

# Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze

---

**Franjković, Mario**

**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:200:278494>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-10**

*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 analiziranjem male petlje histereze**

**Završni rad**

**Mario Franjković**

**Osijek, 2023.**

**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>	Mario Franjković
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4820, 29.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	71811181571
<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 analiziranjem male petlje histereze
<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 magnetskoj jezgri analiziranjem male petlje histereze. Korištenjem adaptivne Monte Carlo metode, procijeniti propagaciju mjerne nesigurnosti mjenjenih veličina pri određivanju
<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: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda 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>	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

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

Osijek, 25.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Mario Franjković

**Studij:**

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

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

4820, 29.07.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

14

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze**

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:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA RADA .....</b>	<b>2</b>
<b>3. REMANENTNI MAGNETSKI TOK .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2. Načini mjerenja remanentnog magnetskog toka .....</b>	<b>6</b>
<b>4. POGREŠKE MJERENJA I MJERNA NESIGURNOST .....</b>	<b>10</b>
<b>5. MONTE CARLO METODA .....</b>	<b>16</b>
<b>6. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA U MAGNETSKOJ JEZGRI ANALIZIRANJEM MALE PETLJE HISTEREZE .....</b>	<b>19</b>
<b>7. PROCJENA PROPAGACIJE MJERNIH NESIGURNOSTI KORIŠTENJEM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE .....</b>	<b>25</b>
<b>8. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>37</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>38</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>40</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>40</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>41</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>42</b>

## 1. UVOD

U elektroenergetskim sustavima, važnu ulogu imaju transformatori i zavojnice. Glavni je zadatak transformatora sniziti jednu razinu napona na neku drugu vrijednost. Prilikom cijelog tog procesa može doći do pojave remanentnog magnetskog toka koji može dovesti do poteškoća u radu elektroenergetskog sustava. Kako bi se to spriječilo, u nekim primjenama je važno doći do vrijednosti tog toka [1].

Mjerna se nesigurnost može definirati kao parametar koji opisuje varijabilnost, odnosno širenje rezultata mjerenja i pokazuje raspon različitih vrijednosti koje se mogu pripisati toj mjerenoj veličini [2].

Adaptivna Monte Carlo metoda pokazala se korisnom strategijom za procjenu propagacije mjernih nesigurnosti. Ova se tehnika primjenjuje u raznolikim područjima istraživanja i omogućuje generiranje slučajnih varijabli putem matematičke tehnike [3].

U drugom se poglavlju rada definira remanentni magnetski tok i opisuju se mogući načini mjerenja. Trećim su poglavljem pobliže opisane slučajne, grube i sistematske pogreške i dana je definicija mjerne nesigurnosti. Četvrto poglavlje opisuje Monte Carlo metodu. U petom je poglavlju predstavljena metoda određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri analiziranjem male petlje histereze, dok su u šestom prikazane procjene propagacije mjernih nesigurnosti korištenjem te metode.

### 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog rada je opisati i definirati remanentni tok magnetske jezgre, mjernu nesigurnost te adaptivnu Monte Carlo metodu. Također, potrebno je definirati metodu određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri analiziranjem male petlje histereze te adaptivnom Monte Carlo metodom procijeniti propagaciju mjernih nesigurnosti izmjerenih veličina koristeći programski alat MATLAB.

## 2. PREGLED PODRUČJA RADA

Tema je završnog rada procijeniti propagaciju mjerne nesigurnosti mjerenih veličina pomoću Monte Carlo metode prilikom određivanja remanentnog toka analizom male petlje histereze.

Autor u diplomskom radu [4] pri različitim mjernim nesigurnostima sekundarnog napona s pomoću Monte Carlo metode dolazi do izračuna mjerne nesigurnosti remanentnog toka.

Diplomskim je radom [5] opisana i praktično primijenjena tehnika za određivanje preostalog magnetskog polja koristeći izvor istosmjerne struje niske snage. Implementacija ove tehnike je ostvarena kroz postavljanje mjernog kruga, snimanja različitih valnih oblika sekundarnog napona i struje magnetiziranja te je njihova analiza izvršena uz korištenje programskog alata MATLAB.

U završnom je radu [6] autor dao definiciju remanentnog magnetskog toka, moguće metode određivanja remanentnog toka, te s pomoću istosmjernog izvora male snage izračunao mjernu nesigurnost mjerenih veličina.

Autor završnog [7] rada određuje parametre analiziranjem odziva na testni signal pomoću kojih se na efikasan i precizan način dolazi do remanentnog toka magnetske jezgre.

Autori priručnika [8] pružaju detaljan pregled različitih Monte Carlo tehnika i njihovu primjenu u različitim disciplinama. Uključuje razne simulacijske metode za generiranje slučajnih brojeva, numeričke integracije itd.

### 3. REMANENTNI MAGNETSKI TOK

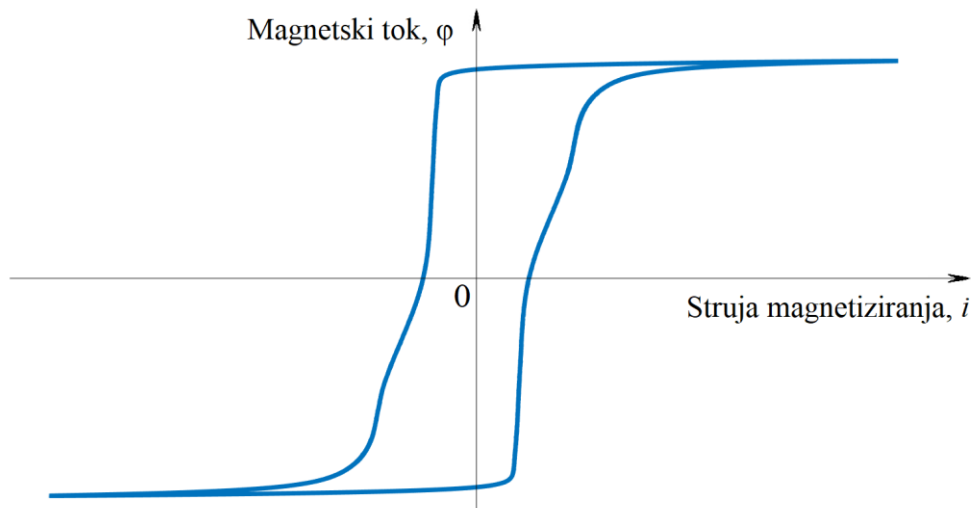
Magnetski se tok može definirati količinom magnetskih silnica koje prolaze kroz zatvorenu površinu. Oznaka za magnetski tok je grčko slovo  $\Phi$ , dok je jedinična mjera veber (Wb). Matematički se definira kao integral magnetske indukcije ( $B$ ) kroz određenu površinu ( $A$ ), a izračunava se prema izrazu:

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

Feromagnetski materijali imaju značajku koja se naziva remanencija, što znači da mogu zadržati određenu količinu magnetskog toka i nakon što se ukloni izvor magnetskog polja. Takva se karakteristika očituje u obliku remanentnog magnetskog toka, odnosno zaostalog magnetskog toka koji ostaje u feromagnetskom materijalu i nakon isključivanja napajanja. Ukupna količina remanentnog toka koji ostaje u jezgri ovisi o svojstvima materijala koji tvori jezgru. Ako vrijednost remanentnog toka u jezgri zavojnice ili transformatora nije poznata, to može dovesti do poteškoća u radu elektroenergetskog sustava [17].

Transformatori se često opisuju s pomoću magnetskih karakteristika koje se prikazuju u  $\varphi$ - $i$  ravnini. Takva ravnina predstavlja kako se magnetski tok ( $\varphi$ ) u željeznoj jezgri transformatora mijenja u ovisnosti o struji magnetiziranja ( $i$ ). U  $\varphi$ - $i$  ravnini se tvori zatvorena krivulja koja se naziva petlja histereze [1].

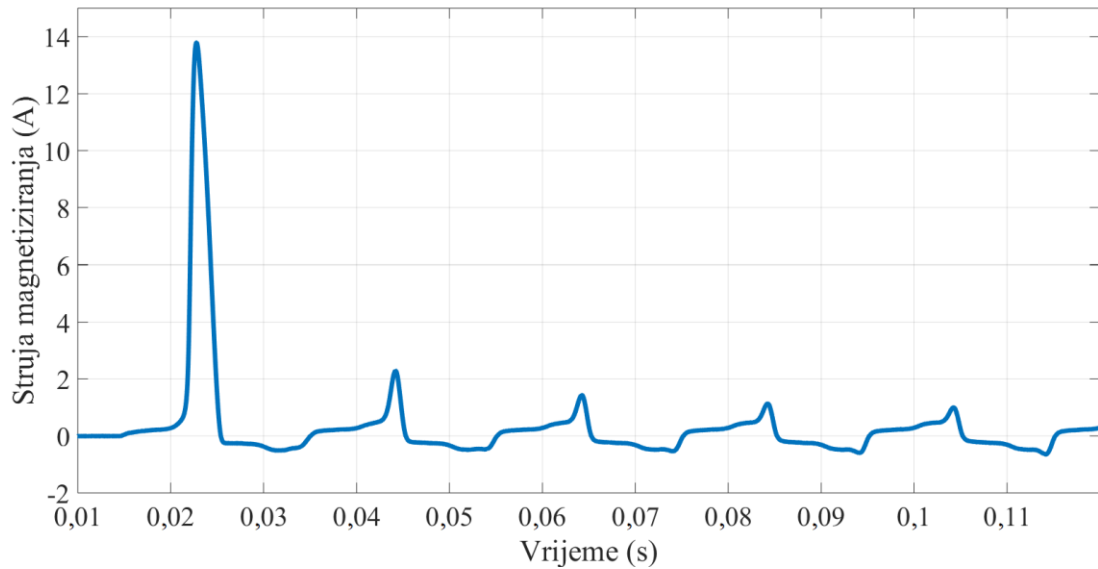




**Slika 2.1.** Karakteristika ovisnosti magnetskog toka o struji magnetiziranja [1].

Ukoliko se vršna vrijednost napona napajanja nastavlja povećavati, pri čemu je frekvencija na istoj vrijednosti, površina glavne (najveće) petlje histereze će ostati konstantna. Trenutne vrijednosti će odlaziti dublje u zasićenje, odnosno u područje zasićenja, koje predstavlja najveći magnetski tok koji jezgra može primiti [1].

