

Procjena propagacije mjerne nesigurnosti primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon

Šumić, Veronika

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:200:619662>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**

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 prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**PROCJENA PROPAGACIJE MJERNE NESIGURNOSTI
PRIMJENOM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE
PRI ODREĐIVANJU REMANENTNOG TOKA NA
TEMELJU USTALJENOG STANJA USPOSTAVLJENOG
NAKON UKLOPA TRANSFORMATORA NA NAZIVNI
IZMJENIČNI NAPON**

Završni rad

Veronika Šumić

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Veronika Šumić
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. pristupnika, god.	5026, 27.07.2021.
JMBAG:	0165090395
Mentor:	prof. dr. sc. Kruno Miličević
Sumentor:	dr. sc. Dragan Vulin
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Procjena propagacije mjerne nesigurnosti primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon
Znanstvena grana završnog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	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 na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon. Procijeniti propagaciju mjerne nesigurnosti mjerene veličine za prethodno navedenu metodu za nekoliko parametara relativne mjerne nesigurnosti mjerene veličine. U radu koristiti programski paket MATLAB. Sumentor: dr.sc. Dragan Vulin
Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:	19.09.2024.
Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:	25.09.2024.
Ocjena završnog rada nakon obrane:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:	28.09.2024.

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

Osijek, 28.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Veronika Šumić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	5026, 27.07.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Procjena propagacije mjerne nesigurnosti primjenom adaptivne Monte Carlo metode pri određivanju remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklona transformatora na nazivni izmjenični napon** 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 pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	2
2. PREGLED LITERATURE – REMANENTNI MAGNETSKI TOK.....	3
3. MJERNA NESIGURNOST.....	7
4. METODA MONTE CARLO	12
5. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA U MAGNETSKOJ JEZGRI NA TEMELJU USTALJENOG STANJA USPOSTAVLJENOG NAKON UKLOPA TRANSFORMATORA NA NAZIVNI IZMJENIČNI NAPON.....	14
6. PROCJENA PROPAGACIJE MJERNE NESIGURNOSTI MJERENE VELIČINE PRIMJENOM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE	24
7. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA	37
SAŽETAK.....	38
ABSTRACT	38
ŽIVOTOPIS.....	39
PRILOZI	40

1. UVOD

Transformatori imaju jednu od ključnih uloga u elektroenergetskim sustavima. S pomoću transformatora se prenosi električna energija, pri čemu se vrši transformacija napona između primarne i sekundarne strane. Prilikom isklopa transformatora s napajanja dolazi do raznih pojava koje mogu ometati rad elektroenergetskog sustava. Jedna takva pojava je i zaostali magnetski tok u feromagnetskoj jezgri transformatora. Kako bi se izbjegli problemi uzrokovanim ovom pojavom, potrebno je odrediti iznos remanentnog magnetskog toka primjenom neke od metoda za njegovo određivanje.

Mjerna nesigurnost definira interval vrijednosti u blizini mjernog rezultata u kojem se vrlo vjerojatno nalazi vrijednost mjerene veličine. Nadalje, mjernom nesigurnošću se iskazuje kvaliteta mjernog rezultata jer ukazuje na nepreciznost rezultata mjerenja.

Adaptivna Monte Carlo (AMC) metoda je statistički alat koji se vrlo često koristi pri procjeni propagacije mjerne nesigurnosti zbog svoje preciznosti i točnosti. Metoda je vrlo praktična te se primjenjuje u mnogim znanstvenim i inženjerskim područjima.

U drugom poglavlju opisan je magnetski tok te zaostali magnetski tok i pojave uzrokovane istim. Treće poglavlje opisuje mjernu nesigurnost, a četvrto metodu Monte Carlo. Zatim, kroz peto poglavlje opisana je razmatrana metoda kojom se određuje remanentni tok u jezgri. U šestom poglavlju procijenjena je propagacija mjerne nesigurnosti mjerene veličine za prethodno spomenutu metodu primjenom AMC metode. U sedmom poglavlju iznesen je zaključak.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je definirati pojam remanentnog magnetskog toka i mjerne nesigurnosti te pružiti opis AMC metode. Nadalje, potrebno je opisati metodu određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon i procijeniti propagaciju mjerne nesigurnosti mjerene veličine za prethodno navedenu metodu za nekoliko parametara relativne mjerne nesigurnosti mjerene veličine uz korištenje programskog paketa MATLAB.

2. PREGLED LITERATURE – REMANENTNI MAGNETSKI TOK

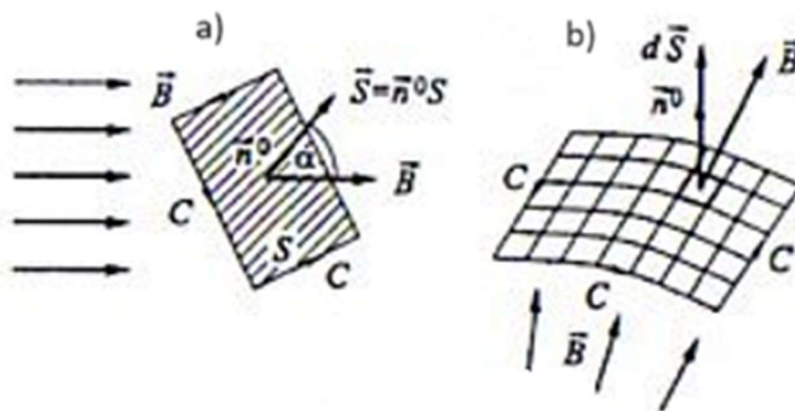
Magnetski tok razmjeran je ukupnom broju magnetskih silnica koje u magnetskom polju prolaze kroz neku površinu. Mjerna jedinica za izražavanje magnetskog toka jest veber (Wb), dok se za oznaku samog toka koristi grčko slovo Φ [1].

Magnetsko polje može biti homogeno i nehomogeno. Magnetski tok homogenog polja iskazuje se kao indukcija \vec{B} kroz ravnu površinu S . Ukoliko silnice magnetske indukcije \vec{B} upadaju okomito na površinu S , tok kroz tu površinu će biti maksimalan. Matematički, ova tvrdnja iskazuje se skalarnim produktom vektora magnetske indukcije \vec{B} s vektorom površine \vec{S} koja je ograničena krivuljom C , prema izrazu (2-1):

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

gdje je:

- Φ – magnetski tok [Wb],
- B – magnetska indukcija [T],
- S – površina [m^2], [2].



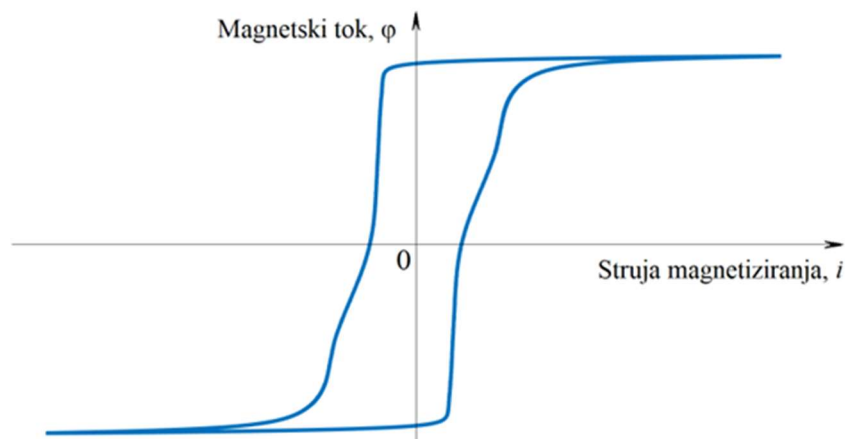
Slika 2.1. Prikaz magnetskog toka homogenog (a) i nehomogenog (b) magnetskog polja [2]

Nehomogeno magnetsko polje ima promjenjiv intenzitet i smjer magnetske indukcije od točke do točke, te je površinu S , omeđenu krivuljom C , potrebno podijeliti na niz elementarnih površina dS [2]. Suma svih elementarnih tokova kroz cijelu površinu čini ukupni tok kao što je prikazano izrazom (2-2):

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

Remanentni magnetski tok ili remanencija (Φ_R) određeni je iznos magnetskog toka koji ostaje u jezgri usprkos prekidu napajanja. Ova pojava poznata je još i kao zaostali magnetski tok i karakteristična je za feromagnetske materijale čije svojstvo se očituje u zadržavanju određene količine magnetskog toka nakon uklanjanja izvora magnetskog polja [3].

