA U MAGNETSKOJ JEZGRI UZ POMOĆ ISTOSMJERNOG IZVORA MALE SNAGE

U ovom postupku, koristi se relativno jednostavan model prigušnice s magnetskom jezgrom. Tu zavojnicu čini linearni otpor ( $R$ ) koji je serijski spojen s nelinearnim induktivitetom ( $L$ ). Otpor namota bit će predstavljen u otporu  $R$  [7].



Slika 4.1. Model zavojnice [7]

Osnova ove metode je određivanje točke u  $\varphi$ - $i$  ravnini gdje je jezgra zasićena. Struja magnetiziranja u toj točki je struja zasićenja ( $I_z$ ), a magnetski tok je tok zasićenja ( $\Phi_z$ ). Nekakav temelj ove metode jest taj da za jedan iznos struje magnetiziranja ima samo jedan iznos toka na velikoj (glavnoj) petlji histereze. Ukoliko navedeni uvjeti nisu ispunjeni, neće se moći precizno definirati tok zasićenja [1].

Magnetski tok računa se s pomoću izraza (4-1):

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

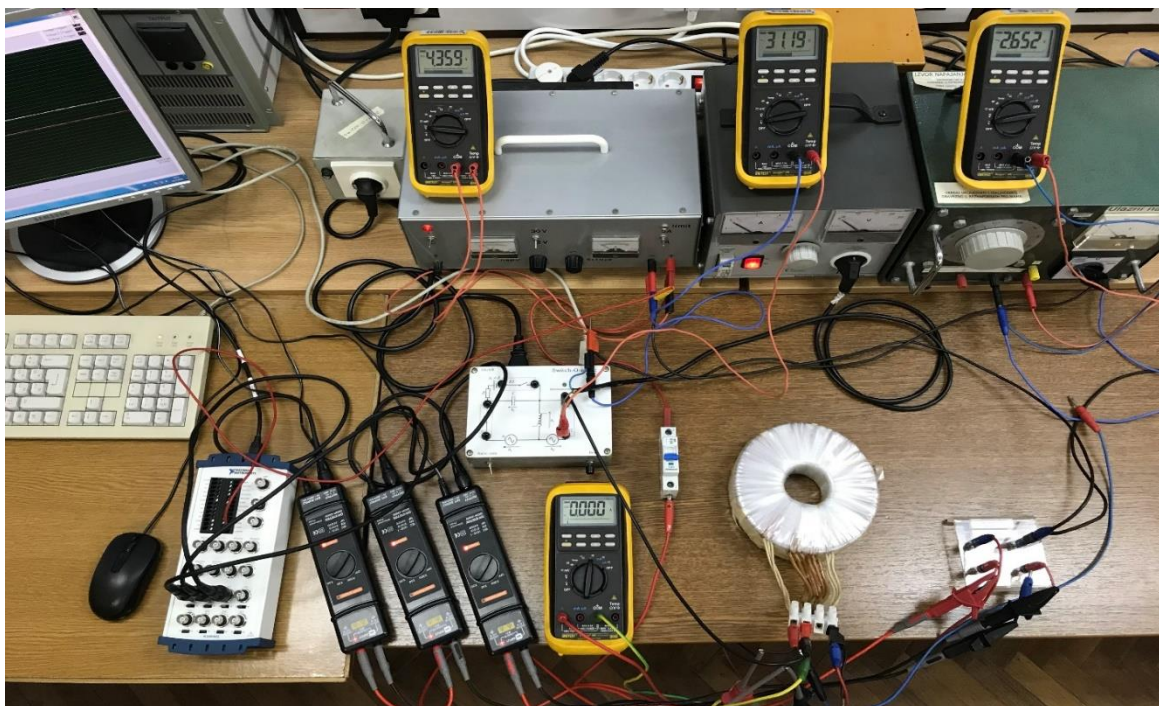
Dakle, na temelju teorijske podloge koja je navedena u ovome poglavlju, magnetski tok ( $\Phi_z$ ) jednak je:

$$\Phi_z = \varphi(t_z) = \frac{1}{N} \int_0^{t_z} u_L(t) dt + \Phi_R \quad (4-2)$$

U trenutku  $t_z$  je radna točka jednaka točki zasićenja nakon spajanja na istosmjerni napon.

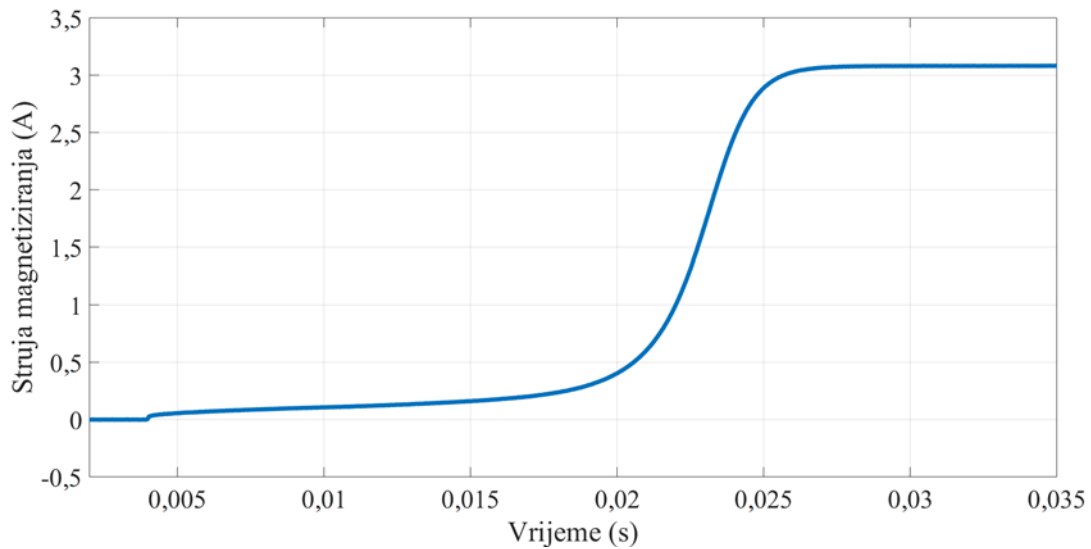
Prednosti ove metode su što ne postoje slučajevi u kojima se ne može odrediti iznos remanentnog toka, kao što je slučaj u metodi određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri uz pomoć izmjeničnog izvora. Također, kada se transformator uklapa, uklapa se na niži napon od nazivnog, što je velika prednost kod visokonaponskih transformatora. Kako postoje prednosti, tako postoji i nedostatak, a to je potreba za dodatnim istosmjernim izvorom [1].