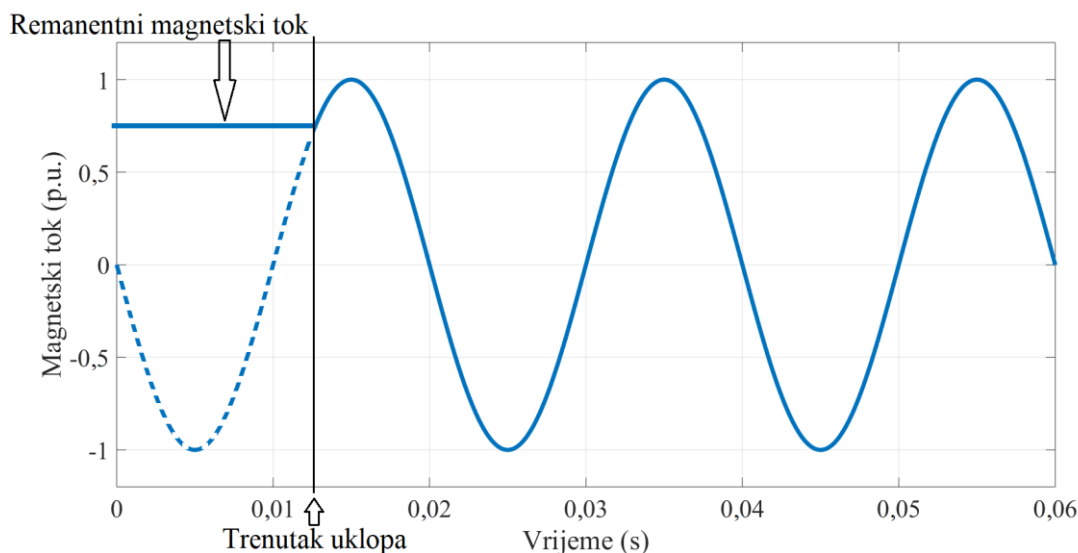
Mjerenje remanentnog magnetskog toka u jezgri je važno zato što se time mogu smanjiti udarne struje magnetiziranja prilikom uklopa transformatora. Udarne struja predstavlja struju koja poteče uređajem, a iznad je nazivne vrijednosti, prilikom priključenja na napon. Pojava udarne struje može imati negativne utjecaje u sustavu [1].



**Slika 2.2.** Udarna struja magnetiziranja [1].

Udarna struja magnetiziranja ima veliku vršnu vrijednost u prvoj periodu pri čemu dolazi i do asimetrije valnoga oblika. Različiti faktori utječu na udarnu struju, poput remanentnog toka u trenutku uklopa, faznog kuta napona napajanja i djelatnog otpora namota. Isto tako, i konstrukcija transformatora može imati utjecaj na udarnu struju [1].

Upravljivi ili kontrolirani uklop često predstavlja efikasno rješenje za smanjenje udarnih struja tijekom magnetiziranja. Idealan uklop podrazumijeva uključanje transformatora u trenutku kada je vrijednost remanentnog magnetskog toka u jezgri jednaka magnetskom toku kojega bi uzrokovao napon na koji se transformator priključuje. Fazni kut pri uključanju transformatora trebao bi biti približno jednak faznom kutu pri prethodnom isključenju transformatora. Optimalan trenutak za uključanje neopterećenog transformatora je onaj u kojem se potencijalni magnetski tok izjednačava s remanentnim tokom u jezgri [1].



**Slika 2.3.** Optimalan trenutak uklopa [1].

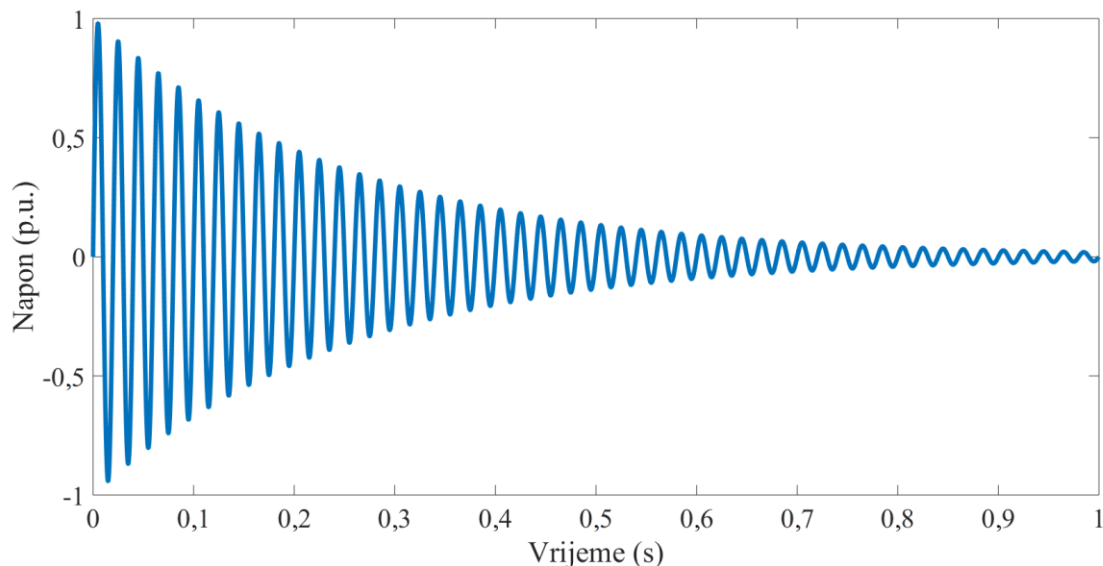
Važno je da transformator uklopi u optimalnom trenutku (faznom kutu), zato što se u protivnom može dogoditi da jezgra ode u područje zasićenja, pri čemu će doći do pojave udarne struje. Zbog toga je potrebno poznavati vrijednost remanentnog magnetskog toka [1].

### 3.2. Načini mjerenja remanentnog magnetskog toka

Nakon isključenja napajanja, magnetska jezgra zadržava određenu vrijednost remanentnog magnetskog toka koji može stvarati niz problema u radu elektroenergetskog sustava. Primjerice, remanentni magnetski tok kao početni uvjet stanja zavojnice ili transformatora ima značajnu ulogu u pojavi ferorezonancije, a koja može dovesti do havarija u elektroenergetskim postrojenjima. Važno je predvidjeti ferorezonanciju zato što ona često dovodi do kvarova opreme prilikom prenapona, što uzrokuje nepouzdanost u sustavu. Radi smanjenja udarne struje magnetiziranja i predviđanja pojave ferorezonancije, u praksi se najčešće koristi metoda integriranja napona jednog od namota pri isklupu transformatora. Takav način određivanja remanentnog toka svodi se na snimanje napona namota prilikom isklupa i na osnovu toga se integriranjem dolazi do magnetskog toka jezgre. Prednost takvog načina određivanja toka je jednostavnost i pristupačnost, zato što gotovo svaki transformator ima sustav nadzora koji može snimati napon. Glavni je nedostatak kod ovakvog određivanja

taj što se pretpostavlja da će remanentni magnetski tok ostati konstantan do narednog uklopa, a što u mnogim slučajevima nije točno [1].

Jedna od metoda određivanja remanentnog toka je demagnetiziranje, ali specifična jer se njome zapravo ne određuje vrijednost remanentnog toka, već se ista postavlja u nultu vrijednost. Demagnetiziranje se često u praksi koristi za smanjenje udarne struje. Uobičajeni način za demagnetiziranje transformatora je izmjenično demagnetiziranje, koje se provodi smanjivanjem napona promjenjivog izmjeničnog izvora napajanja dok je spojen na jedan od namota neopterećenog transformatora. Dakle, napon izvora se smanjuje polako i postupno kako bi se osiguralo da se remanentni magnetski tok u potpunosti neutralizira. Ovakav konvencionalni način demagnetiziranja zahtijeva promjenjivi izmjenični izvor napajanja s maksimalnim naponom koji je približno jednak nazivnom naponu transformatora. Međutim, kod visokonaponskih transformatora takav izvor napajanja može biti teško dostupan. Osim toga, postupak izmjeničnog demagnetiziranja obično traje predugo pri frekvenciji od 50 Hz za neke primjene, poput sprječavanja zasićenja jezgre strujnog transformatora kada se sustav nalazi u automatskom režimu ponovnog uključjenja. Tada se demagnetiziranje mora izvršiti u još kraćem vremenskom razdoblju kako bi se izbjeglo zasićenje jezgre transformatora. Zbog toga je pogodnije koristiti metode gdje se primjenjuju istosmjerni izvori [1].



**Slika 2.4.** Izmjenično demagnetiziranje [1].

Nadalje, moguće je odrediti vrijednost remanentnog magnetskog toka i analizirati ga putem valnog oblika struje magnetiziranja koji se pojavljuje prilikom uključivanja transformatora. Ova metoda uključuje priključivanje jednog namota transformatora na istosmjerni izvor napona niske razine te snimanje valnog oblika struje. Međutim, prije primjene ove metode, potrebno je testirati transformator i odrediti valni oblik struje magnetiziranja prilikom uključivanja za sve moguće vrijednosti remanentnog magnetskog toka, kao što je to slučaj i kod prethodno opisane metode. Postupak za određivanje vrijednosti remanentnog magnetskog toka se nastavlja priključivanjem transformatora na istosmjerni izvor, snimanjem valnog oblika struje magnetiziranja i usporedbom s prethodno dobivenim valnim oblicima. Vrijednost remanentnog magnetskog toka može se odrediti kada se podudaraju uspoređeni valni oblici struje magnetiziranja [1].

Međutim, nakon primjene ove metode, vrijednost remanentnog magnetskog toka u jezgri transformatora može postići svoju maksimalnu vrijednost. Remanentni magnetski tok koji se određuje putem ovog postupka nije trajan i neće biti zadržan nakon izvođenja mjerenja, što značajno ograničava praktičnu primjenu ove metode.

Remanentni se magnetski tok može odrediti i izmjeriti putem rasipnog magnetskog toka u blizini jezgre transformatora. Ovakav način uključuje procjenu vrijednosti remanentnog magnetskog toka na temelju izmjerenog rasipnog magnetskog toka netom prije uključivanja transformatora, koristeći senzore koji su trajno instalirani u blizini jezgre. Međutim, kako bi ova metoda bila primjenjiva, potrebno je prethodno odrediti funkciju ovisnosti rasipnog magnetskog toka o toku u jezgri transformatora [1].