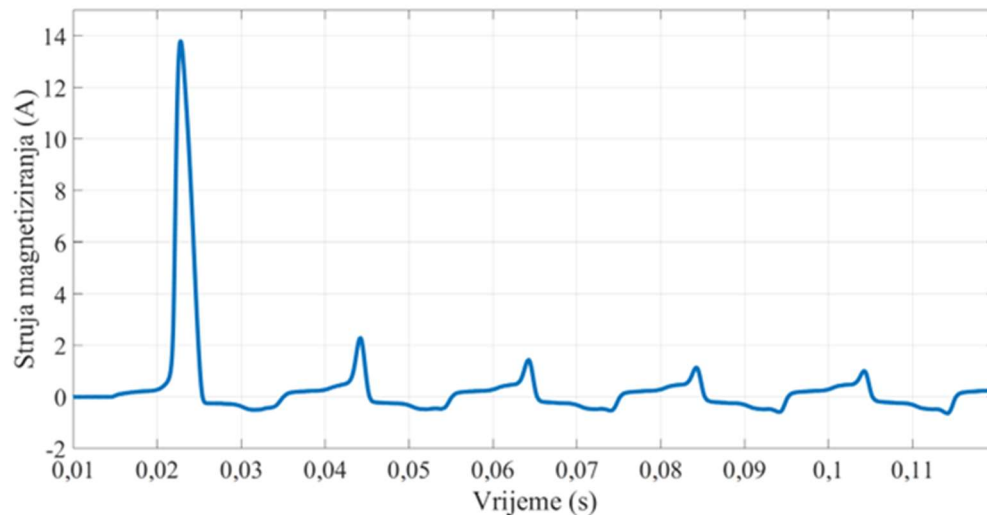
Ravnina φ - i način je prikazivanja magnetskih karakteristika transformatora, odnosno ravnina prikazuje kako se mijenja magnetski tok (φ) jezgre ovisno o struji magnetiziranja (i). Prilikom ustaljenog stanja transformatora, u φ - i ravnini formira se tzv. petlja histereze [3]. Na slici 2.2. prikazana je glavna petlja histereze transformatora.



Slika 2.2. Glavna petlja histereze transformatora [3]

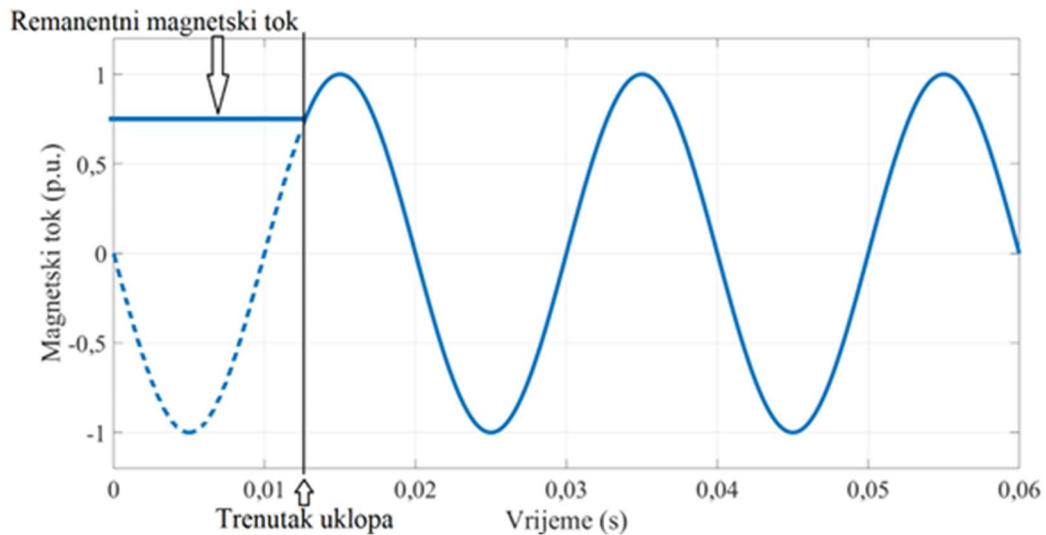
Normalan rad u elektroenergetskom sustavu može biti ometan zbog problema uzrokovanih nepoznavanjem vrijednosti remanentnog magnetskog toka u željeznoj jezgri transformatora ili zavojnice [3].

Jedan od problema javlja se kod uklopa transformatora koji nije opterećen na nazivni napon, a to je udarna struja magnetiziranja. Pojava te struje može prouzročiti mnoge neželjene učinke, nepravilan rad osigurača i zaštitnih releja, rezonanciju, propade napona pa i mehanička oštećenja namota. Na slici 2.3. prikazan je primjer valnog oblika ove struje [3].



Slika 2.3. Prikaz valnog oblika udarne struje magnetiziranja [3]

Potrebno je transformator uklopiti pri optimalnom faznom kutu kako jezgra ne bi otišla u područje zasićenja, što je uzrok pojave udarne struje. Nužno je poznavanje vrijednosti remanentnog toka u jezgri u trenutku uklopa za primjenu kontroliranog uklopa jer je optimalni fazni kut onaj pri kojemu bi magnetski tok bio jednak vrijednosti remanentnog magnetskog toka za slučaj transformatora spojenog na nazivni napon u ustaljenom stanju, što se prema slici 2.4. može i vidjeti [3].



Slika 2.4. Trenutak optimalnog uklopa [3]

Još jedan problem koji se javlja vezano uz remanentni magnetski tok jest zasićenje jezgre strujnog transformatora koje loše utječe na rad releja. Taj se utjecaj vidi pri prijelaznom stanju u vidu izobličenja izlaznog signala. Problem se posebno ističe kod režima automatskog ponovnog uklopa sustava. U slučaju kvara, odgovarajući prekidač isklopi, ali određeni dio remanentnog toka ipak se zadrži u jezgri strujnog transformatora. Ukoliko se pogreška ne otkloni do ponovnog uklopa prekidača, u jezgri će se postići duboko zasićenje, te će doći do izobličenja izlaznog signala. Kako bi se spriječilo zasićenje, često se primjenjuje upotreba elektroničkih strujnih transformatora, jezgre sa zračnim rasporedom i materijala jezgre s visokom permeabilnošću i niskom maksimalnom remanencijom [3].

Nadalje, remanentni magnetski tok važan je za predviđanje ferorezonancije, što predstavlja prijelaz iz monoharmonijskog u višeharmonijsko ustaljeno stanje. Ferorezonancija uništava električku opremu uslijed prenapona i karakteriziraju je izobličeni valni oblici struje i napona. Svako ustaljeno stanje koje nije monoharmonijsko smatra se ferorezonantnim. Ova pojava se vrlo teško predviđa. Važno je poznavanje vrijednosti remanentnog magnetskog toka za utvrđivanje ovisnosti ferorezonancije o početnim uvjetima [3].

3. MJERNA NESIGURNOST

Mjerni proces ili mjerenje je skup radnji čiji je proizvod mjerni rezultat. Prilikom mjerenja utvrđuje se vrijednost mjerene veličine s obzirom na mjernu jedinicu. Mjerni rezultat mora biti kvalitetan za odgovornu primjenu, a brojčano se kvaliteta mjernog rezultata iskazuje mjernom nesigurnošću [4].