Slika 4.2. prikazuje laboratorijski postav koji će simulirati metodu određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri uz pomoć istosmjernog izvora male snage.



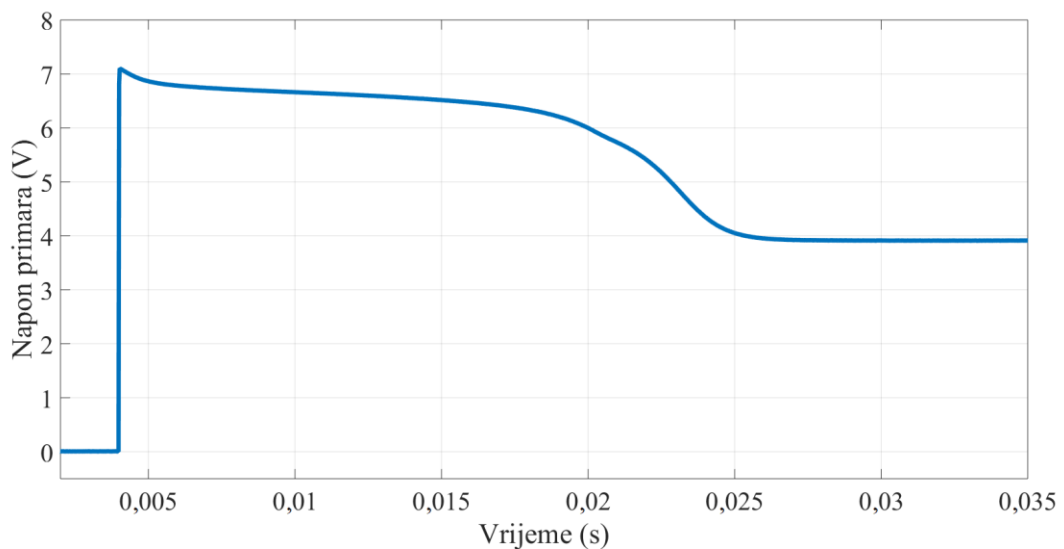
Slika 4.2. Laboratorijski postav za određivanje remanentnog toka [1]

U ovom pokusu istosmjerni izvor ( $u_3$ ) napajanja postavljen je na 7 V, a 3,56 mVs je iznos toka zasićenja ( $\Phi_Z$ ). Sukladno tome, struja zasićenja je 3 A ( $I_Z$ ). Izvor i transformator su spojeni preko mehaničke sklopke ( $S_3$ ). Sklopke  $S_2$  i  $S_1$  su isključene. Pokus je proveden s 25 različitih mjerenja. U sljedećim slikama (4.3., 4.4., 4.5., 4.6.) bit će prikazana struja magnetiziranja, napon primara, napon sekundara te valni oblik magnetskog toka [1].



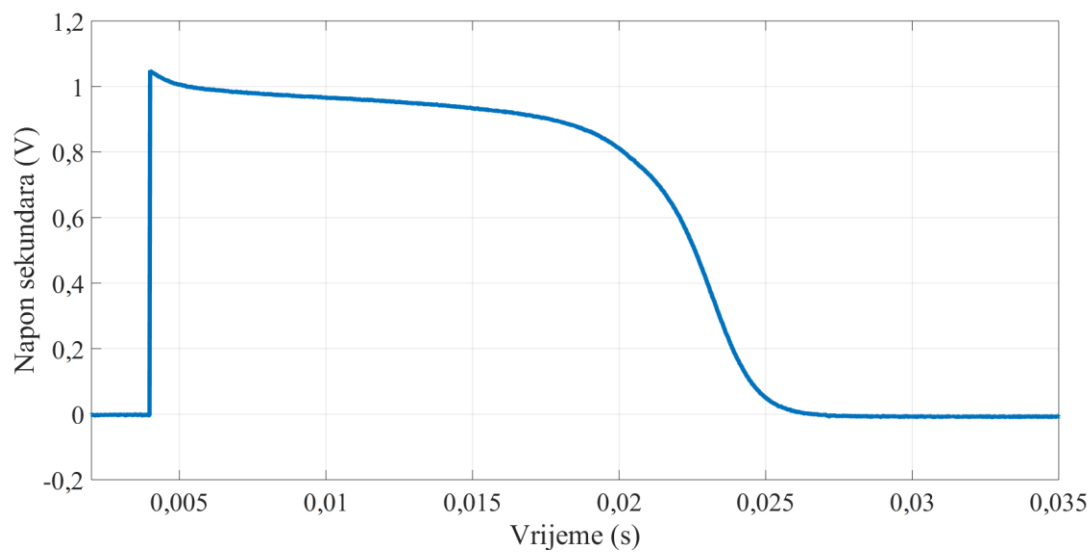
**Slika 4.3.** Valni oblik struje magnetiziranja [1]