Prednost ove metode je predviđanje vrijednosti remanentnog magnetskog toka u trenutku uključivanja transformatora, što je korisno za smanjenje rizika od udarne struje. Ipak, ova metoda zahtijeva kompleksnu tehničku implementaciju jer je potrebno instalirati senzore u neposrednoj blizini jezgre transformatora, što može biti izazovno zbog visoke temperature i agresivnog okoliša u kojem se transformator nalazi [1].

Zatim, postoji metoda koja se temelji na predmagnetiziranju. Predmagnetiziranje je proces kojim se remanentni magnetski tok namjerno postavlja na najvišu vrijednost kako bi se smanjila udarna struja magnetiziranja. Ova se tehnika primjenjuje s ciljem umanjivanja negativnih učinaka udarnih struja, koje se javljaju pri uključanju sustava. Nakon što se remanentni magnetski tok postavi na maksimalnu vrijednost, moguće je izračunati optimalan fazni kut uključanja. Međutim, prije primjene ove metode je potrebno prvo odrediti maksimalnu vrijednost remanentnog toka za određeni transformator putem analize glavne petlje histereze [1].

Postoji raznolikost metoda koje se koriste za procjenu veličine remanentnog magnetskog toka. Svaka od navedenih metoda sadrži pojedine prednosti, ali i ograničenja i stoga je očito da postoji potreba za razvijanjem metoda koje će moći adekvatno odgovoriti na što je više moguće izazova.

## 4. POGREŠKE MJERENJA I MJERNA NESIGURNOST

Kako bi se kvalitetno uspjela dati definicija mjerne nesigurnosti i pogreške mjerenja, potrebno je definirati samo mjerenje. Mjerenjem se smatra proces određivanja numeričke ili opisne vrijednosti neke karakteristike, svojstva ili fenomena objekta, s pomoću korištenja odgovarajućih metoda, tehnika i alata [9].

Tijekom više tisućljeća prije Krista, različite civilizacije, uključujući državne vlasti, su pokušavale uspostaviti jedinstven sustav mjernih jedinica za različita područja. Ovakve su jedinice obuhvaćale duljinu, obujam i masu, a u nekim su slučajevima korištene i standardne reference poput štapova određene duljine, posuda određenog volumena i utega određene mase. Takvi su sustavi često bili prihvaćani putem trgovine i komunikacije između različitih civilizacija.

Na osnovu odluka Generalne konferencije za utege i mjere, države donose zakone kojima propisuju mjerne jedinice koje će se koristiti na njihovom teritoriju. Ove mjerne jedinice temelje se na Međunarodnom sustavu jedinica (SI sustavu). U pravnom kontekstu, ove se jedinice nazivaju zakonitim mjernim jedinicama [2].

Izmjerena vrijednost predstavlja najvjerojatniju vrijednost ili najbolju procjenu mjerene veličine, a izražava se numeričkom vrijednošću i pripadajućom mjernom jedinicom. Izmjerena se vrijednost često koristi kao sinonim za mjerni rezultat u užem smislu, dok se mjerni rezultat u širem smislu odnosi na cjelovit rezultat mjerenja, koji se sastoji od izmjerene vrijednosti, mjerne nesigurnosti i odgovarajuće mjerne jedinice [11].

Mjerna je nesigurnost parametar povezan s rezultatom mjerenja koji opisuje raspršenost ili rasipanje vrijednosti koje bi se moglo pripisati mjerenoj veličini. Pojam „nesigurnost“ implicira sumnju, pa se „mjerna nesigurnost“ u najširem smislu odnosi na sumnju ili valjanost mjernog rezultata [9].

Napretkom tehnologije i razvitkom civilizacije, razvio se standard za mjerenje. No, unatoč preciznijoj opremi i kvalitetnijem izvođenju mjerenja i dalje postoje odstupanja između stvarne i izmjerene vrijednosti. Najčešći razlozi za pojavu odstupanja su nekalibrirani ili neprecizni instrumenti, nestručnost mjeritelja, itd.

Apsolutnom se pogreškom naziva razlika između izmjerene vrijednosti i stvarne vrijednosti (dogovorene stvarne vrijednosti), pri čemu je stvarna vrijednost izražena istom jedinicom kao i mjerena veličina. U slučaju pokaznih mjernih instrumenata, apsolutna se pogreška definira kao razlika vrijednosti koja je očitana na instrumentu i stvarne vrijednosti mjerene veličine. Kod mjernih uređaja koji prikazuju neku vrijednost fizikalne veličine, apsolutna pogreška definira se kao razlika između prikazane vrijednosti i stvarne vrijednosti mjerene veličine [2].

Prema uzrocima, postoje tri vrste pogreška mjerenja: slučajne, grube i sistematske. Grube pogreške proizlaze iz nepažnje prilikom provođenja ispitivanja, nedostatnog znanja ispitivača, nepravilnog odabira opreme, površnog promatranja te drugih sličnih čimbenika. Takve je pogreške nemoguće kvantitativno procijeniti ili izraziti matematički. Ove se pogreške mogu spriječiti putem temeljitog znanja i pažnje ispitivača, stručnog odabira opreme, upotrebom nazivnih raspona i poznavanjem približnih vrijednosti [12].

Sistematske pogreške mogu biti rezultat grešaka u mjeriteljskim metodama i opremi te grešaka uzrokovanih osobnim ili vanjskim čimbenicima. Primjeri pogrešaka u mjeriteljskim metodama i opremi uključuju nepravilne postupke mjerenja, neispravnu opremu ili utjecaj drugih elemenata u krugu mjerenja. U takvim slučajevima, važno je utvrditi jesu li pogreške stalne ili proporcionalne. Kako bi se izbjegle takve pogreške, potrebno je pažljivo odabrati postupak mjerenja, koristiti više metoda mjerenja, primijeniti korekcije na rezultate i osigurati upotrebu odgovarajuće opreme. Pogreške koje proizlaze iz osobnih i vanjskih utjecaja mogu biti uzrokovane promjenama temperature, vlažnosti i drugim čimbenicima. Stoga je važno pratiti vrijednosti tih utjecajnih veličina i procijeniti njihov utjecaj na rezultate mjerenja. Stručnost ispitivača igra ključnu ulogu u identificiranju i procjeni tih utjecajnih veličina kako bi se pogreške mogle izbjeći [12].



Slučajne pogreške nastaju zbog nepredvidivih promjena koje se događaju u mjernoj opremi, mjeritelju ili objektu koji se mjeri. Kako bi se procijenile te pogreške, može se provesti više mjerenja i koristiti statističku analizu za objašnjenje odstupanja. Ponavljanje mjerenja i izračunavanje srednje aritmetičke vrijednosti mogu pomoći u smanjenju tih pogrešaka [12].

Srednja aritmetička vrijednost (aritmetička sredina) može se izračunati prema izrazu [2]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n y_i \quad (3-1)$$

Pri tome se može vidjeti da se aritmetička sredina neke fizikalne veličine označava crticom iznad simbola pripadajuće veličine [2].

Kada se provode ponavljajuća mjerenja, pojedinačni rezultati će pokazivati manje razlike među ponavljanjima ako je mjerni postupak precizniji. Kako bi se numerički procijenila preciznost mjernog postupka, koriste se eksperimentalno standardno odstupanje [2]:

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

Uobičajeno se nazivnik  $(n-1)$  naziva stupnjevim slobode. Ovdje,  $n$  predstavlja broj ponovljenih mjerenja iz skupa mogućih mjerenja  $N$  koja bi se mogli obaviti. Kada je standardno odstupanje manje, to ukazuje na veću preciznost mjernog postupka. Smanjenje standardnog odstupanja sugerira da su pojedinačni rezultati mjerenja međusobno sličniji, što ukazuje na veću konzistentnost i preciznost mjernih rezultata [2].

Slučajne pogreške uzrokuju varijaciju ili rasipanje rezultata mjerenja, što mjerenje čini nesigurnim. Postoje dvije vrste mjerne nesigurnosti koje se koriste za kvantitativno opisivanje te nesigurnosti – standardna i proširena nesigurnost. Standardna mjerna nesigurnost označava se s  $u$  i predstavlja kvantitativnu mjeru nesigurnosti vezane uz mjerni rezultat.

Način prikazivanja mjernog rezultata zajedno sa standardnom mjernom nesigurnošću [11]:

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

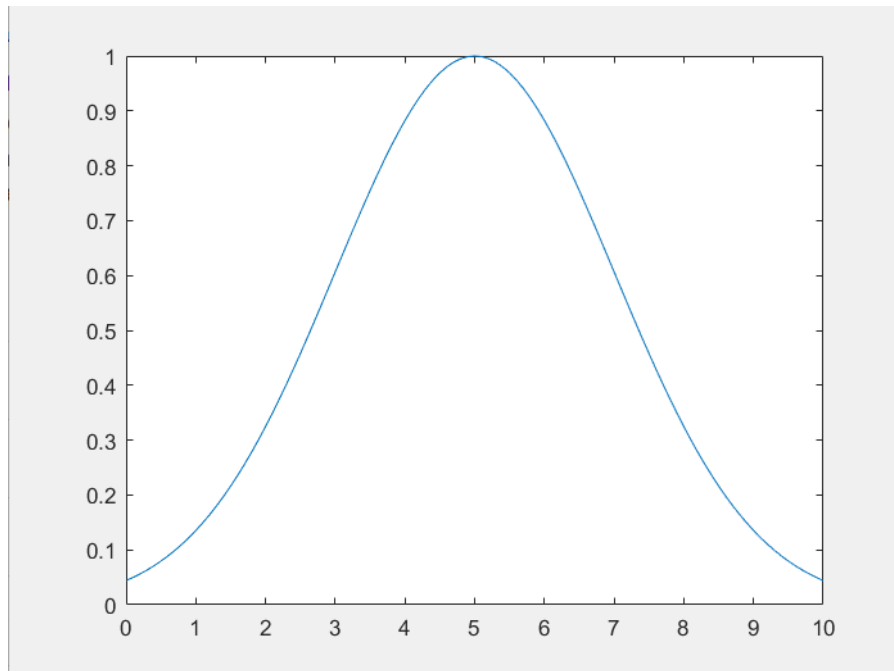
Proširena mjerna nesigurnost označava se slovom  $U$  i računa [11]:

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

Postoji mogućnost podjele mjernih nesigurnosti u dvije različite kategorije: mjerna nesigurnost A-tipa i mjerna nesigurnost B-tipa.