Nekoć se kvaliteta mjernog rezultata iskazivala pogreškama. Pogreškom se smatra bilo koje odstupanje mjernog rezultata u odnosu na pravu vrijednost mjerene veličine. Pogreška je zapravo nepoznata i neodrediva jer se prava vrijednost mjerene veličine ne može dobiti mjerenjem, te shodno tome nije poznata. Iz tog razloga, u mjeriteljstvu prava vrijednost podrazumijeva dogovornu pravu vrijednost mjerene veličine. To je vrijednost dobivena najtočnijim mjernim postupkom i ona bi trebala imati oko pet puta manju pogrešku u odnosu na mjerni rezultat koji se provjerava. S obzirom na uzroke nastanka razlikuju se slučajne, sustavne i grube pogreške [4].

Uzroci nastanka slučajnih pogrešaka su mnoge neizbježne promjene u mjernoj opremi, okolini, mjernom objektu i samom mjeritelju. Promjenjive su po predznaku i vrijednosti. Iz tog razloga ne mogu se uzeti u obzir ispravkom rezultata, no mogu biti smanjene ponavljanjem mjerenja i računanjem srednje aritmetičke vrijednosti. Ove pogreške čine mjerni rezultat nepreciznim [4].

Sustavne pogreške formiraju se uslijed nesavršenosti mjerne opreme, mjernog objekta, mjernog postupka, mjeritelja i utjecaja okoline. Nepromjenjive su po predznaku i vrijednosti uz nepromijenjene uvjete pri ponovljenim mjerenjima, ili se predvidivo mijenjaju uz promijenjene uvjete. Ove pogreške čine mjerni rezultat neispravnim. Određene sustavne pogreške moguće je ispraviti ukoliko su određive, ali ponekad ostaju nepoznate u potpunosti i njih se naziva preostale sustavne pogreške [4].

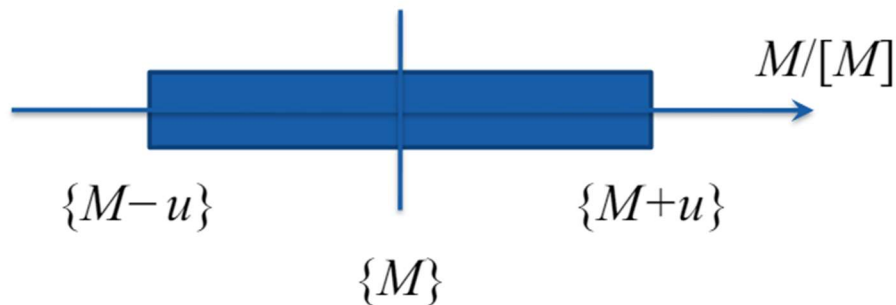
Najčešći uzroci nastanka grubih pogrešaka su neispravna mjerna oprema, neodgovarajuća mjerna metoda, nedovoljna pozornost mjeritelja, te neznanje. Ukoliko se pogreška ne može ispraviti, mjerni rezultat s ovom pogreškom se odbacuje [4].

Točan mjerni rezultat je ispravan i precizan, dakle ima zanemarive pogreške [4].

Cjeloviti mjerni rezultat sadrži najbolju aproksimaciju mjerene veličine M , pripadajuću mjernu nesigurnost u i zakonitu mjernu jedinicu $[M]$, kao što je prikazano izrazom (3-1) [5].

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

Cjeloviti mjerni rezultat raspon je vrijednosti što se može predočiti slikom 3.1. [5].



Slika 3.1. Predodžba cjelovitog mjernog rezultata [6]

Razlog iskazivanja kvalitete mjernog rezultata mjernom nesigurnošću, a ne pogreškama krije se u činjenici da su pogreške temeljene na pravoj vrijednosti koja nije poznata. S obzirom na slučajne i preostale sustavne pogreške sumnja se na točnost mjernog rezultata i nakon njegovog ispravka, te se zato mjerni rezultat smatra nesigurnim [4].

Mjerna nesigurnost zadaje raspon vrijednosti koje bi mjerena veličina s velikom vjerojatnošću mogla imati na temelju mjerenja. S obzirom na pogreške, svaki mjerni rezultat je više ili manje netočan, te mjerni rezultat nije prava vrijednost mjerene veličine. Iz tog razloga se procjenjuje mjerna nesigurnost koja određuje raspon vrijednosti u kojem se očekuje prava vrijednost mjerene veličine. Mjerni rezultat je kvalitetniji što je raspon mogućih vrijednosti uži [4].

Neki od izvora nesigurnosti mjernog rezultata su nepotpuna definicija i nesavršena provedba mjerene veličine, mjerna oprema, uzorkovanje, mjeritelj, etaloni, razlučivost, aproksimacije [5].

Mjerna nesigurnost sastoji se od mnogo komponenata koje su svrstane u dvije kategorije prema metodi vrednovanja, a to su nesigurnost tipa A (u_A) i nesigurnost tipa B (u_B) i one se iskazuju standardnim odstupanjem [4].

Geometrijski zbroj pojedinih komponenata predstavlja ukupnu nesigurnost u , kako je i prikazano izrazom (3-2) [4].

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3-2)$$

Kvalitetu mjernog rezultata moguće je iskazati i proširenom mjernom nesigurnošću U koja se računa kao umnožak faktora proširenja k i ukupne standardne nesigurnosti, prema izrazu (3-3) [4].

$$U = k \cdot u \quad (3-3)$$

Nesigurnost A tipa može se odrediti s pomoću dobivene razdiobe učestalosti pri ponovljenim mjerenjima [4].

Ukoliko se mjeri vremenski stalna veličina X više puta pri jednakim uvjetima, rezultat će biti niz očitavanja x_i koji se međusobno razlikuju zbog slučajnih i preostalih pogreški [4].

Aritmetička sredina je najbolja procjena mjerene veličine, za niz očitavanja od x_1 do x_n računa se prema izrazu (3-4) [4].

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3-4)$$

Standardna devijacija niza očitavanja od x_1 do x_n računa se prema izrazu (3-5) [4].

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-5)$$

Standardna devijacija pojedinačnih očitavanja je mjera nepreciznosti, odnosno mjera je rasipanja očitavanja. Broj ponovljenih mjerenja n umanjen za 1 nalazi se u nazivniku i taj izraz se naziva broj stupnjeva slobode. Jedan stupanj slobode potrošen je upotrebom aritmetičke sredine \bar{x} koja se računa na temelju istih n mjerenja čiji se uzorak koristi pri procjeni standardne devijacije skupa beskonačno velikog broja mogućih mjerenja.

Mjerna nesigurnost tipa A može se iskazati standardnom devijacijom aritmetičke sredine, prema izrazu (3-6) [4].

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3-6)$$

Ukoliko je broj ponovljenih mjerenja n veći od 30, mjerna nesigurnost tipa A temelji se na Gaussovoj razdiobi, u suprotnom koristi se studentova razdioba [6].

Sve nesigurnosti mogle bi biti tipa A, odnosno mogle bi se odrediti eksperimentalno. Međutim, često se mjerni rezultat temelji na samo jednom mjerenju. Tada se mjerna nesigurnost procjenjuje s pomoću dostupnih informacija.

Nesigurnost tipa B moguće je procijeniti na temelju specifikacija mjerne opreme, podataka umjeravanja mjerila, informacija o ponovljivosti i obnovljivosti mjernog postupka, svojstava mjerila i mjernih objekata, informacija o zaokruživanju, histereze, razlučivosti. Raznovrsni izvori podataka često su iskazani različito, te ih je nužno preračunati ili pretvoriti u mjernu nesigurnost iskazanu standardnim odstupanjem [4].

U tehničkim podacima mjerila dane su granične pogreške, odnosno najveće dopuštene pogreške koje mjerilo smije imati pri pravilnoj upotrebi. Iskazivanje ovih pogrešaka nije isto za analogna i digitalna mjerila [4].