$$(U_2 = 18 \text{ V (+)})$$



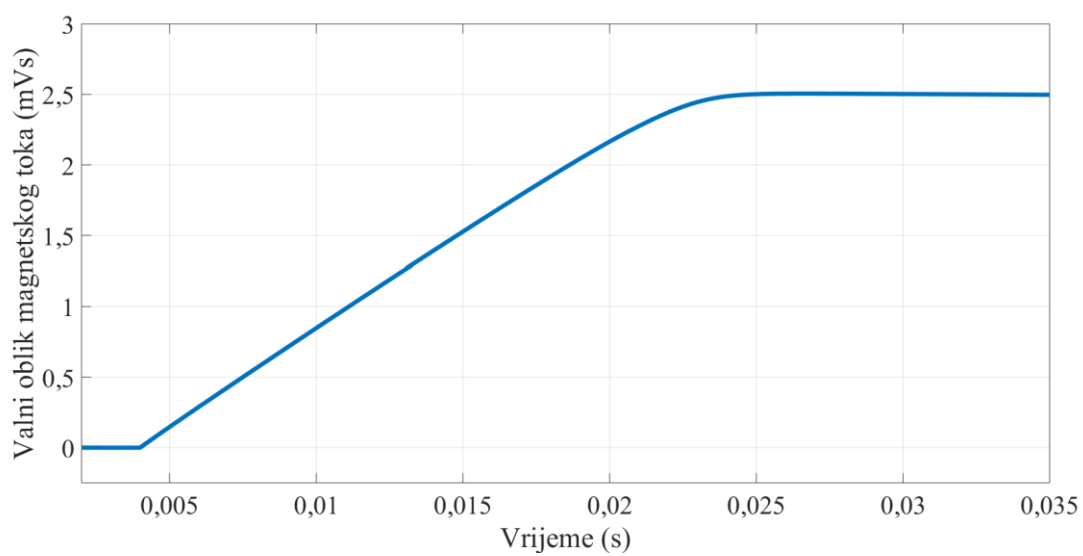
**Slika 4.4.** Napon primara [1]

$$(U_2 = 18 \text{ V (+)})$$



**Slika 4.5.** Napon sekundara [1]

( $U_2 = 18 \text{ V (+)}$ )

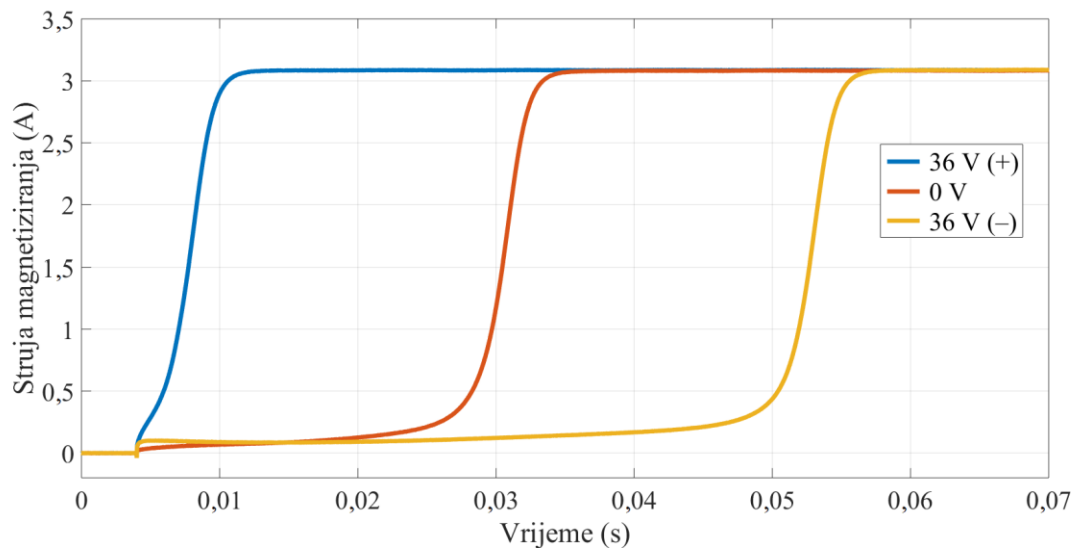


**Slika 4.6.** Magnetski tok [1]

( $U_2 = 18 \text{ V (+)}$ )

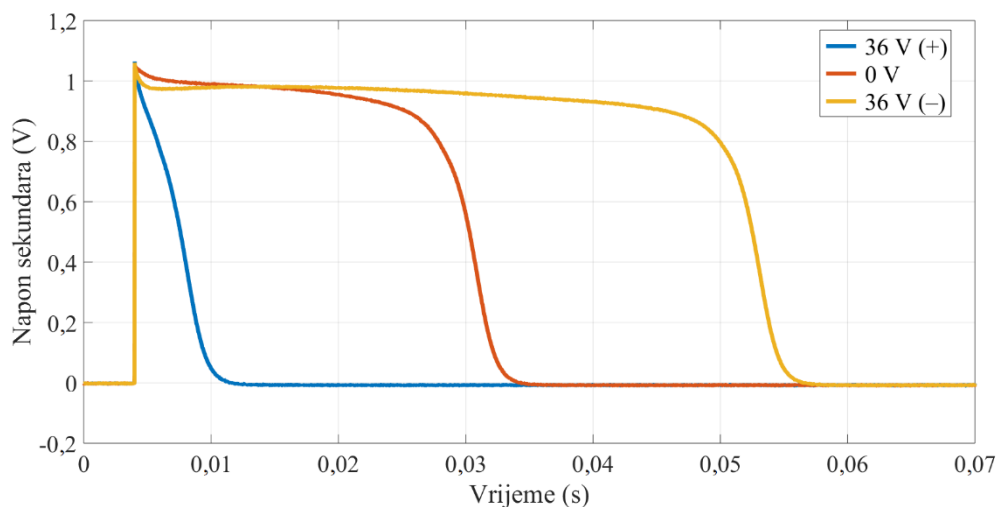


Iz navedenih slika, može se primijetiti da kada jezgra ode u zasićenje, struja naglo raste. Napon primara, zbog rasta struje magnetiziranja, spusti se na 4 V (slika 4.4.). To je uzrokovano unutarnjim otporom izvora i otporom  $R_R$ . Magnetski tok razlike ( $\Delta\phi$ ) može se prikazati kao površina ispod krivulje na slici 4.5. Na slici 4.6. prikazan je valni oblik magnetskog toka koji na početku ima vrijednost 0 mVs, te nakon nekog vremena poprima vrijednost 2,5 mVs.