Nesigurnost tipa A određuje se analizom rezultata ponovljenih mjerenja pomoću statističkih metoda. Izračunava se aritmetička sredina zajedno sa standardnim odstupanjem. Mjerenja ovoga tipa nesigurnosti slijede Gaussovu (normalnu) razdiobu.

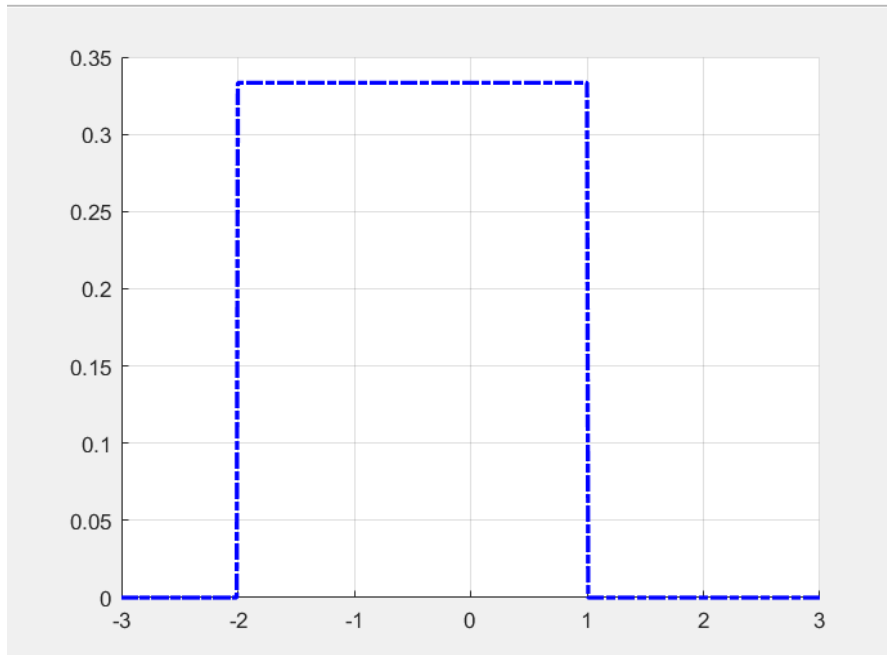
$$u_a = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3-5)$$



**Slika 3.1.** Prikaz Gaussove (normalne) razdiobe u MATLAB-u.

Mjerna nesigurnost B-tipa ne ovisi o broju mjerenja, nego se izračunava na temelju različitih faktora koji mogu utjecati na mjerenje, pri čemu nisu povezani s ponovljivošću mjerenja. Računa se prema izrazu:

$$u_B = s = \frac{G}{\sqrt{3}} \quad (3-6)$$



**Slika 3.2.** Prikaz pravokutne razdiobe u MATLAB-u.

$G$  u formuli predstavlja granicu pogreške, što označava vrijednost koja osigurava da se granična odstupanja neće premašiti ako se instrumenti upotrebljavaju prema uputama. Odnosno, pretpostavlja se da su sve vrijednosti pogrešaka unutar intervala granice pogreške.

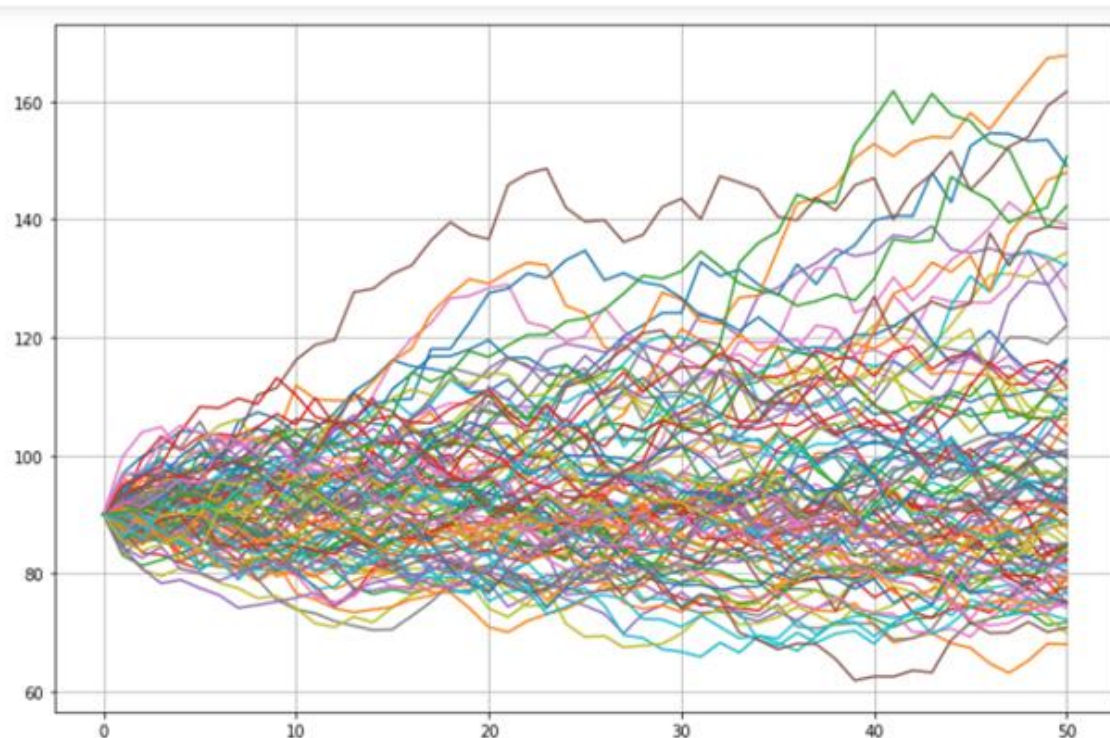
## 5. MONTE CARLO METODA

Monte Carlo metoda je sve popularnija za rješavanje numeričkih problema u različitim područjima kao što su inženjerstvo, znanost, financije, itd. Ova se metoda temelji na izvođenju slučajnih eksperimenata na računalu. Međutim, brzim razvojem novih ideja i koncepata, primjena ove metode postaje izazovna [8].

Monte Carlo simulacija predstavlja proces generiranja slučajnih objekata ili događaja putem računalnog modeliranja. Takvi objekti mogu biti prirodno stvarni ili umjetni, a cilj im je rješavanje determinističkih problema [8].

Osnovni principi ove metode datiraju iz 18. stoljeća. Početak razvoja tih osnovnih principa mogu se pripisati grofu Buffonu. Razvio je poznatu „Buffonovu iglu“ koja je ujedno i postala temelj za Monte Carlo metodu. Taj se eksperiment temelji na bacanju igle na papir s linijama, te određivanje same vjerojatnosti da će igla presjeći neku od linija na papiru. Nadalje, tijekom 1950. Monte Carlo simulacije su imale značajnu ulogu u razvoju vodikove bombe. Pokazale su se izuzetno korisne, zato što su omogućile znanstvenicima istraživanje kompleksnih sustava i problema, čije je istraživanje kroz eksperimente teško dostupno [14].

Monte Carlo metoda ne generira pojedinu vrijednost rezultata, nego generira niz mogućih rezultata. Zbog toga je ova metoda jednostavna za analizu rizika modela, pri čemu model zamjenjuje različite moguće rezultate. Ova se simulacija ponavlja više puta, pri čemu se svaki put izračunavaju različite slučajne vrijednosti. Izvođenje potpune simulacije zahtijeva tisuće ponovnih izračuna prema nesigurnosti modela [15].



**4.1. Slika** Cijene dionica u 50 dana [15].

Na slici se može vidjeti više od 200 mogućih ishoda Monte Carlo metode za cijenu dionica u razdoblju od 50 dana. Ovdje Monte Carlo metoda omogućuje kreiranje stohastičkih procesa koji utječu na cijene dionica, primjerice promjene na tržišnom segmentu. Generira se više od 200 ishoda, pri čemu rezultati ovise o kvaliteti i valjanosti korištenog modela i ulaznih podataka. Zato je važno što kvalitetnije obaviti modeliranje i interpretirati rezultate s oprezom.

Adaptivna Monte Carlo metoda varijacija je klasične Monte Carlo metode. Prilagođava se specifičnosti problema čime se povećava efikasnost simulacije. Kod adaptivne se metode prilagođava broj uzoraka i distribucija uzoraka tijekom simulacije. Na taj se način selektivno generiraju uzorci na temelju njihovog utjecaja na konačan rezultat.

Ključni koraci u primjeni Monte Carlo metode [16]:

1. Formulirati matematički model. Definirati jednadžbu koja opisuje vezu između izlaznih i ulaznih varijabli.
2. Utvrditi vrijednost ulaznih varijabli.
3. Generirati uzorak podatka.
4. Konfigurirati softver za Monte Carlo simulaciju.
5. Izvršiti analizu rezultata.

## **6. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA U MAGNETSKOJ JEZGRI ANALIZIRANJEM MALE PETLJE HISTEREZE**

Ovom se metodom može precizno odrediti remanentni magnetski tok na kraju razdoblja kada transformator nije spojen na izvor napajanja. Također je moguće odrediti remanentni tok, ali pod uvjetom da njegova vrijednost ostane nepromijenjena nakon provedbe mjerenja. Ovo istodobno predstavlja temeljnu karakteristiku ove metode koja primjenu nalazi i u smanjenju udarnih struja tijekom magnetiziranja prilikom kontroliranog uklopa [1].

Unatoč postojanju alternativnih metoda za određivanje remanentnog toka bez prethodnih podataka, metoda korištena u ovom radu ističe se jednostavnom primjenom i preciznošću [1].

Ipak, važno je za naglasiti da ova metoda zahtijeva testiranje transformatora prije nego se može primijeniti te je potrebno uspostaviti vezu između remanentnog toka u jezgri i parametra  $W_Q$  [10].

Osnovna je zamisao ove metode da se nakon primjene testnog signala remanentni tok odredi analizirajući napon na sekundaru i struje na primaru transformatora. Kada se testni signal narine na neopterećeni primar transformatora, tada napon sekundara i struja primara imaju različite valne oblike, ovisno o vrijednosti remanentnog toka [1].