Kod analognih mjerila vrijednost mjerene veličine se definira prema položaju kazaljke s obzirom na odgovarajuću skalu. Analogna mjerila dijele se u razrede točnosti, a indeksi razreda govore o vrijednosti graničnih pogrešaka izraženih u postocima. Postotci se zadaju prema maksimalnoj vrijednosti mjernog područja, ali rjeđe i prema očitanoj vrijednosti [4].

S druge strane, kod digitalnih mjerila se vrijednost mjerene veličine prikazuje i obrađuje digitalno. Ova mjerila nemaju razrede točnosti i iskazivanje graničnih pogrešaka nije standardizirano. Svaki proizvođač navodi podatke na svoj način, najčešće su granične pogreške prikazane kao zbroj dviju ili više komponenata [4].

Mjerna nesigurnost tipa B iskazuje se standardnom devijacijom s obzirom na graničnu pogrešku G , prema izrazu (3-7). Ovaj tip nesigurnosti slijedi pravokutnu razdiobu [4].

$$u_B = s = \frac{G}{\sqrt{3}} \quad (3-7)$$

4. METODA MONTE CARLO

Znanstvenici Stanislaw Ulam i John von Neumann bili su ključne osobe u razvoju metode Monte Carlo. Ulam se smatra prvim matematičarom koji je ovom načinu dodijelio ime. Zbog njegovog rada na razvoju nuklearnog oružja, metoda je zahtijevala tajno ime koje je dobila po gradu u kneževini Monako. Grad je poznat po igrama na sreću koje su analogne slučajnom uzorkovanju, što je osnova ove metode. Von Neumann je prvo elektroničko računalo, ENIAC, koristio za primjenu Monte Carlo metode za projekte vezane uz nuklearnu fiziku i hidrodinamiku. Tako se razvojem računala razvijala i Monte Carlo metoda [7].

Metoda Monte Carlo je algoritam koji nasumično uzorkuje iz funkcije gustoće vjerojatnosti ulaznih varijabli, a kojem je cilj odrediti razdiobu vjerojatnosti izlaznih varijabli, odnosno rezultata promatranog sustava [3].

Ova statistička metoda temelji se na generiranju velikog broja slučajnih brojeva, te određivanju razdiobe vjerojatnosti numeričkom simulacijom. Ukoliko je problem suviše kompliciran za analitičko rješavanje, ova metoda je odlična za ostvarivanje numeričkih rješenja [8].

Nadalje, metoda je veoma prikladna za obradu računalima jer suvremena računala sadrže programe za generiranje slučajnih brojeva i statističke obrade velikih količina podataka. Kao najveća prednost računalne obrade ističe se brzina računanja [9].

Posebnost ove metode ističe se u tome što daje prikaz svih mogućih ishoda i njihovih vjerojatnosti pojavljivanja. Shodno tome, moguće je provesti analizu nad rezultatima i uvidjeti čimbenike koji utječu na ishode procesa, te kontrolirati njihov utjecaj [10].

Osnovni koraci primjene metode Monte Carlo su:

1. Definiranje matematičkog modela procesa;
2. Određivanje varijabli čije vrijednosti su nezvjesne;

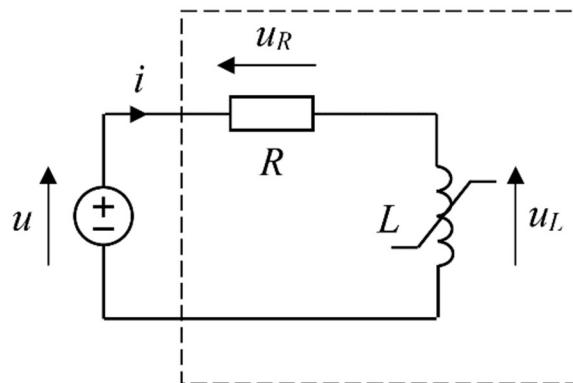
3. Utvrđivanje funkcija gustoće koje opisuju distribuciju vrijednosti slučajnih varijabli;
4. Izrada matrice korelacije ukoliko postoji korelacija među varijablama;
5. Dodjeljivanje slučajne vrijednosti proizašle iz funkcije gustoće svakoj varijabli u svakoj iteraciji, vodeći računa o matrici korelacije;
6. Računanje izlazne vrijednosti i pohrana rezultata;
7. Ponovno izvođenje prethodna dva koraka;
8. Statističko analiziranje rezultata [10].

Metoda neće biti adaptivna ukoliko je broj iteracija M unaprijed izabran jer neće biti moguće kontrolirati konvergenciju rezultata. AMC metoda povećava broj iteracija osnovne Monte Carlo metode dok se rezultati statistički ne stabiliziraju. Rezultat se smatra numerički stabiliziranim ako je dvostruka standardna devijacija manja od numeričke tolerancije δ koja se definira kao polovica zadnje značajne znamenke mjerne nesigurnosti [3].

5. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA U MAGNETSKOJ JEZGRI NA TEMELJU USTALJENOG STANJA USPOSTAVLJENOG NAKON UKLOPA TRANSFORMATORA NA NAZIVNI IZMJENIČNI NAPON

Temelj na kojem se ova metoda zasniva jest činjenica kako će magnetski tok u jezgri biti izmjeničan u ustaljenom stanju ukoliko je poticaj izmjeničan, odnosno kako istosmjerna komponenta neće biti prisutna. Shodno tome, nužno je integriranje napona na sekundaru transformatora bez opterećenja koji je ekvivalent naponu induktiviteta od uklopa do postizanja ustaljenog stanja u svrhu određivanja valnog oblika magnetskog toka u jezgri [3].

Za potrebe dokazivanja ispravnosti metode koristi se model neopterećenog transformatora kojeg čine serijski spojeni linearni otpor R i nelinearni induktivitet L , kako je prikazano u pravokutniku na slici 5.1. [3].



Slika 5.1. Prikaz modela neopterećenog transformatora napajanog izmjeničnim izvorom [3]

Za model prikazan slikom 5.1. vrijedi Kirchhoffov zakon napona prema izrazu (5-1):

$$iR + N \frac{d\varphi}{dt} = \hat{U} \sin \omega t, \quad (5-1)$$

gdje je:

- \hat{U} – maksimalni iznos napona izvora,
- ω – frekvencija,
- t – vrijeme,
- φ – magnetski tok inuktiviteta,
- N – broj zavoja inuktiviteta [3].

Izraz (5-1) za istosmjerne vrijednosti u ustaljenom stanju jednak je :

$$I(0)R + N \frac{d\Phi(0)}{dt} = U(0), \quad (5-2)$$

gdje je:

- $I(0)$ – srednja vrijednost struje (i),
- $U(0)$ – srednja vrijednost napona izvora (u),
- $\Phi(0)$ – srednja vrijednost magnetskog toka (φ) [3].

Prema (5-2) srednja vrijednost struje $I(0)$ jednaka je nuli, s obzirom na istosmjernu komponentu napona izvora $U(0)$ koja je jednaka nuli, te istosmjernu komponentu magnetskog toka koja je konstantna, te čija je derivacija po definiciji jednaka nuli. Imajući na umu činjenicu da je odnos između magnetskog toka i struje magnetiziranja neparna funkcija, slijedi da u ustaljenom stanju istosmjerna komponenta magnetskog toka $\Phi(0)$ također mora biti nula [3].

Izraz za magnetski tok (φ) inuktiviteta glasi:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau + \Phi_R, \quad (5-3)$$

gdje je:

- τ – pomoćna varijabla vremena,
- Φ_R – remanentni tok [3].

U ustaljenom stanju, izraz (5-3) može poprimiti oblik:

$$\Phi(0) = \frac{1}{T} \int_{t_{US}}^{t_{US}+T} \left[\frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau + \Phi_R \right] dt, \quad (5-4)$$

gdje je:

- T – trajanje periode napona u ,
- t_{US} – proizvoljni trenutak uz uvjet da je tok u ustaljenom stanju [3].