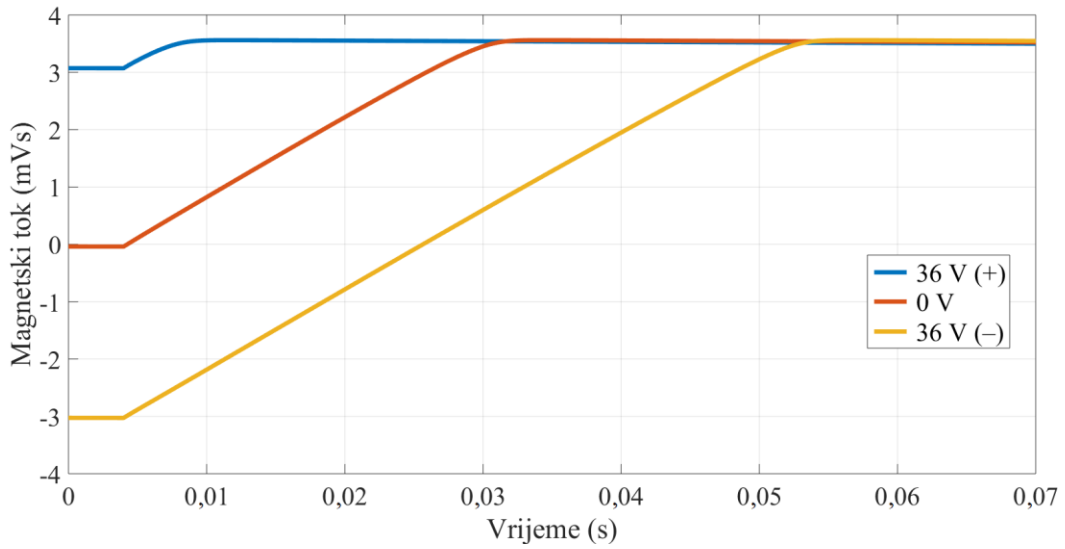


**Slika 4.7.** Struja magnetiziranja s tri različita parametra [1]

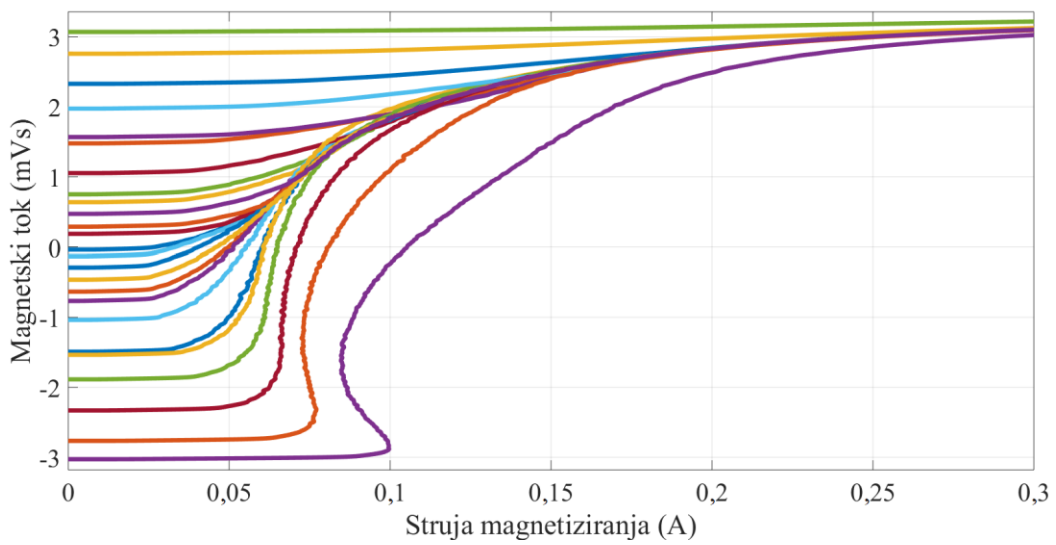
Na slici 4.7. može se vidjeti kako prvo poraste struja koja ima parametar  $U_2 = 36 \text{ V (+)}$ . Razlog tome je to da je iznos remanentnog toka najbliži toku zasićenja. Za parametar  $U_2 = 36 \text{ V (-)}$  je potpuno suprotno, što je i očekivano. Što se tiče napona sekundara, na slici 4.8. primjenjuje se isti princip. Površina ispod krivulje na slici 4.8. ekvivalentna je magnetskom toku razlike ( $\Delta\phi$ ).



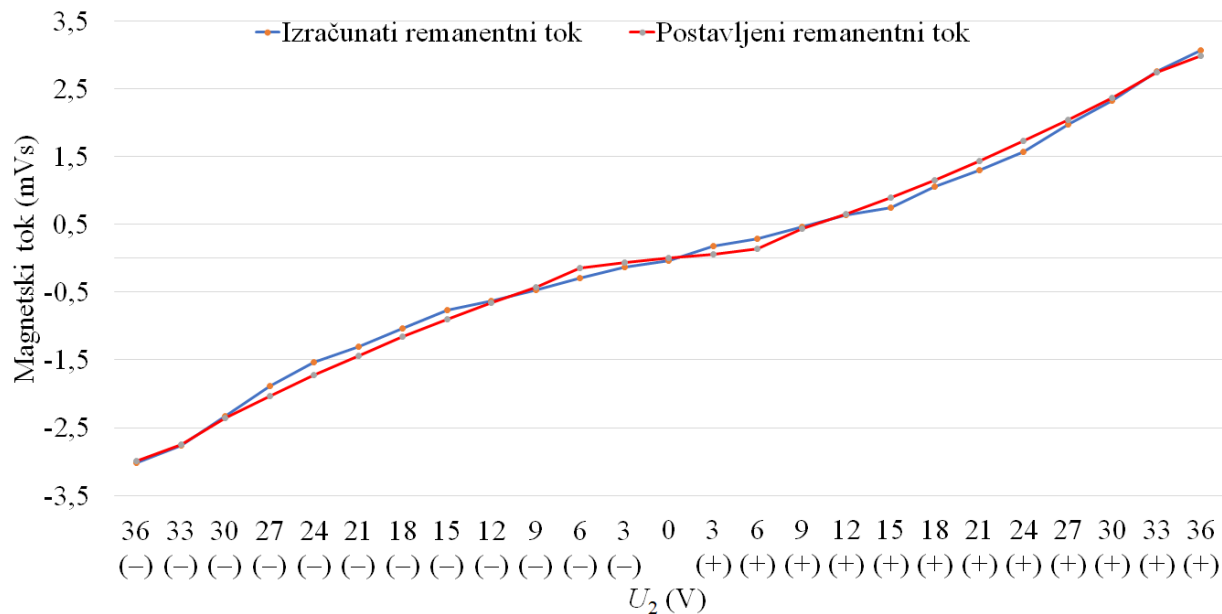
**Slika 4.8.** Napon sekundara s tri različita parametra [1]