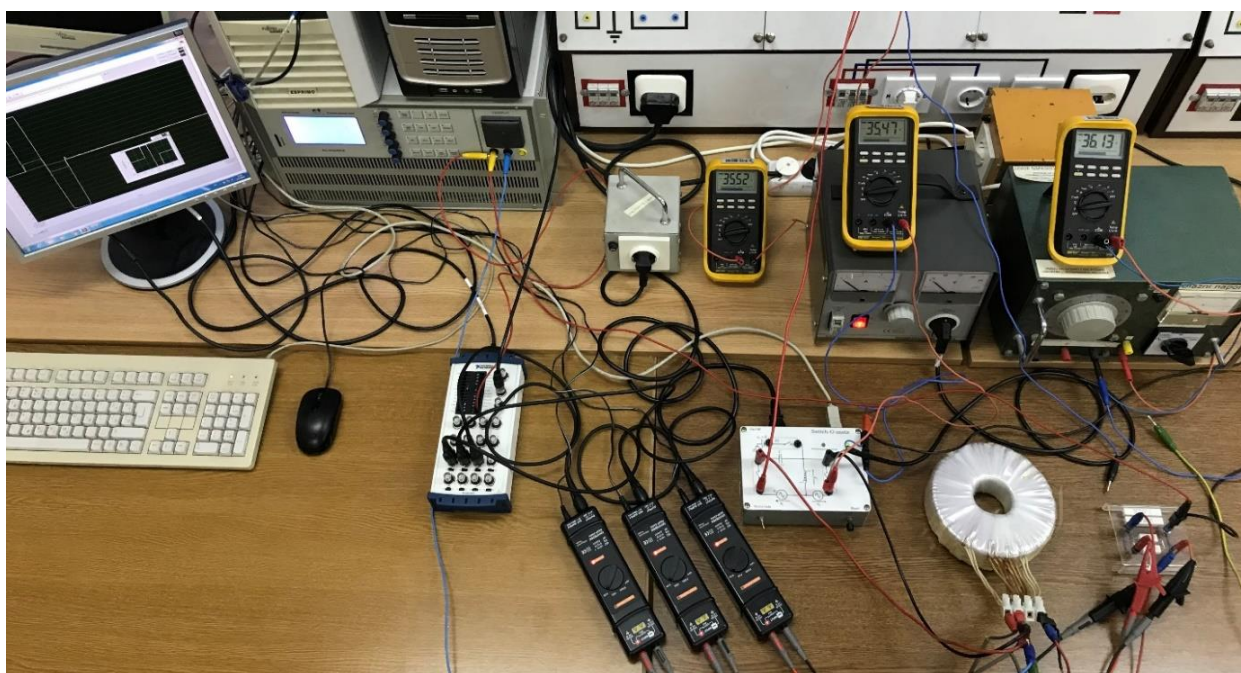
Za testni se signal odabire čisti izmjenični signal, zbog toga što se na taj način osigurava da tok bude nepromijenjen. Odnosno, može se zaključiti da vrijednost magnetskog toka ostaje očuvana [10].

Pri korištenju napona primara kao testnog signala, važno je da promjena napona ne uzrokuje značajne promjene u iznosu magnetskog toka jezgre prilikom mjerenja. Vrijednost magnetskog toka u jezgri će biti jednaka [10]:



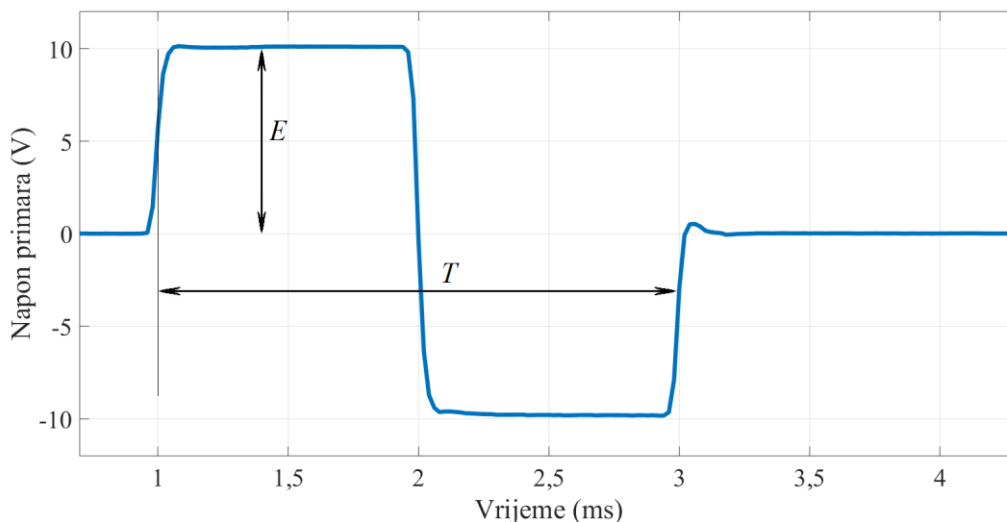
$$\varphi(T) = \varphi(0) - \frac{R}{N} \int_0^T i dt \quad (5-1)$$

Iz prethodno napisanog izraza može se zaključiti da u jezgri neće doći do promjene u iznosu magnetskog toka samo ukoliko je istosmjerna komponenta testnog signala jednaka nuli.



**Slika 5.1.** Prikaz laboratorijske postave za mjerenje magnetskog toka [1].

U ovom će se istraživanju za testni signal koristiti jedna perioda izmjeničnog napona s pravokutnim valnim oblikom, što uključuje funkcije skoka s pozitivnim i negativnim vrijednostima. Prilikom izvođenja mjernog postupka, mehanička sklopka povezuje transformator s izvorom te su sklopke  $S_1$  i  $S_2$  isključene.



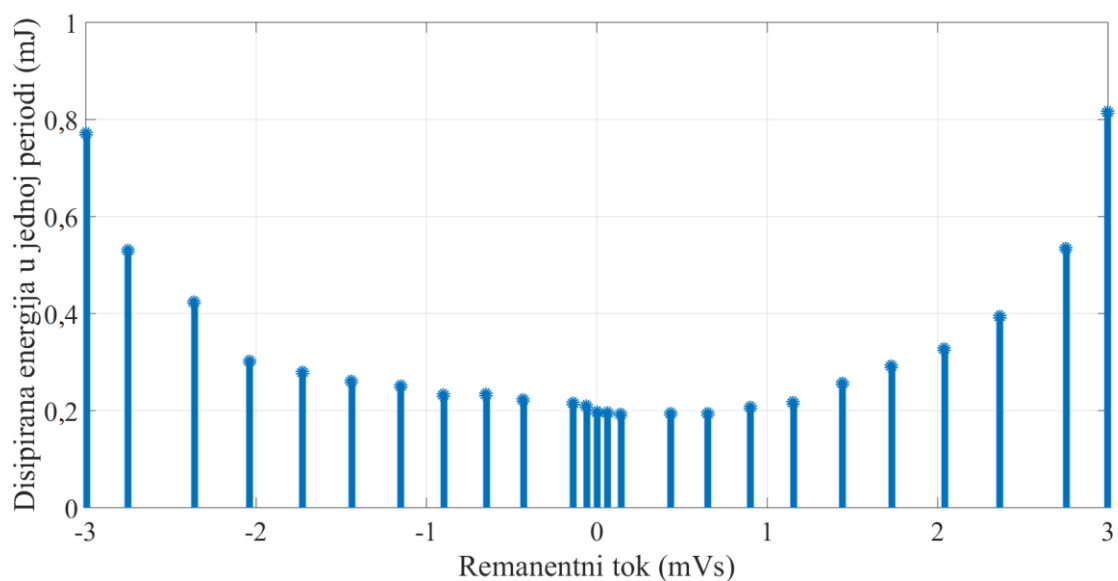
**Slika 5.2.** Prikaz naponskog testnog signala narinutog na primar [1].

Može se primijetiti da signal na slici 5.2. ima određena odstupanja u odnosu na idealnu funkciju skoka, što je rezultat prisutnosti parazitnih elemenata. No, to neće imati utjecaj na rezultate mjerenja. Parametar  $E$  predstavlja vršnu vrijednost testnog signala, dok parametar  $T$  predstavlja trajanje jedne periode.

U ovom se radu za parametre  $E$  i  $T$  koriste vrijednosti 10 V i 2 ms. Mjerenje će se provesti za 25 različitih efektivnih vrijednosti napona, pri čemu će ukupno biti 25 mjerenja.

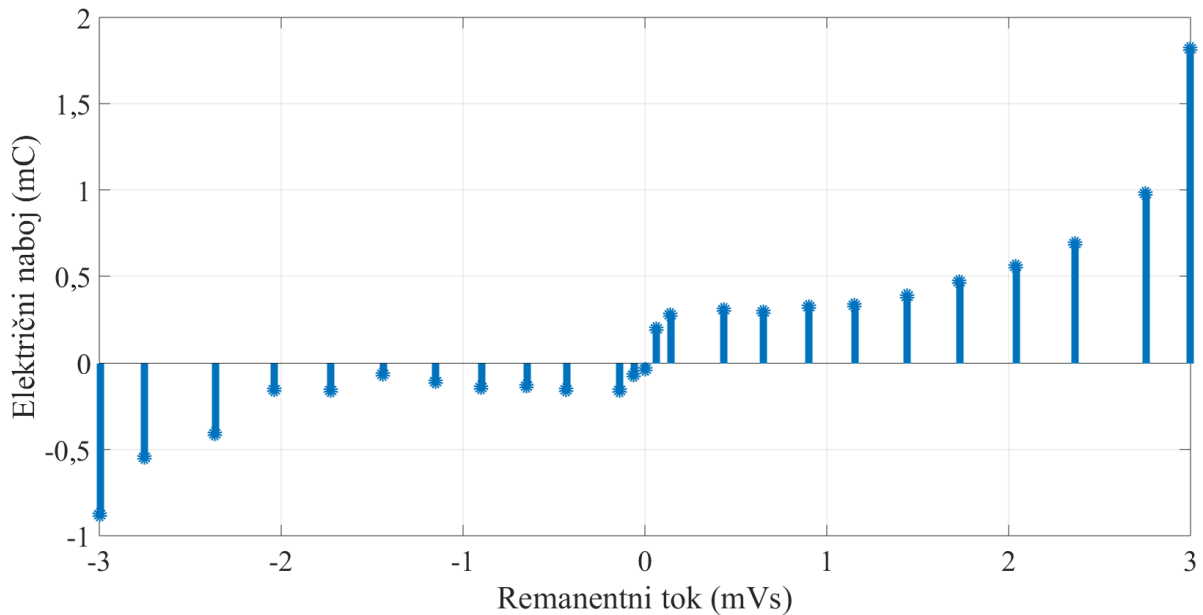
Potrebno je uspostaviti vezu između remanentnog toka i parametra izvedenog iz dobivenih valnih oblika. Prvi parametar predstavlja disipiranu energiju, odnosno pretvorenu električnu energiju u toplinsku tijekom jedne periode. Ta je energija dana izrazom [1]:

$$W = \int_0^T \frac{N_1}{N_2} u_S(t) i(t) dt = N_1 \int_{\varphi(0)}^{\varphi(T)} i(\varphi) d\varphi. \quad (5-2)$$