Prema (5-4), izraz za remanentni tok jednak je [3]:

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

Remanentni tok ovisi o naponu induktiviteta u_L , što je prikazano izrazom (5-5). Kako bi prikaz rezultata mjerenja bio jednostavniji, uvodi se nova varijabla, valni oblik magnetskog toka (φ_{VO}) [3]:

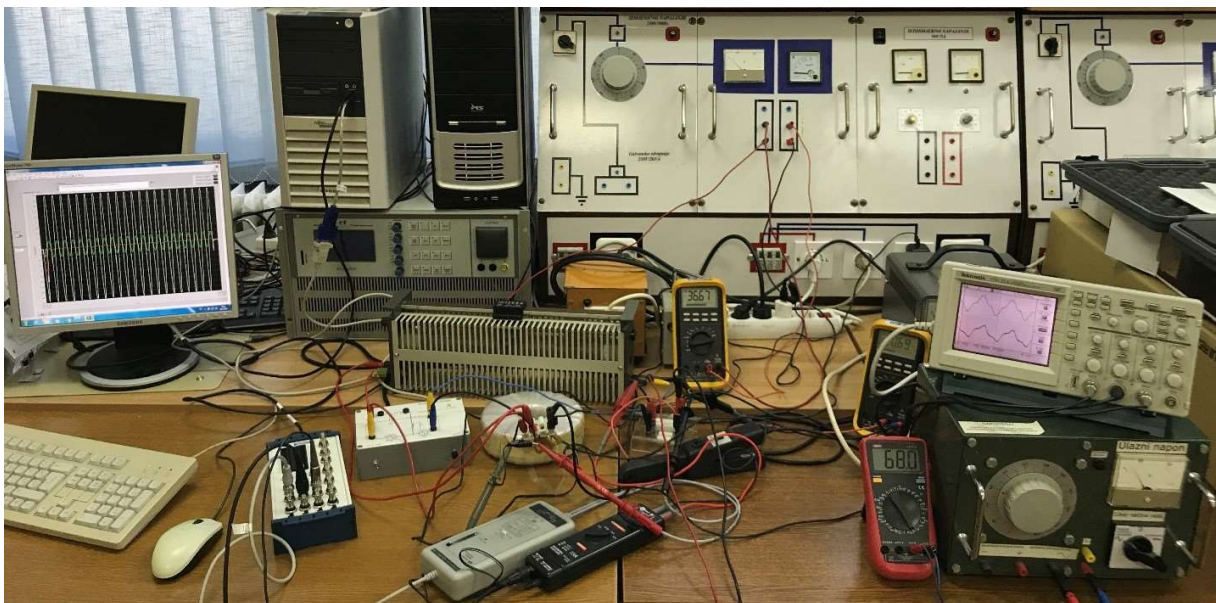
$$\varphi_{VO} = \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau. \quad (5-6)$$

Varijabla izražena jednačbom (5-6) predstavlja magnetski tok, no u trenutku $t=0$ jednaka je nuli. Nadalje, remanentni tok je [3]:

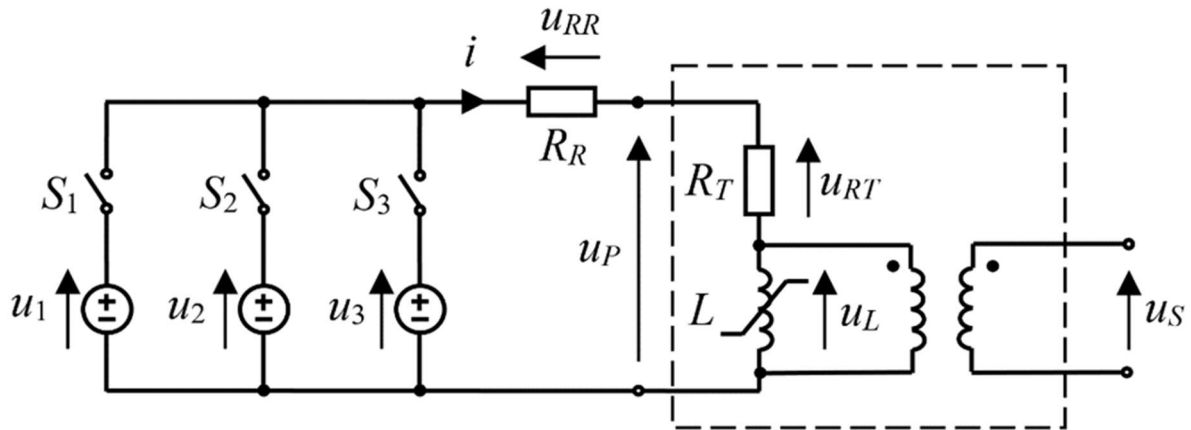
$$\Phi_R = -\frac{1}{T} \int_{t_{US}}^{t_{US}+T} \varphi_{VO}(t) dt. \quad (5-7)$$

Vrlo je važno da se trenutak t_{US} odabere u ustaljenom stanju, odnosno da se istosmjerna komponenta φ_{VO} računa iz uzorka jedne periode kada je tok u ustaljenom stanju. Naime, prema (5-7) vidljivo je kako remanentni tok odgovara negativnoj srednjoj vrijednosti varijable φ_{VO} koja je izračunata u ustaljenom stanju [3].

Slika 5.2. prikazuje laboratorijski sustav potreban za realizaciju metode određivanja remanentnog toka u jezgri jednofaznog transformatora. Nadalje, slika 5.3. prikazuje model spomenutog sustava [3].



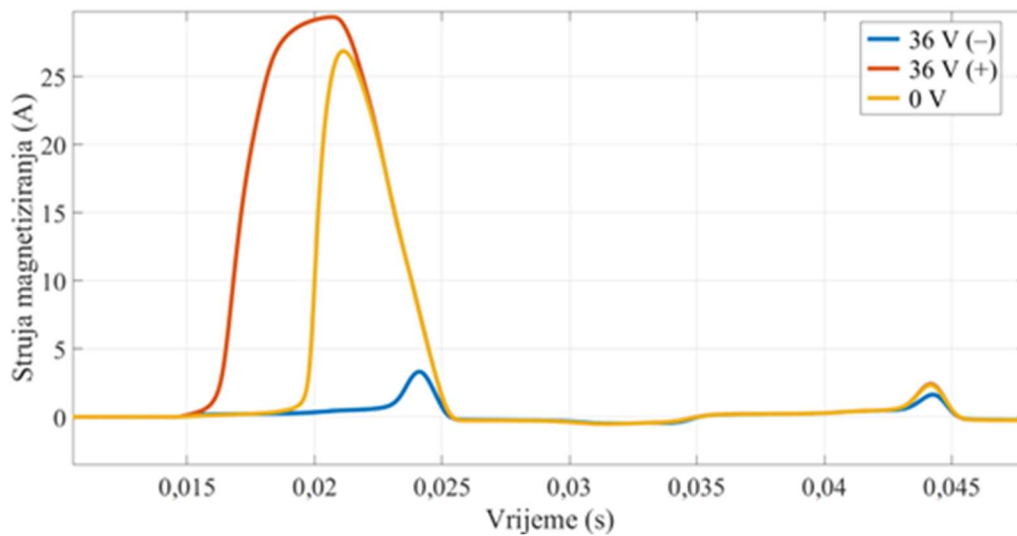
Slika 5.2. Prikaz laboratorijskog sustava [3]