**Slika 4.9.** Magnetski tok s tri različita parametra [1]



**Slika 4.10.** Krivulje magnetiziranja za 25 mjerenja [1]



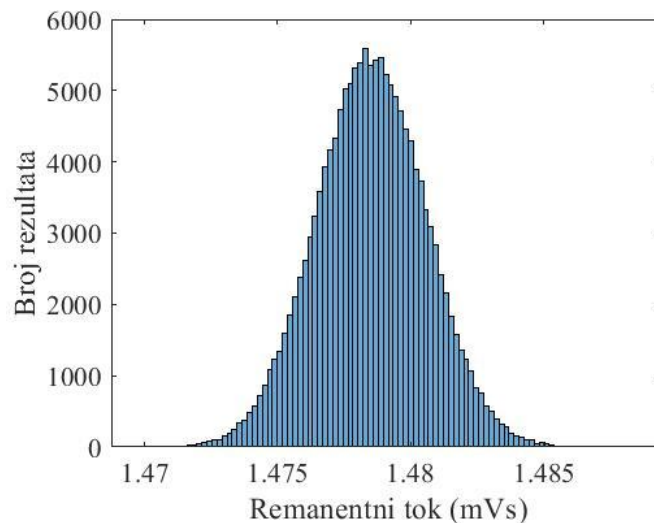
**Slika 4.11.** Usporedba izračunatog i postavljenog remanentnog toka [1]

Iz priloženih slika može se uočiti da je moguće odrediti zaostali tok bez informacija o stanjima neposredno prije mjerenja. Kako bi se izvela ova metoda, mora se snimiti glavna petlja histereze te na njoj odabrati točku zasićenja. Uz to, za ovu metodu dovoljno je mjeriti samo napon sekundara koji je ekvivalentan naponu induktiviteta ( $u_L$ ).

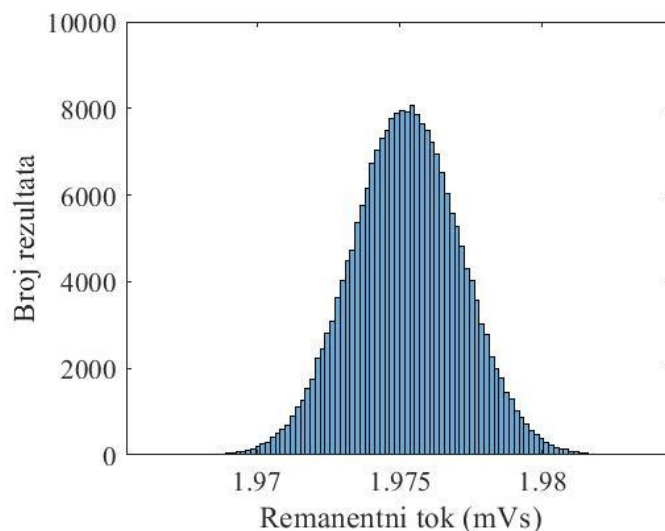
## 5. PROCJENA PROPAGACIJE MJERNE NESIGURNOSTI MJERENIH VELIČINA PRIMJENOM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE

Za provedbu procjene mjerne nesigurnosti, koristit će se ulazne veličine koje su prethodno izmjerene, a to će biti napon sekundara. Provedeno je 25 mjerenja za svaki iznos mjerne nesigurnosti. Za određivanje propagacije mjerne nesigurnosti, vrijednosti relativne mjerne nesigurnosti napona sekundara od 2 %, 4 % i 6 % će biti zadane, što znači da će biti provedeno ukupno 75 simulacija. Sve Monte Carlo simulacije će se odraditi u programskog paketu MATLAB, a pripadajući kod se nalazi u priložima.

Rezultati simulacije za nesigurnost napona sekundara od 2 % navedeni su u tablici 5.1. Iz tablice 5.1. može se uočiti kako jedino za parametre  $U_2 = 3 \text{ V } (-)$ ,  $U_2 = 0 \text{ V}$  i  $U_2 = 3 \text{ V } (+)$ , relativna mjerna nesigurnost prelazi iznos od 1 %. Od parametra  $U_2 = 36 \text{ V } (+)$  do  $U_2 = 36 \text{ V } (-)$ , nesigurnost se stalno povećava. Broj sljedova Monte Carlo simulacije je u rasponu od dva do 51.



**Slika 5.1.** Razdioba zaostalog toka za postavljenu relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 % pri naponu  $U_2 = 21 \text{ V } (+)$ .



**Slika 5.2.** Razdioba zaostalog toka za postavljenu relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 % pri naponu  $U_2 = 27 \text{ V (+)}$ .

S pomoću izraza (5-1) dobivena je srednja vrijednost nesigurnosti zaostalog toka ( $u_{SR}$ ) koja iznosi 2,434  $\mu\text{Vs}$ . Od srednjih vrijednosti još je izračunata i ona relativne nesigurnosti zaostalog toka ( $u_{\%S}$ ) prema izrazu (5-2), koja iznosi 0,632 %. Broj sljedova provedene simulacije iznosi 742.

$$u_{SR} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} u_{\Phi Ri} \quad (5-1)$$

$$u_{\%SR} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} u_{\%i} \quad (5-2)$$