**Slika 5.3.** Prikaz disipirane energije jedne periode [1].

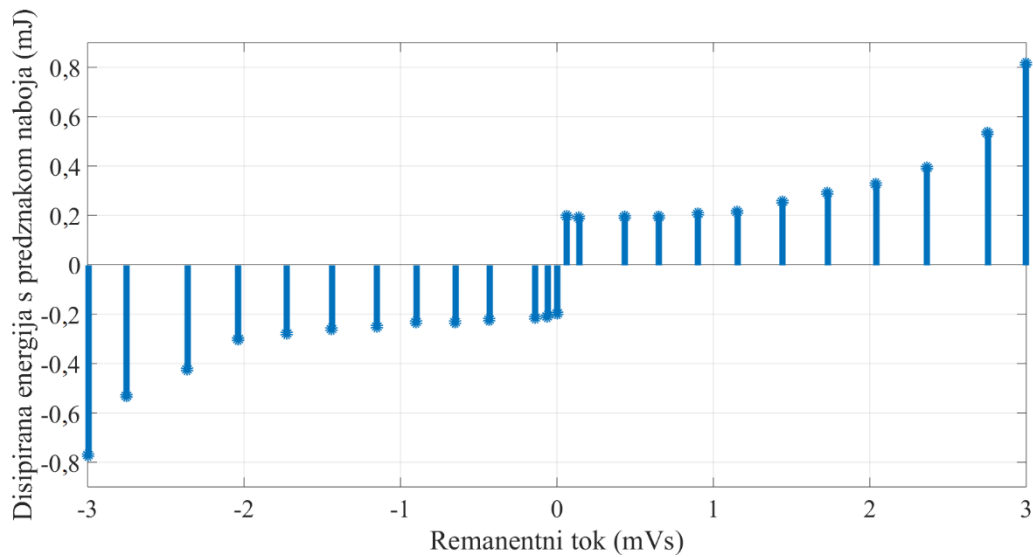
Promjena remanentnog toka u jezgri dovodi do promjene površine male petlje histereze, što je i prikazano na slici 5.3. Slika prikazuje disipiranu energiju ( $W$ ) jedne periode, te se može uočiti da tada remanentni tok može poprimiti pozitivne i negativne vrijednosti. Zbog toga će se koristiti dodatni parametar za definiranje predznaka toka [1].



**Slika 5.4.** Ovisnost električnog naboja o remanentnom magnetskom toku [1].

Parametar koji definira predznak je električni naboj ( $Q$ ). Električni se naboj mijenja ovisno o remanentnom toku jezgre i predstavlja površinu ispod grafa struje magnetiziranja, a računa se kao integral te struje.

Kako bi se mogao izračunati naboj, potrebno je pronaći optimalan trenutak  $t_1$ . Temeljni je zahtjev prilikom odabira  $t_1$  da za početne vrijednosti negativnog toka, naboj ( $Q$ ) ima negativnu vrijednost, dok za pozitivan tok naboj ( $Q$ ) ima pozitivnu vrijednost. Za optimalan izbor trenutka  $t_1$  važno je da je funkcija koja opisuje ovisnost naboja o remanentnom toku simetrična u odnosu na ishodište. Nadalje, trenutak  $t_1 = 2T$  za zadane parametre  $E = 10$  V te  $T = 2$  ms, zadovoljava osnovni zahtjev, ali nije najbolji izbor. Za određene je vrijednosti remanentnog toka vrijednost naboja blizu nule. Ukoliko se snimanje prekine nešto prije trenutka  $t_1$ , moguće je da za negativnu vrijednost toka naboj poprimi pozitivnu vrijednost [1].



## 5.2. Prikaz ovisnosti disipirane energije o magnetskom toku [1].

Gornja slika prikazuje parametar  $W_Q$  i njegovu ovisnost o remanentnom toku. Taj je parametar važan zato što se s pomoću njega može odrediti vrijednost toka te odgovarajući predznak. Razlog tomu je što parametar  $W_Q$  objedinjuje prethodno navedene parametre. Pri većim iznosima remanentnog toka, postoji relativno dobra razlučivost, što se može očitovati u primjeni pri smanjenju udarne struje magnetiziranja. Ipak, glavni je nedostatak ovakve metode loša razlučivost kod nižih vrijednosti remanentnog toka [1].

## 7. PROCJENA PROPAGACIJE MJERNIH NESIGURNOSTI KORIŠTENJEM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE

Za procjenu propagacije mjerne nesigurnosti će se koristiti ulazne veličine čije su vrijednosti prethodno izmjerene. Ukupno je obavljeno 25 mjerenja. Za sva će se mjerenja koristiti napon na sekundaru i struja na primaru relativnih mjernih nesigurnosti od 2 %, 4 % i 6 %, odnosno bit će izvršeno ukupno 75 simulacija s pomoću programskog alata MATLAB. Svi MATLAB kodovi za potrebne simulacije nalaze se u priložima. U ovoj se metodi kao izlazna veličina koristi parametar  $W_Q$ . Remanentni će se tok očitati iz funkcije koja je ovisna o parametru  $W_Q$ . Sve potrebne simulacije će biti odrađene u programskom alatu MATLAB.

Rezultati relativne mjerne nesigurnosti izmjerenog napona na sekundarnu te struje na primaru od 2 % izneseni su u tablicama 6.1 i 6.2.

**Tablica 6.1.** Prikaz srednje vrijednosti parametra  $W_Q$  i broj sljedova  $H$  za nesigurnost od 2 %.

	Srednja vrijednost parametra $W_Q$ ( $\mu\text{J}$ )	Broj sljedova, $H$
$U_2$ (V)	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$
36 (+)	2718,1	18
33 (+)	1743,7	9
30 (+)	1329,5	8
27 (+)	1165,5	309
24 (+)	1034,0	230
21 (+)	913,2	207
18 (+)	806,4	124
15 (+)	778,4	118
12 (+)	712,0	88
9 (+)	719,1	98
6 (+)	712,8	106
3 (+)	716,5	83

0	-712,2	81
3 (-)	-718,6	69
6 (-)	-730,1	67
9 (-)	-742,6	75
12 (-)	-739,3	49
15 (-)	-759,9	77
18 (-)	-794,8	60
21 (-)	-850,3	97
24 (-)	-928,3	100
27 (-)	-1047,9	121
30 (-)	-1209,6	142
33 (-)	-1501,7	240
36 (-)	-2038,0	460

Iz tablice 6.1. uočljivo je da je broj sljedova ( $H$ ) Monte Carlo simulacijom promjenjiv, odnosno varira u značajnom rasponu. Primjerice, za vrijednost  $U_2 = 30 (+)$  V,  $H$  iznosi 8, dok za  $U_2 = 36 (-)$  V iznosi 460. Ukupni broj sljedova za odabrane parametre iznosi 3.036, dok je prosječan broj sljedova istih parametara 121,44.

**Tablica 6.2.** Prikaz mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti parametra  $W_Q$  za nesigurnost od 2 %.

	Mjerna nesigurnost parametra $W_Q$ , $u_{W_Q}$ ( $\mu$ J)	Relativna mjerna nesigurnost parametra $W_Q$ , $u_{W_Q}\%$
$U_2$ (V)	$E = 10$ V, $T = 2$ ms	$E = 10$ V, $T = 2$ ms
36 (+)	18,837	0,693 %
33 (+)	9,919	0,569 %
30 (+)	6,755	0,508 %
27 (+)	5,563	0,477 %
24 (+)	4,849	0,469 %
21 (+)	4,165	0,456 %

18 (+)	3,550	0,440 %
15 (+)	3,368	0,433 %
12 (+)	2,966	0,417 %
9 (+)	3,066	0,426 %
6 (+)	3,042	0,427 %
3 (+)	2,918	0,407 %
0	2,596	0,364 %
3 (-)	2,486	0,346 %
6 (-)	2,442	0,335 %
9 (-)	2,458	0,331 %
12 (-)	2,432	0,329 %
15 (-)	2,456	0,323 %
18 (-)	2,818	0,355 %
21 (-)	3,036	0,357 %
24 (-)	3,253	0,350 %
27 (-)	3,586	0,342 %
30 (-)	3,858	0,319 %
33 (-)	4,813	0,320 %
36 (-)	6,599	0,324 %

Za zadane se parametre mjerna nesigurnost u prethodno prikazanoj tablici 6.2. povećava, kako se povećava i apsolutna vrijednost parametra  $W_Q$ . Za ulazne veličine napona sekundara i struje primara pridana je Gaussova (normalna) razdioba. Distribucije parametra  $W_Q$  imaju oblik Gaussove razdiobe, pri čemu se mogu primijetiti veća odstupanja u mjerenjima s manjim brojem sljedova  $H$ , dok su manja odstupanja u mjerenjima gdje imamo veći broj sljedova.