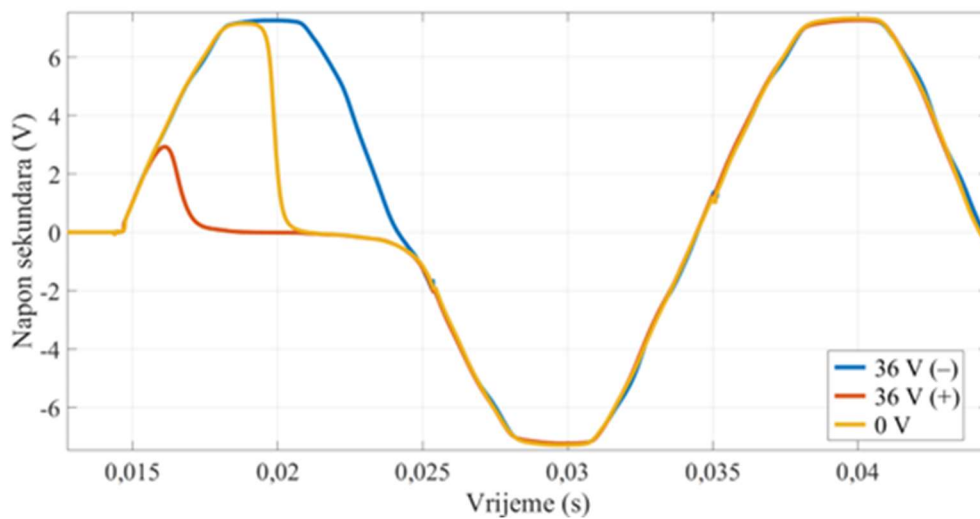
Slika 5.3. Model laboratorijskog sustava [3]

Sustav čine jednofazni transformator modeliran otporom R_T i savršenim transformatorom spojenim u seriju, dodatni otpornik modeliran otporom R_R , dva promjenjiva izvora izmjeničnog napona modelirana izvorima u_1 i u_2 , te mehanička sklopka modelirana sklopkom S_1 i elektronički upravljana sklopka modelirana sklopkom S_2 . Nadalje, laboratorijski izmjenični izvor s promjenjivim naponom služi kao izvor napajanja i modeliran je izvorom u_3 . Izvor i transformator spojeni su elektronički upravljanom sklopkom koja je modelirana sklopkom S_3 , kako je prikazano slikom 5.3. Sklopke S_1 i S_2 su isključene tijekom provedbe mjernog postupka [3].

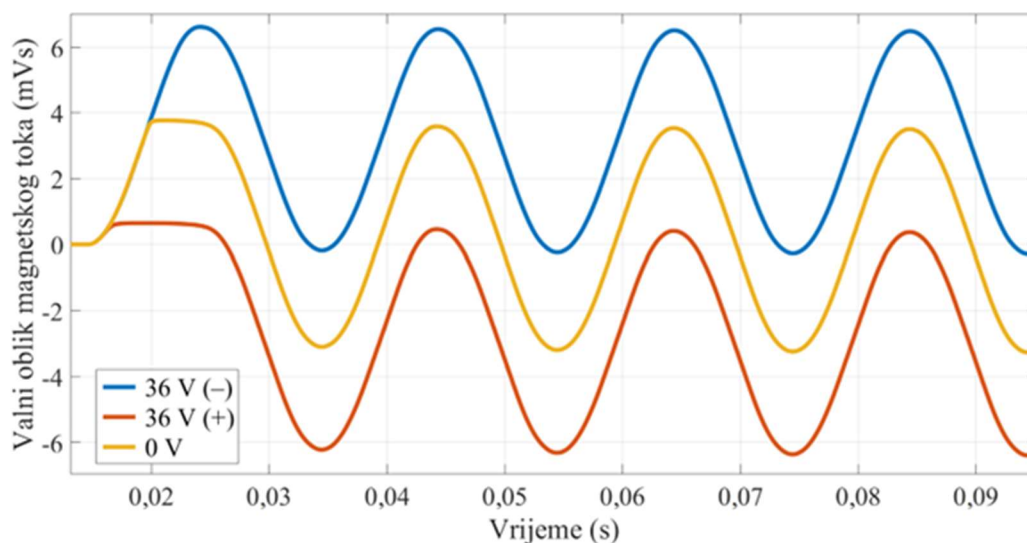
Nadalje, početna vrijednost remanentnog toka, to jest parametar U_2 postavljen je za tri karakteristične vrijednosti (36 V (–), 36 V (+) i 0 V) pri faznom kutu uklopa $\alpha = 0^\circ$. Na slikama 5.4., 5.5., i 5.6. vidljiv je prikaz valnih oblika struje (i) i sekundarnog napona (u_S), te izračun valnog oblika magnetskog toka φ_{V0} za sva tri karakteristična parametra [3].



Slika 5.4. Prikaz struje magnetiziranja za tri karakteristična parametra [3]



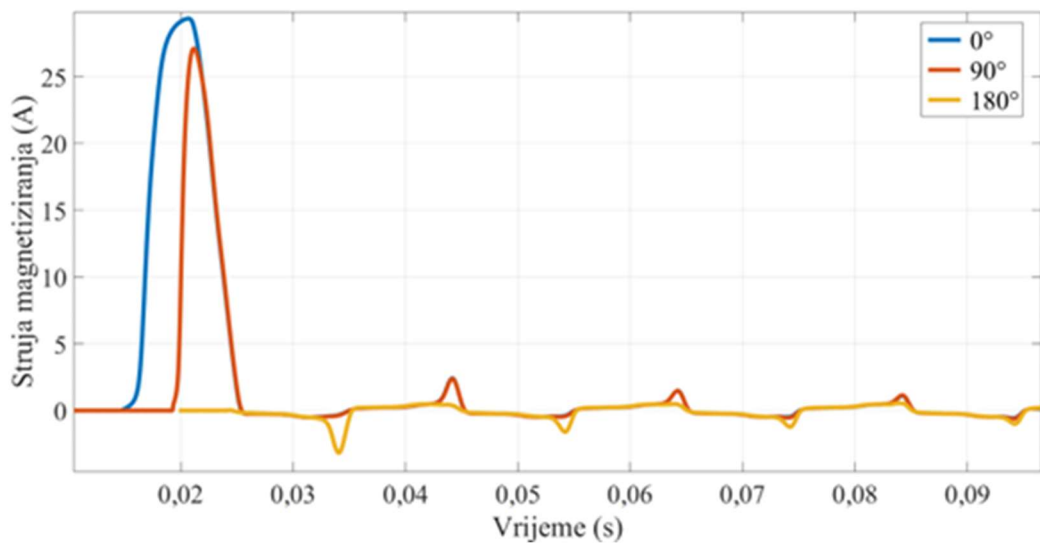
Slika 5.5. Prikaz napona sekundara za tri karakteristična parametra [3]



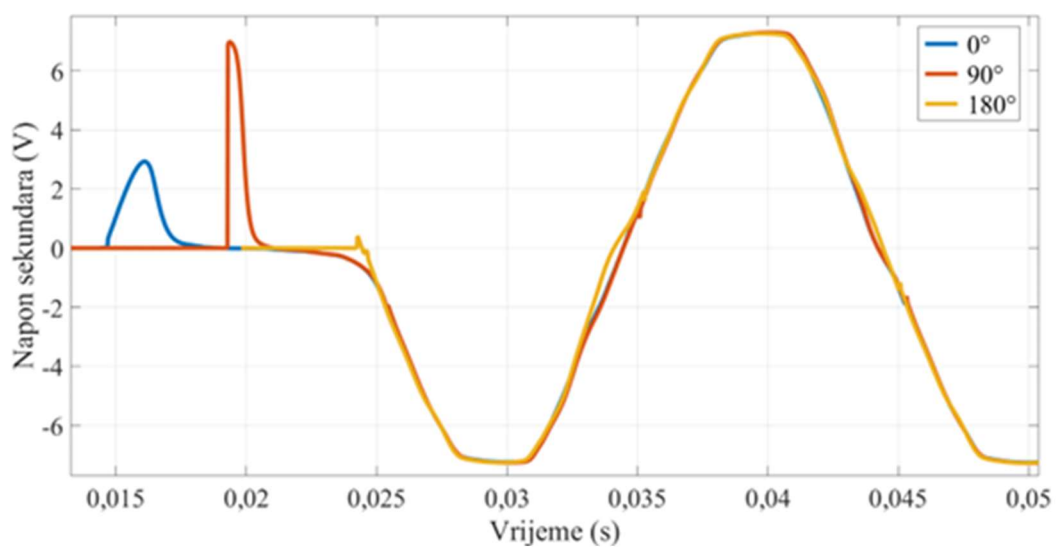
Slika 5.6. Prikaz valnog oblika magnetskog toka za tri karakteristična parametra [3]