**Tablica 5.1.** Rezultati simulacija za relativnu mjernu nesigurnost mjerenog napona od 2 %.

$U_2$ (V)	Sr. vrijednost zaostalog toka, $\Phi_{RS}$ (mVs)	Mj. nesigurnost zaostalog toka, $u_{\Phi R}$ ( $\mu$ Vs)	Rel. mj. nesigurnost zaostalog toka, $u\%$	Ukupan broj sljedova simulacije, $H$
36 (+)	3,071	1,456	0,047	2
33 (+)	2,76	1,595	0,058	11
30 (+)	2,33	1,762	0,076	16
27 (+)	1,975	1,9	0,096	15
24 (+)	1,568	2,04	0,013	25
21 (+)	1,478	2,058	0,139	24
18 (+)	1,054	2,183	0,207	22
15 (+)	0,75	2,284	0,305	23
12 (+)	0,638	2,3	0,361	38
9 (+)	0,471	2,357	0,5	30
6 (+)	0,288	2,4	0,833	37
3 (+)	0,185	2,435	1,316	29
0	-0,038	2,491	6,555	29
3 (-)	-0,129	2,507	1,943	33
6 (-)	-0,288	2,548	0,885	32
9 (-)	-0,461	2,591	0,562	25
12 (-)	-0,631	2,634	0,417	18
15 (-)	-0,764	2,656	0,348	40
18 (-)	-1,035	2,723	0,263	32
21 (-)	-1,490	2,832	0,19	29
24 (-)	-1,534	2,835	0,185	48
27 (-)	-1,885	2,92	0,155	42
30 (-)	-2,329	3,015	0,129	45
33 (-)	-2,764	3,104	0,112	51
36 (-)	-3,026	3,22	0,106	46

Rezultati simulacije za relativnu mjernu nesigurnost napona sekundara od 4 % prikazani su u tablici 5.2.

**Tablica 5.2.** Rezultati simulacija za relativnu mjernu nesigurnost mjerenog napona od 4 %.

$U_2$ (V)	Sr. vrijednost zaostalog toka, $\Phi_{RS}$ (mVs)	Mj. nesigurnost zaostalog toka, $u_{\Phi R}$ ( $\mu$ Vs)	Rel. mj. nesigurnost zaostalog toka, $u\%$	Ukupan broj sljedova simulacije, $H$
36 (+)	3,071	2,932	0,095	36
33 (+)	2,76	3,205	0,116	25
30 (+)	2,33	3,535	0,152	62
27 (+)	1,975	3,809	0,193	65
24 (+)	1,568	4,088	0,261	84
21 (+)	1,478	4,121	0,279	91
18 (+)	1,054	4,376	0,415	80
15 (+)	0,75	4,565	0,609	66
12 (+)	0,638	4,608	0,722	90
9 (+)	0,471	4,712	1	112
6 (+)	0,288	4,804	1,668	92
3 (+)	0,185	4,869	2,632	103
0	-0,038	4,975	13,092	113
3 (-)	-0,129	5,009	3,883	92
6 (-)	-0,288	5,1	1,771	120
9 (-)	-0,461	5,189	1,126	140
12 (-)	-0,631	5,264	0,834	136
15 (-)	-0,764	5,318	0,696	101
18 (-)	-1,035	5,454	0,527	146
21 (-)	-1,490	5,664	0,38	138
24 (-)	-1,534	5,666	0,369	143
27 (-)	-1,885	5,839	0,31	153
30 (-)	-2,329	6,042	0,259	200
33 (-)	-2,764	6,21	0,225	147
36 (-)	-3,026	6,443	0,213	199

Iz tablice 5.2. može se uočiti kako jedino za  $U_2 = 9 \text{ V (+)}$ ,  $U_2 = 6 \text{ V (+)}$ ,  $U_2 = 3 \text{ V (+)}$ ,  $U_2 = 0 \text{ V}$ ,  $U_2 = 3 \text{ V (-)}$ ,  $U_2 = 6 \text{ V (-)}$ ,  $U_2 = 9 \text{ V (-)}$ , relativna mjerna nesigurnost prelazi iznos od 1 %. Od  $U_2 = 36 \text{ V (+)}$  do  $U_2 = 36 \text{ V (-)}$ , nesigurnost se stalno povećava. Broj sljedova Monte Carlo simulacije je u rasponu od 25 do 200. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 2734. Srednja vrijednost nesigurnosti zaostalog toka iznosi  $4,872 \mu\text{Vs}$ , ista je izračunata uz pomoć izraza (5-1). Srednja vrijednost relativne nesigurnosti zaostalog toka prema izrazu (5-2) iznosi 1,273 %.

Za relativnu nesigurnost napona sekundara od 6 %, dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 5.3.

Relativna nesigurnost ( $u\%$ ) u tablici 5.3. nadmašuje iznos od 1 % u slučajevima kao i u prethodne dvije tablice, ali i za parametre  $U_2 = 12 \text{ V (+)}$ ,  $U_2 = 12 \text{ V (-)}$ ,  $U_2 = 15 \text{ V (-)}$ . Za vrijednost  $U_2 = 0 \text{ V}$ , relativna mjerna nesigurnost je značajno porasla na 19,177 %. Kao i u prehodna dva slučaja, nesigurnost se stalno povećava od parametra  $U_2 = 36 \text{ V (+)}$  do  $U_2 = 36 \text{ V (-)}$ . Raspon Monte Carlo simulacija u tablici 5.3. je u rasponu od 86 do 427. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije je 6178. U tablici 5.3. srednja vrijednost nesigurnosti zaostalog toka iznosi  $7,322 \mu\text{Vs}$ , ista je izračunata uz pomoć izraza (5-1). Srednja vrijednost nesigurnosti zaostalog toka prema izrazu (5-2) iznosi 1,892 %.