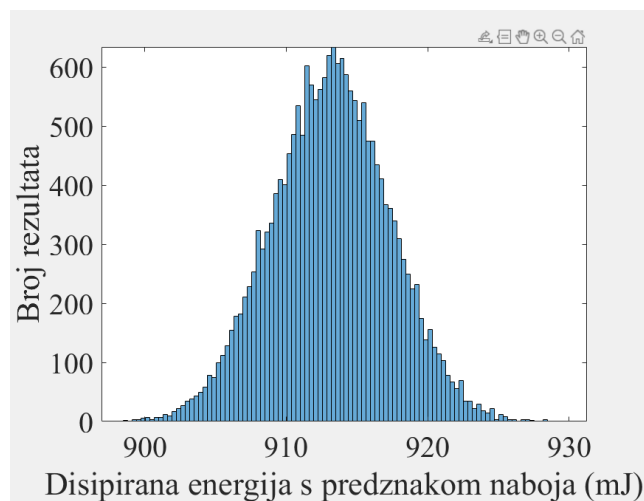
Kako bi se utvrdilo na koji se način mijenja trend širenja nesigurnosti u mjerenju kada se povećava nesigurnost napona na sekundaru i struje na primaru, određene su srednje vrijednosti nesigurnosti u mjerenju za parametar  $W_Q(u_{SR})$  :



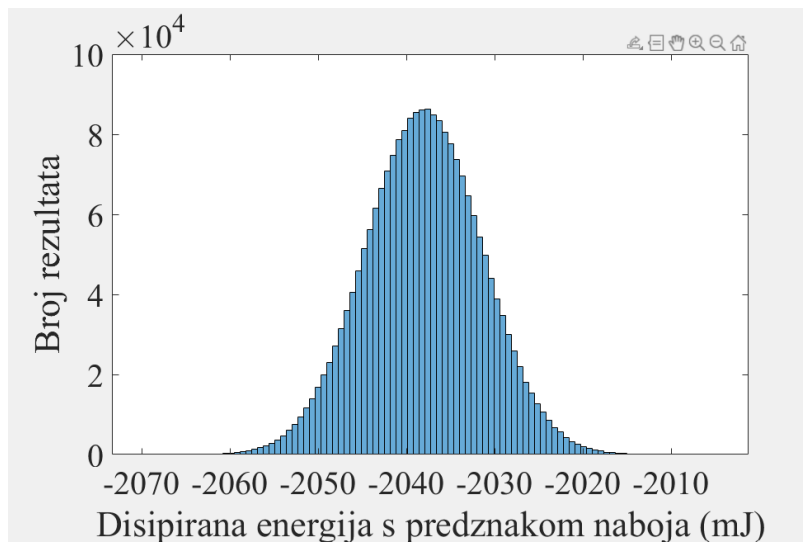
$$u_{SR} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} u_{WQ_i}, \quad (6-1)$$

također su određene srednje vrijednosti relativne mjerne nesigurnosti parametra  $W_Q$  ( $u_{\%S}$ ):

$$u_{\%SR} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} u_{WQ\%i} \quad (6-2)$$



**Slika 6.1.** Prikaz razdiobe parametra  $W_Q$  za nesigurnost od 2 % pri naponu sekundara  $U_2 = 21 \text{ V (+)}$ .



**Slika 6.2.** Prikaz razdiobe parametra  $W_Q$  za nesigurnost od 2 % pri naponu sekundara  $U_2 = 36$  (-) V.

Na slici 6.1. može se primijetiti kako razdioba rezultata parametra  $W_Q$  za određene parametre ( $E = 10$  V,  $T = 2$  ms i  $U_2 = 21$  (+) V) ima oblik normalne distribucije, no s većim varijacijama u usporedbi s razdiobom za drugi skup parametara ( $E = 10$  V,  $T = 2$  ms i  $U_2 = 36$  (-) V) prikazanom na slici 6.2. Za drugi je slučaj provedeno više sljedova, nego za prvi, zbog čega dolazi do situacije gdje se za veći broj sljedova distribucija rezultata primiće normalnoj razdiobi.

Tablice 6.3. i 6.4. sadrže rezultate simulacije Monte Carlo za relativnu nesigurnost izmjerenog napona na sekundaru i struje na primaru, koja iznosi 4 %.

**Tablica 6.3.** Prikaz srednje vrijednosti parametra  $W_Q$  i broj sljedova  $H$  za nesigurnost od 4%.

	Srednja vrijednost parametra $W_Q$ ( $\mu\text{J}$ )	Broj sljedova, $H$
$U_2$ (V)	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$
36 (+)	2718,098	69
33 (+)	1743,666	18
30 (+)	1329,436	11
27 (+)	1165,617	4
24 (+)	1033,96	387
21 (+)	913,181	331
18 (+)	806,375	203
15 (+)	778,397	198
12 (+)	711,976	127
9 (+)	719,115	191
6 (+)	712,831	147
3 (+)	716,477	164
0	-712,224	117
3 (-)	-718,602	123
6 (-)	-730,093	104
9 (-)	-742,591	115
12 (-)	-739,351	111
15 (-)	-759,918	80
18 (-)	-794,844	126
21 (-)	-850,267	144
24 (-)	-928,255	174
27 (-)	-1047,86	228
30 (-)	-1209,64	303
33 (-)	-1501,69	395
36 (-)	-2038,03	11

Primjetno je da se broj sljedova ( $H$ ) mijenja provedbom Monte Carlo simulacije, odnosno varira unutar značajnog raspona. Primjerice, za vrijednost napona sekundara  $U_2 = 27 (+)$  V, broj sljedova ( $H$ ) iznosi 4, dok za  $U_2 = 33 (-)$  V iznosi 395. Ukupni broj sljedova iznosi 3.881, dok je prosječan broj sljedova 158,83.

**Tablica 6.4.** Prikaz mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti parametra  $W_Q$  za nesigurnost od 4%.

	Mjerna nesigurnost parametra $W_Q$ , $u_{W_Q}$ ( $\mu\text{J}$ )	Relativna mjerna nesigurnost parametra $W_Q$ , $u_{W_Q}\%$
$U_2$ (V)	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$
36 (+)	37,647	1,385 %
33 (+)	19,780	1,134 %
30 (+)	13,559	1,02 %
27 (+)	11,063	0,949 %
24 (+)	9,710	0,939 %
21 (+)	8,343	0,914 %
18 (+)	7,110	0,882 %
15 (+)	6,746	0,867 %
12 (+)	5,934	0,833 %
9 (+)	6,143	0,854 %
6 (+)	6,093	0,855 %
3 (+)	5,838	0,815 %
0	5,195	0,729 %
3 (-)	4,972	0,692 %
6 (-)	4,886	0,669 %
9 (-)	4,915	0,662 %
12 (-)	4,870	0,659 %
15 (-)	4,919	0,647 %
18 (-)	5,639	0,709 %
21 (-)	6,064	0,713 %

24 (-)	6,523	0,703 %
27 (-)	7,183	0,689 %
30 (-)	7,718	0,638 %
33 (-)	9,627	0,641 %
36 (-)	13,177	0,647 %

U tablici 6.4. se mjerne nesigurnosti rastu zajedno s porastom apsolutne vrijednosti parametra  $W_Q$ . Analogno slučaju za 2 %, ulazne veličine napona na sekundaru i struje na primaru su distribuirane prema standardiziranoj normalnoj razdiobi. Distribucije parametra  $W_Q$  također slijede oblik Gaussove razdiobe, pri čemu su veća odstupanja u mjerenjima sa manjim brojem iteracija Monte Carlo simulacije, dok su manja u mjerenjima s većim brojem iteracija.

Tablice 6.5. i 6.6. sadrže rezultate simulacije Monte Carlo za relativnu nesigurnost izmjenog napona na sekundaru i struje na primaru, koja iznosi 6 %.

**Tablica 6.5.** Prikaz srednje vrijednosti parametra  $W_Q$  i broj sljedova  $H$  za nesigurnost od 6%.

	Srednja vrijednost parametra $W_Q$ ( $\mu\text{J}$ )	Broj sljedova, $H$
$U_2$ (V)	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$
36 (+)	2718,024	147
33 (+)	1743,594	46
30 (+)	1329,501	25
27 (+)	1165,525	12
24 (+)	1033,892	5
21 (+)	913,266	2
18 (+)	806,336	8
15 (+)	778,497	7

12 (+)	711,978	386
9 (+)	719,096	383
6 (+)	712,827	395
3 (+)	716,480	345
0	-712,229	287
3 (-)	-718,604	253
6 (-)	-730,084	234
9 (-)	-742,584	231
12 (-)	-739,352	231
15 (-)	-759,918	308
18 (-)	-794,847	279
21 (-)	-850,277	389
24 (-)	-928,257	456
27 (-)	-1047,81	2
30 (-)	-1209,64	12
33 (-)	-1501,69	21
36 (-)	-2037,92	20

Kao i u prethodnim tablicama 6.1. i 6.3., broj sljedova  $H$  varira značajnim rasponom i za mjernu nesigurnost 6 %. Primjerice, za vrijednosti sekundarnih napona  $U_2 = 21 (+)$  V i  $U_2 = 27 (-)$  V, broj sljedova iznosi 2, dok za  $U_2 = 24 (-)$ ,  $H$  iznosi 456. Ukupan broj sljedova  $H$  prikazanih tablicom 6.5. iznosi 4.484, dok prosječan broj sljedova iznosi 179,36.

**Tablica 6.6.** Prikaz mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti parametra  $W_Q$  za nesigurnost od 6 %.