Maksimalna vrijednost struje magnetiziranja od 30 A, kako je prikazano na slici 5.4., postignuta je za parametar $U_2 = 36 V (+)$ uz fazni kut uklopa $\alpha = 0^\circ$. Ovaj parametar ujedno je i najveća postavljena početna vrijednost remanentnog toka. Za pojavu udarne struje, odnos parametara U_2 i α u ovom slučaju je najnepovoljniji, iz čega proizlazi kako je fazni kut $\alpha = 0^\circ$ blizu optimalnog kuta uklopa za najmanju postavljenu početnu vrijednost remanentnog toka, u ovom slučaju za parametar $U_2 = 36 V (-)$. Najveća struja magnetiziranja uzrok je i najvećeg izobličenja napona sekundara, što se može vidjeti na slici 5.8. Dok je na slici 3.9. vidljivo kako se srednje vrijednosti valnog oblika magnetskog toka φ_{VO} razlikuju u ustaljenom stanju pri različitim početnim vrijednostima remanentnog toka. Tako je srednja vrijednost najveća pri maksimalnoj negativnoj vrijednosti remanentnog toka $U_2 = 36 V (-)$, a najmanja pri maksimalnoj pozitivnoj početnoj vrijednosti remanentnog toka, što odgovara parametru $U_2 = 36 V (+)$ [3].

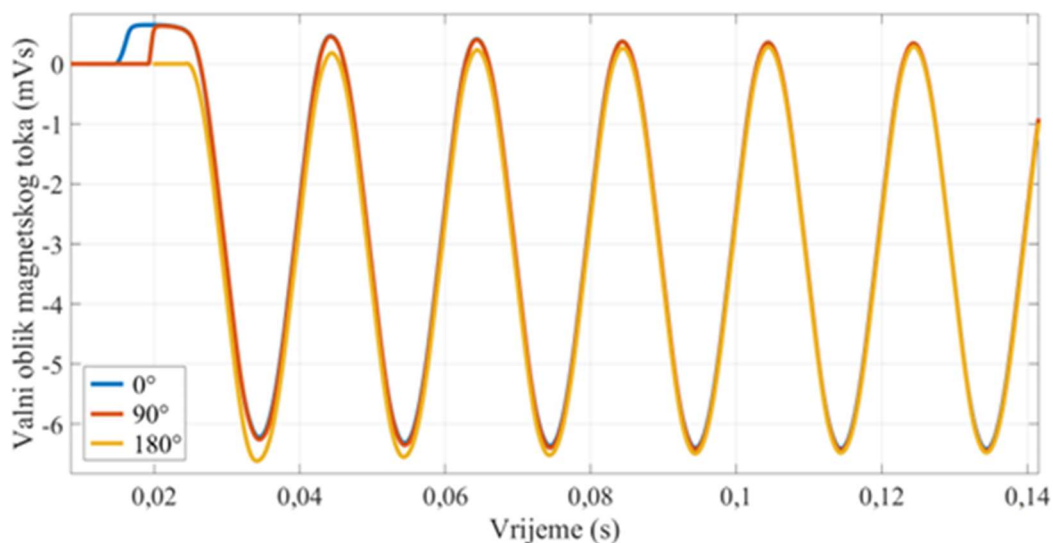
Nadalje, početna vrijednost remanentnog toka, parametar U_2 jednak je 36 V (+) za sva tri karakteristična fazna kuta α (0° , 90° i 180°). Na slikama 5.7., 5.8. i 5.9. vidljiv je prikaz valnih oblika struje magnetiziranja (i) i napona sekundara (u_s), te izračun valnog oblika magnetskog toka φ_{VO} za sva tri karakteristična kuta [3].



Slika 5.7. Prikaz struje magnetiziranja za tri karakteristična fazna kuta uklopa [3]



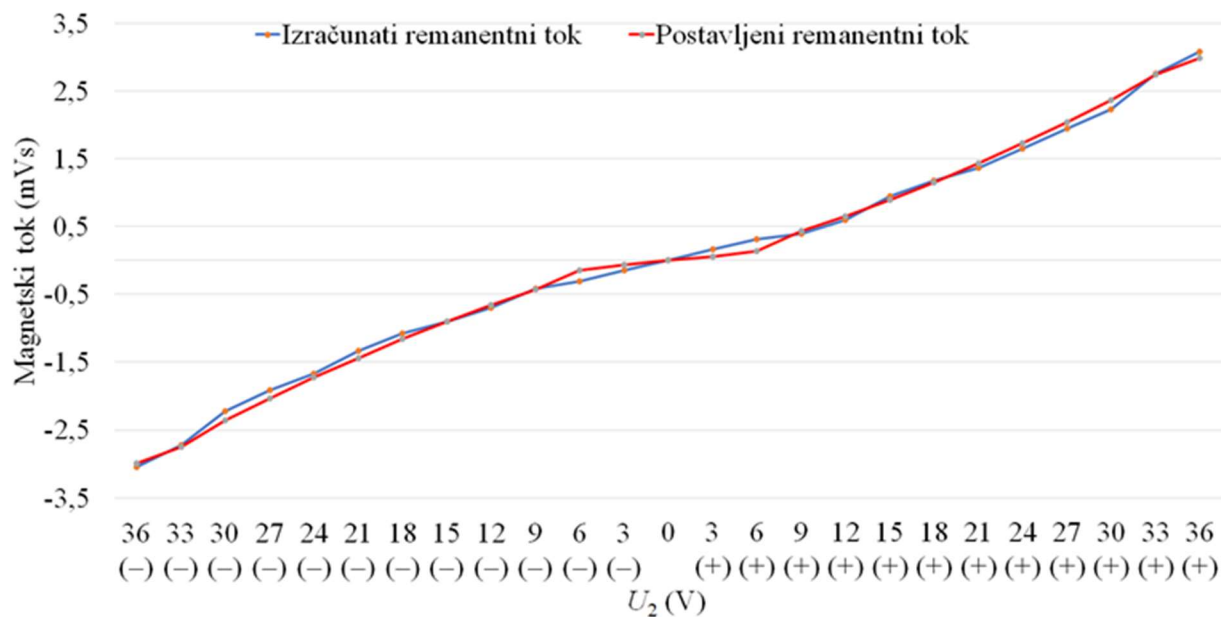
Slika 5.8. Prikaz napona sekundara za tri karakteristična fazna kuta uklopa [3]



Slika 5.9. Prikaz valnog oblika magnetskog toka za tri karakteristična fazna kuta uklopa [3]

Na slici 5.7. ponovno se ističe najnepovoljnija kombinacija parametara $U_2 = 36 V (+)$ i $\alpha = 0^\circ$, u smislu pojave udarne struje. No, na istoj slici može se uočiti i najpovoljniji slučaj pri kombinaciji parametara maksimalne početne vrijednosti remanentnog toka $U_2 = 36 V (+)$ i kuta uklopa $\alpha = 180^\circ$. Naime, fazni kut uklopa $\alpha = 180^\circ$ vrlo je blizu optimalnom kutu u slučaju maksimalne pozitivne početne vrijednosti remanentnog toka. Ipak, vrijednost optimalnog kuta uklopa manja je od 180° . Iz slike 5.7. vidljivo je kako ustaljeno stanje nije uspostavljeno odmah u usporedbi kako to biva pri optimalnom kutu. Naponi sekundara, prema slici 5.8., ističu značajnija izobličenja pri kutovima od $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 90^\circ$. Za kut uklopa $\alpha = 180^\circ$ izobličenje je zanemarivo. Može se zaključiti kako na izobličenje značajno utječe vrijednost struje magnetiziranja. Nadalje, srednje vrijednosti magnetskog toka φ_{VO} jednake su pri različitim faznim kutovima i istom početnom vrijednosti remanentnog toka, kako je i vidljivo na slici 5.9. Time se dokazuje kako fazni kut uklopa nema utjecaj na izračunatu vrijednost remanentnog toka uporabom ove metode [3].