**Tablica 5.3.** Rezultati simulacija za relativnu mjernu nesigurnost mjerenog napona od 6 %.

$U_2$ (V)	Sr. vrijednost zaostalog toka, $\Phi_{RS}$ (mVs)	Mj. nesigurnost zaostalog toka, $u_{\Phi R}$ ( $\mu$ Vs)	Rel. mj. nesigurnost zaostalog toka, $u\%$	Ukupan broj sljedova simulacije, $H$
36 (+)	3,07	4,42	0,144	86
33 (+)	2,759	4,828	0,175	107
30 (+)	2,329	5,317	0,228	131
27 (+)	1,974	5,734	0,29	157
24 (+)	1,567	6,152	0,393	136
21 (+)	1,478	6,201	0,42	154
18 (+)	1,053	6,574	0,624	170
15 (+)	0,749	6,857	0,915	223
12 (+)	0,637	6,927	1,087	208
9 (+)	0,47	7,08	1,506	190
6 (+)	0,287	7,218	2,515	246
3 (+)	0,184	7,312	3,974	231
0	-0,039	7,479	19,177	258
3 (-)	-0,13	7,534	5,795	277
6 (-)	-0,289	7,667	2,653	256
9 (-)	-0,462	7,794	1,687	297
12 (-)	-0,632	7,91	1,252	269
15 (-)	-0,765	7,986	1,044	280
18 (-)	-1,036	8,189	0,79	330
21 (-)	-1,491	8,5	0,57	310
24 (-)	-1,535	8,513	0,555	349
27 (-)	-1,886	8,78	0,466	341
30 (-)	-2,33	9,073	0,389	350
33 (-)	-2,765	9,331	0,337	395
36 (-)	-3,027	9,673	0,32	427

**Tablica 5.4.** Mjerne nesigurnosti za sve slučaje relativne mjerne nesigurnosti napona sekundara.

$U_2$ (V)	Nesigurnost zaostalog toka za 2 %, $u_{\Phi R}$ ( $\mu$ Vs)	Relativna nesigurnost zaostalog toka za 2 %, $u\%$	Nesigurnost zaostalog toka za 4 %, $u_{\Phi R}$ ( $\mu$ Vs)	Relativna nesigurnost zaostalog toka za 2 %, $u\%$	Nesigurnost zaostalog toka za 6 %, $u_{\Phi R}$ ( $\mu$ Vs)	Relativna nesigurnost zaostalog toka za 2 %, $u\%$
<b>36 (+)</b>	1,456	0,047	2,932	0,095	4,42	0,144
<b>33 (+)</b>	1,595	0,058	3,205	0,116	4,828	0,175
<b>30 (+)</b>	1,762	0,076	3,535	0,152	5,317	0,228
<b>27 (+)</b>	1,9	0,096	3,809	0,193	5,734	0,29
<b>24 (+)</b>	2,04	0,013	4,088	0,261	6,152	0,393
<b>21 (+)</b>	2,058	0,139	4,121	0,279	6,201	0,42
<b>18 (+)</b>	2,183	0,207	4,376	0,415	6,574	0,624
<b>15 (+)</b>	2,284	0,305	4,565	0,609	6,857	0,915
<b>12 (+)</b>	2,3	0,361	4,608	0,722	6,927	1,087
<b>9 (+)</b>	2,357	0,5	4,712	1	7,08	1,506
<b>6 (+)</b>	2,4	0,833	4,804	1,668	7,218	2,515
<b>3 (+)</b>	2,435	1,316	4,869	2,632	7,312	3,974
<b>0</b>	2,491	6,555	4,975	13,092	7,479	19,177
<b>3 (-)</b>	2,507	1,943	5,009	3,883	7,534	5,795
<b>6 (-)</b>	2,548	0,885	5,1	1,771	7,667	2,653
<b>9 (-)</b>	2,591	0,562	5,189	1,126	7,794	1,687
<b>12 (-)</b>	2,634	0,417	5,264	0,834	7,91	1,252
<b>15 (-)</b>	2,656	0,348	5,318	0,696	7,986	1,044
<b>18 (-)</b>	2,723	0,263	5,454	0,527	8,189	0,79
<b>21 (-)</b>	2,832	0,19	5,664	0,38	8,5	0,57
<b>24 (-)</b>	2,835	0,185	5,666	0,369	8,513	0,555
<b>27 (-)</b>	2,92	0,155	5,839	0,31	8,78	0,466
<b>30 (-)</b>	3,015	0,129	6,042	0,259	9,073	0,389
<b>33 (-)</b>	3,104	0,112	6,21	0,225	9,331	0,337
<b>36 (-)</b>	3,22	0,106	6,443	0,213	9,673	0,32

**Tablica 5.5.** Srednje vrijednosti relativnih mjernih nesigurnosti te prosječan broj sljedova za sve parametre nesigurnosti napona sekundara

<b>Relativna mjerna nesigurnost napona sekundara</b>	<b>Srednja vrijednost nesigurnosti zaostalog toka, <math>u_{SR}</math> (<math>\mu</math>Vs)</b>	<b>Srednja vrijednost relativne nesigurnosti zaostalog toka, <math>u\%_{SR}</math></b>	<b>Prosječan broj sljedova</b>
2%	2,434	0,632	29,68
4%	4,872	1,273	109,36
6%	7,322	1,892	247,12

Tablica 5.5. prikazuje relativne mjerne nesigurnosti, srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti i prosječan broj sljedova za pojedino mjerenje. Vidljivo je kako se parametri povećavaju linearno, odnosno što je veća relativna nesigurnost napona sekundara to će biti i veće vrijednosti srednje nesigurnosti zaostalog toka  $u_{SR}$ , srednje relativne nesigurnosti zaostalog toka ( $u\%_{SR}$ ), te prosječan broj sljedova.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu predstavljena je metoda određivanja zaostalog toka primjenom istosmjernog izvora relativno male snage. Rezultati procjene propagacije mjerne nesigurnosti remanentnog toka su dobiveni uz pomoć adaptivne Monte Carlo metode, čiji je kod napisan u programskom paketu MATLAB. Također je opisano značenje pojma remanentni tok, mjerne nesigurnosti i povijest nastanka adaptivne Monte Carlo metode.

Metoda određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri uz pomoć istosmjernog izvora male snage je relativno precizna i pouzdana jer bez podataka o prethodnim stanjima može se odrediti remanentni tok. Manjkavost ove metode je ta da zaostali tok neće biti očuvan i nakon provedbe ove metode. Potreba za istosmjernim izvorom u ovoj metodi je ujedno i prednost i nedostatak. Prednost je kod energetskih transformatora visokog nazivnog napona, a nedostatak je jer postoji potreba za istosmjernim izvorom napajanja. Iz priloženih tablica, odnosno iz provedenih Monte Carlo simulacija, vidljivo je da je trend povećanja propagacije mjerne nesigurnosti linearan. Grafički rezultati navedene metode prikazuju normalnu (Gaussovu) razdiobu, što je bilo i očekivano.