	Mjerna nesigurnost parametra $W_Q$ , $u_{W_Q}$ ( $\mu\text{J}$ )	Relativna mjerna nesigurnost parametra $W_Q$ , $u_{W_Q}\%$
$U_2$ (V)	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$
36 (+)	56,540	2,080 %
33 (+)	29,699	1,703 %
30 (+)	20,328	1,529 %
27 (+)	16,640	1,428 %
24 (+)	14,521	1,404 %
21 (+)	12,593	1,379 %
18 (+)	10,693	1,326 %
15 (+)	10,126	1,301 %
12 (+)	8,915	1,252 %
9 (+)	9,225	1,283 %
6 (+)	9,145	1,283 %
3 (+)	8,771	1,224 %
0	7,797	1,095 %
3 (-)	7,462	1,038 %
6 (-)	7,343	1,006 %
9 (-)	7,376	0,993 %
12 (-)	7,311	0,989 %
15 (-)	7,378	0,971 %
18 (-)	8,461	1,064 %
21 (-)	9,113	1,072 %
24 (-)	9,793	1,055 %
27 (-)	10,730	1,024 %
30 (-)	11,591	0,958 %
33 (-)	14,532	0,968 %
36 (-)	19,825	0,973 %

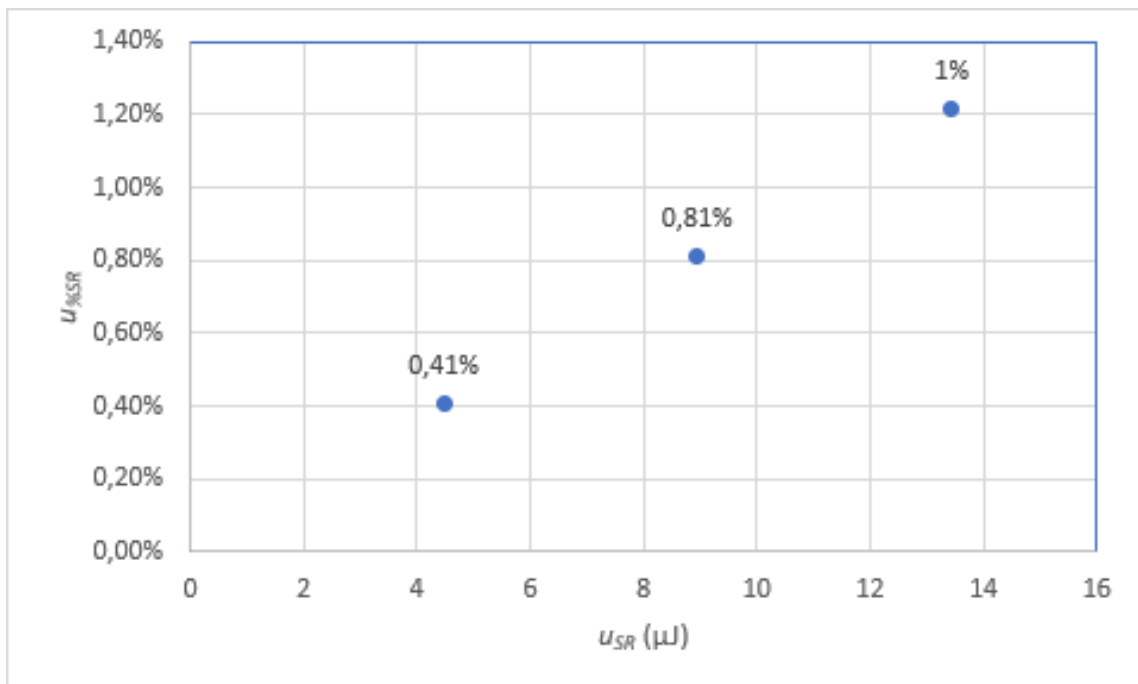
Mjerna nesigurnost prikazana u tablici 6.6. se povećava zajedno s apsolutnom vrijednosti parametra  $W_Q$ . Kao i u prethodnim slučajevima, ulaznom se naponu na sekundaru i struje na primaru dodjeljuje standardizirana normalna razdioba. Distribucije parametra  $W_Q$  također slijede normalni oblik distribucije, pri čemu su veća odstupanja prisutna kod mjerenja s manjim brojem sljedova u Monte Carlo simulaciji, dok su manja odstupanja prisutna kod mjerenja prilikom većeg broja sljedova.

U tablici 6.7. napravljena je usporedba srednjih vrijednosti mjernih nesigurnosti parametra  $W_Q$  i srednjih vrijednosti relativnih mjernih nesigurnosti parametra  $W_Q$  za tri slučaja (2 %, 4 %, 6 %) opisanih u ovom poglavlju.

**Tablica 6.7.** Srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti parametra  $W_Q$  za sva tri slučaja relativne nesigurnosti ulaznih veličina.

Relativna nesigurnost ulaznih veličina	Srednja vrijednost mjerne nesigurnosti parametra $W_Q, u_{SR}$ ( $\mu\text{J}$ )	Srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti parametra $W_Q, u_{\%SR}$
	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$
2 %	4,473	0,405 %
4 %	8,946	0,81 %
6 %	13,436	1.216 %





**Slika 6.3.** Grafički prikaz tablice 6.7.

Iz tablice 6.7. može se vidjeti da gotovo linearnim porastom srednje mjerne nesigurnosti sekundarnog napona i struje na primaru (što je dodatno prikazano grafom na slici 6.3.), dolazi do približno linearnog porasta mjerne nesigurnosti parametra  $W_Q$ .

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom je završnom radu opisana metoda određivanja zaostalog toka jezgre analiziranjem male petlje histereze. Adaptivnom Monte Carlo metodom određeni su rezultati za procjenu propagacije mjerne nesigurnosti zaostalog toka, pri čemu je pripadajući kod napisan u programskom alatu MATLAB. Definirani su pojmovi remanentnog magnetskog toka, mjerne nesigurnosti i naveden opis Monte Carlo metode.

Metodom određivanja remanentnog magnetskog toka jezgre analiziranjem male petlje histereze može se precizno odrediti krajnji remanentni tok u razdoblju kada transformator nije spojen na izvor napajanja. Ujedno je i glavna prednost ove metode jednostavna primjena i preciznost. Osnovna je ideja odrediti remanentni tok analiziranjem napona na sekundaru i struje na primaru, nakon što se primjeni testni signal. Testni je signal čisti izmjenični, što osigurava nepromijenjen tok. Iz prethodno opisanih tablica, uočljiva je promjenjivost broja sljedova ( $H$ ), odnosno parametar  $H$  varira u značajnijem rasponu. Mjerna se nesigurnost povećava, povećanjem apsolutne vrijednosti parametra  $W_Q$ . Za ulazne veličine struje na primaru i napona na sekundaru dodijeljena je Gaussova razdioba, pri čemu se primjećuje da odstupanje raste smanjenjem broja sljedova  $H$ , odnosno smanjuje s većim brojem sljedova.

Primjećuje se da se linearnim rastom srednje mjerne nesigurnosti primarne struje i sekundarnog napona javlja i približno linearni porast mjerne nesigurnosti parametra  $W_Q$ .

## LITERATURA

- [1] D. Vulin; FERIT, Doktorski rad, Metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri, 2020.g.
- [2] D. Vujević, B. Ferković: Osnove elektrotehničkih mjerenja 1.dio, 2001.g.
- [3] Monte Carlo Simulation; URL; <https://datascience.eu/mathematics-statistics/monte-carlo-simulation-definition/> zadnja posjeta stranici: 15.06.2023.g.
- [4] K. Topalović; FERIT, Diplomski rad, Procjena mjerne nesigurnosti pri mjerenju remanentnog toka, 2020. g.
- [5] A.Tolić; FERIT, Diplomski rad, Određivanje remanentnog magnetskog toka energetskog transformatora s pomoću istosmjernog izvora male snage, 2020. g.
- [6] V. Šestak, Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka s pomoću istosmjernog izvora male snage, 2022. g.
- [7] M. Oršulić; Određivanje remanentnog toka u magnetskoj jezgri analiziranjem odziva na testni signal, 2021. g.
- [8] D. P. Kroese, T. Taimre, Z. I. Botev: Handbook of Monte Carlo methods; .....URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/5882/41/L-G-0000588241-0002361987.pdf> zadnja posjeta stranici: 1.7.2023. g.
- [9] 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: 17.06.2023.g.
- [10] D. Vulin, K. Miličević, I. Biondić, G. Petrović; Determining the Residual Magnetic Flux Value of a Single-Phase Transformer Using a Minor Hysteresis Loop
- [11] K.Miličević; prezentacije iz predavanja kolegija Osnove mjerenja; FERIT
- [12] D. Karavidović: Mjerenja u elektrotehnici I, 1994. g.
- [13] Predložak za laboratorijske vježbe iz kolegija Osnove mjerenja; FERIT
- [14] Monte Carlo Simulation; URL: <https://sites.google.com/a/vt.edu/monte-carlo-simulation/history> zadnja posjeta stranici: 15.7.2023. g.

[15] What is data analysis?; URL: <https://www.datacamp.com/blog/what-is-data-analysis-expert-guide> zadnja posjeta stranici: 12.06.2023.g.

[16] W. Kenton; Monte Carlo Simulation: History, How it Works, and Key Steps; URL; <https://www.investopedia.com/terms/m/montecarlosimulation.asp#citation-1> zadnja posjeta stranici: 4.7.2023.g.

[17] Dr. A. Dolenc; Transformatori I. I II. dio, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1991.g.

[18] V.Ćorluka; FERIT; kolegij Osnove mjerenja, auditorne vježbe

## **SAŽETAK**

U ovom je radu dana definicija i načini mjerenja remanentnog toka, opisana mjerna nesigurnost te Monte Carlo metoda. Opisana je metoda određivanja remanentnog magnetskog toka analizom male petlje histereze te su prikazani rezultati mjerenja. S pomoću adaptivne Monte Carlo metode procijenjena je propagacija mjernih nesigurnosti, pri čemu je potreban kod napisan u programskom alatu MATLAB.

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

## **ABSTRACT**

### **EVALUATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY PROPAGATION OF MEASURED QUANTITIES USING THE ADAPTIVE MONTE CARLO METHOD IN DETERMINING REMANENT FLUX THROUGH SMALL HYSTERESIS LOOP**

This paper provides a definition and methods for measuring remanent flux, describes measurement uncertainty and the Monte Carlo method. The approach for determining remanent magnetic flux through the analysis of a small hysteresis loop is explained, and measurement results are presented. Using the adaptive Monte Carlo method, the propagation of measurement uncertainties is assessed, with the required code developed in the MATLAB software tool.

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

## **ŽIVOTOPIS**

Mario Franjković rođen je 20.3.2001. godine u Vinkovcima. Završava Osnovnu školu Antuna Gustava Matoša u Vinkovcima, nakon čega upisuje Gimnaziju Matije Antuna Reljkovića u Vinkovcima, prirodoslovno-matematički smjer, te 2020. godine završava s odličnim uspjehom. Iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Na drugoj se godini opredjeljuje za izborni blok Elektroenergetika.

---

Potpis autora

## PRILOZI

U prilogu rada, u elektroničkom obliku pohranjenom na CD-u nalazi se:

- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri analiziranjem male petlje histereze u datotekama „Metoda\_4\_10V\_2ms.m“ ( \_:\Prilozi\Metoda 4\Metoda\_4\_10V\_2ms.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje procjene propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina za metodu određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze u datotekama „Metoda\_4\_10V\_2ms\_AMC.m“ ( \_:\Prilozi\Metoda4\AMC\Metoda\_4\_10V\_2ms\_AMC.m i „AMC\_funkcija\_4\_10V\_2ms.m“, ( \_:\Prilozi\Metoda 4\AMC\AMC\_funkcija\_4\_10V\_2ms.m).