Iz dobivenih rezultata vidi se linearan trend propagacije nesigurnosti. Dakle, pri povećanju nesigurnosti napona sekundara, povećava se i nesigurnost zaostalog toka. Dodatno, srednja vrijednost nesigurnosti zaostalog toka manja je oko tri puta od nesigurnosti napona sekundara kao mjerene veličine.

## LITERATURA

- [1] D. Vulin; FERIT, Doktorski rad, Metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri, 2020.g.
- [2] M. Posavec; Stručni članak: Monte Carlo metoda, URL: <http://www.rep.hr/vijesti/strucni-clanci/strucni-clanak-monte-carlo-metoda/211/>, zadnja posjeta stranici 1.3.2021.g.
- [3] B. Runje; Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, 2014.g., URL: [https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja\\_TTM.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja_TTM.pdf), zadnja posjeta stranici 1.3.2021.
- [4] Euditorij e-skole; URL: [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abc-6f535c3b5254/html/7582\\_Magnetsko\\_polje\\_elektricne\\_struje.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abc-6f535c3b5254/html/7582_Magnetsko_polje_elektricne_struje.html), zadnja posjeta stranici 24.3.2022.g.
- [5] Dr. A. Dolenc; Transformatori I. I II. dio, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1991.g.
- [6] B. Vukadin; FERIT, Završni rad, Metoda mjerenja remanentnog magnetskog toka zavojnice sa željeznom jezgrom, 2018.g.
- [7] A. Tolić; FERIT, Diplomski rad, Određivanje remanentnog magnetskog toka energetskog transformatora s pomoću istosmjernog izvora male snage, 2020. g.
- [8] 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.
- [9] V. Bego; Mjerenja u elektrotehnici, 8. dopunjeno izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.g.
- [10] Državni zavod za mjeriteljstvo; URL: <https://dzm.gov.hr/istaknute-teme/zakonsko-mjeriteljstvo/mjerne-jedinice-228/povijest-metricnog-sustava/247>, zadnja posjeta stranici: 24.3.2022.
- [11] I. Čelap; Klinički zavod za kemiju, KBC Sestre milosrdnice, 8. kongres Hrvatskog društva za medicinsku biokemiju i laboratorijsku medicinu, 22. - 26. rujna 2015., Zagreb
- [12] K. Miličević; prezentacije iz predavanja kolegija Osnove mjerenja; FERIT, 2021.g.
- [13] V. Čorluka; FERIT; kolegij Osnove mjerenja, auditorne vježbe
- [14] T. Tadić; Aritmetička sredina i standardna devijacija; Poučak: časopis za metodiku i nastavu matematike, str. 10-24, Vol. 18 No. 69, 2017.
- [15] Predložak za laboratorijske vježbe iz kolegija Osnove mjerenja; FERIT

- [16] Monte Carlo simulacija, što je to, definicija i kocept; URL: <https://hr.economy-pedia.com/11033755-monte-carlo-simulation.>, zadnja posjeta stranici: 2.5.2022.g.
- [17] Monte Carlo Simulation: What Is It and How Does It Work? ; URL: [https://www.palisade.com/risk/monte\\_carlo\\_simulation.asp](https://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp), zadnja posjeta stranici 9.5.2022.g.
- [18] Bitcoin Monte Carlo Simulation; URL: <https://medium.com/@nd12y/bitcoin-monte-carlo-simulation-e42275c2a1ff> , zadnja posjeta stranici: 9.5.2022.
- [19] Končar – Institut za elektrotehniku; Monitoring transformatora, URL: [https://www.koncar-institut.hr/hr/?solution\\_group=transformer-monitoring](https://www.koncar-institut.hr/hr/?solution_group=transformer-monitoring), zadnja posjeta stranici 12.5.2022.g.
- [20] R.Kwiatkowski; stručni članak; Monte Carlo Simulation — a practical guide, URL: <https://towardsdatascience.com/monte-carlo-simulation-a-practical-guide-85da45597f0e>, zadnja posjeta stranici: 20.5.2022.g.

## SAŽETAK

U ovom radu opisan je remanentni tok, mjerna nesigurnost te Monte Carlo metoda. Metoda određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri uz pomoć istosmjernog izvora male snage detaljno je opisana i prikazani su rezultati mjerenja. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina odrađena je uz pomoć Monte Carlo metode čiji kod je napisan u programskom paketu MATLAB.

**Ključne riječi:** remanentni magnetski tok, adaptivna Monte Carlo metoda, mjerna nesigurnost

## ABSTRACT

### ESTIMATION OF PROPAGATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY OF MEASURED QUANTITIES USING THE ADAPTIVE MONTE CARLO METHOD IN DETERMINING THE REMANENT FLOW USING A LOW POWER DC SOURCE

This paper describes the remanent flux, measurement uncertainty and the Monte Carlo method. The method of determining the remanent flux in a magnetic core using a low-power DC source is described in detail and the measurement results are presented. The estimation of the propagation of the measurement uncertainty of the measured quantities was performed using the Monte Carlo method, the code of which was written in the MATLAB software.

**Keywords:** remanent magnetic flux, adaptive Monte Carlo method, measurement uncertainty

## **ŽIVOTOPIS**

Vedran Šestak rođen je 15.3.2001. godine u Osijeku. Nakon završetka Osnovne škole Tin Ujević u Osijeku, 2015. godine upisuje I. gimnaziju u Osijeku, smjer opći, te završava istu 2019. godine. Preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija upisuje 2019. godine. Na drugoj godini studija opredjeljuje se za izborni blok elektroenergetika.



## PRILOZI

U elektroničkom obliku pohranjenom na CD-u nalazi se:

- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri uz pomoć istosmjernog izvora male snage u datoteci „Metoda\_3“ ( \_:\Prilozi\Metoda 3\Metoda\_3.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje procjene propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri uz pomoć istosmjernog izvora male snage u datoteci „Metoda\_3\_AMC.m“ ( \_:\Prilozi\Metoda 3\AMC\Metoda\_3\_AMC.m) i „AMC\_funkcija\_3.m“ ( \_:\Prilozi\Metoda 3\AMC\AMC\_funkcija\_3.m)