Na slici 5.10. grafički je prikaz usporedbe izračunatih srednjih vrijednosti remanentnog toka Φ_{RS} i postavljenih početnih vrijednosti remanentnog toka Φ_{R0} za svaki parametar U_2 [3].



Slika 5.10. Grafički prikaz usporedbe izračunatog i postavljenog remanentnog toka [3]

Iz ovog se može zaključiti kako je uporaba ove metode pouzdana i precizna za određivanje remanentnog toka bez podataka o prethodnom stanju u jezgri i parametrima transformatora. Nužno je poznavanje nazivnog napona transformatora, te je potrebno izmjeriti napon sekundara (u_s) koji je ekvivalent naponu induktiviteta (u_L), što se vidi u modelu na slici 5.3. [3].

6. PROCJENA PROPAGACIJE MJERNE NESIGURNOSTI MJERENE VELIČINE PRIMJENOM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE

Tijekom ispitivanja metode opisane u petom poglavlju izvršeno je ukupno 175 mjerenja. Za svako od tih mjerenja, u svrhu procjene mjerne nesigurnosti, upotrijebit će se izmjerene ulazne veličine, to jest vrijednosti napona sekundara. Trend propagacije mjerne nesigurnosti može se odrediti pri povećanju nesigurnosti ulaznih veličina. U ovu svrhu koristit će se vrijednosti od 2 %, 4 % i 6 % relativne nesigurnosti za napon na sekundarnom namotu. Kao krajnji rezultat, provedeno je 525 AMC simulacija korištenjem programskog paketa MATLAB, čiji su odgovarajući kodovi u prilogu ovoga rada.

Tablica 6.1. pruža prikaz srednjih vrijednosti zaostalog magnetskog toka, dobivenih simulacijom Monte Carlo, za slučaj relativne nesigurnosti od 2 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.1. Prikaz dobivenih srednjih vrijednosti zaostalog magnetskog toka izraženog u mVs pri relativnoj nesigurnosti od 2 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,0819	3,0827	3,0847	3,0798	3,0780	3,0785	3,0766
33 (+)	2,7524	2,7882	2,7575	2,7465	2,7481	2,7509	2,7660
30 (+)	2,1233	2,1788	2,1639	2,3692	2,3298	2,1781	2,3366
27 (+)	1,8052	1,8814	2,1037	2,0782	1,8724	1,8636	2,0555
24 (+)	1,6050	1,7207	1,5568	1,7052	1,6642	1,7500	1,6094
21 (+)	1,3234	1,4548	1,3776	1,3436	1,5361	1,3086	1,2425
18 (+)	1,600	1,3255	1,0414	1,0173	1,2526	1,1888	1,2800
15 (+)	1,0039	1,0724	0,8682	1,0260	0,9128	0,8640	0,8923
12 (+)	0,5844	0,5079	0,6062	0,6868	0,5437	0,6449	0,6501
9 (+)	0,3765	0,3781	0,4446	0,3698	0,4537	0,3532	0,4286
6 (+)	0,2726	0,3311	0,3388	0,3103	0,3404	0,3117	0,2668
3 (+)	0,1668	0,1626	0,1862	0,1510	0,1807	0,1431	0,1476
0	-0,0486	0,0025	0,0018	0,0128	0,0514	-0,0373	-0,0234
3 (-)	-0,1545	-0,1284	-0,1296	-0,1388	-0,1395	-0,1563	-0,1507
6 (-)	-0,3081	-0,2626	-0,2785	-0,2698	-0,3070	-0,3418	-0,3350
9 (-)	-0,4427	-0,3858	-0,3391	-0,4566	-0,3810	-0,4377	-0,4295
12 (-)	-0,7139	-0,7377	-0,7133	-0,6917	-0,6438	-0,8007	-0,6143
15 (-)	-0,9923	-0,7556	-0,8024	-0,9744	-0,8785	-0,8867	-0,9883
18 (-)	-1,0651	-1,1265	-1,0866	-0,9172	-1,0061	-1,0986	-1,2386
21 (-)	-1,4578	-1,2614	-1,1947	-1,4466	-1,3605	-1,3601	-1,2084
24 (-)	-1,5426	-1,6600	-1,7712	-1,7313	-1,5018	-1,5912	-1,8467
27 (-)	-1,8476	-1,8251	-1,8368	-2,0674	-1,8498	-2,0540	-1,9156
30 (-)	-2,1595	-2,2428	-2,2946	-2,1797	-2,2381	-2,1152	-2,2913
33 (-)	-2,7247	-2,7355	-2,7271	-2,7016	-2,6898	-2,7493	-2,7315
36 (-)	-3,0512	-3,0485	-3,0280	-3,0426	-3,0476	-3,0555	-3,0574

Tablica 6.2. pruža prikaz mjernih nesigurnosti, dobivenih simulacijom AMC, za slučaj relativne nesigurnosti od 2 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.2. Prikaz dobivenih mjernih nesigurnosti u mVs pri relativnoj nesigurnosti od 2 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	0,0596	0,0595	0,0597	0,0598	0,0599	0,0599	0,0597
33 (+)	0,0598	0,0599	0,0594	0,0594	0,0598	0,0595	0,0595
30 (+)	0,0589	0,0596	0,0596	0,0597	0,0596	0,0597	0,0587
27 (+)	0,0588	0,0600	0,0596	0,0594	0,0594	0,0593	0,0585
24 (+)	0,0595	0,0598	0,0599	0,0598	0,0593	0,0588	0,0599
21 (+)	0,0597	0,0598	0,0593	0,0596	0,0599	0,596	0,0581
18 (+)	0,0595	0,0601	0,0603	0,0595	0,0586	0,0595	0,0597
15 (+)	0,0593	0,0600	0,0600	0,0605	0,0603	0,0601	0,0598
12 (+)	0,0607	0,0603	0,0601	0,0602	0,0604	0,0588	0,0596
9 (+)	0,0583	0,0591	0,0602	0,0578	0,0602	0,0603	0,0593
6 (+)	0,0593	0,0594	0,0596	0,0593	0,0580	0,0589	0,0591
3 (+)	0,0603	0,0602	0,0604	0,0606	0,0603	0,0586	0,0592
0	0,0602	0,0585	0,0579	0,0592	0,0581	0,0591	0,0589
3 (-)	0,0606	0,0591	0,0592	0,0593	0,0605	0,0587	0,0583
6 (-)	0,0593	0,0593	0,0591	0,0588	0,0604	0,0586	0,0594
9 (-)	0,0592	0,0588	0,0588	0,0594	0,0581	0,0593	0,0582
12 (-)	0,0596	0,0599	0,0604	0,0599	0,0588	0,0598	0,0592
15 (-)	0,0592	0,0608	0,0586	0,0604	0,0592	0,0599	0,0605
18 (-)	0,0597	0,0598	0,0599	0,0589	0,0595	0,0598	0,0596
21 (-)	0,0596	0,0585	0,0599	0,0601	0,0594	0,0591	0,0595
24 (-)	0,0595	0,0596	0,0597	0,0601	0,0587	0,0597	0,0602
27 (-)	0,0597	0,0599	0,0602	0,0603	0,0599	0,0601	0,0600
30 (-)	0,0600	0,0599	0,0599	0,0600	0,0597	0,0587	0,0597
33 (-)	0,0595	0,0593	0,0592	0,0593	0,0595	0,0594	0,0595
36 (-)	0,0597	0,0596	0,0586	0,0586	0,0592	0,0593	0,0592

Tablica 6.3. pruža prikaz broja sljedova simulacije AMC za slučaj relativne nesigurnosti od 2 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

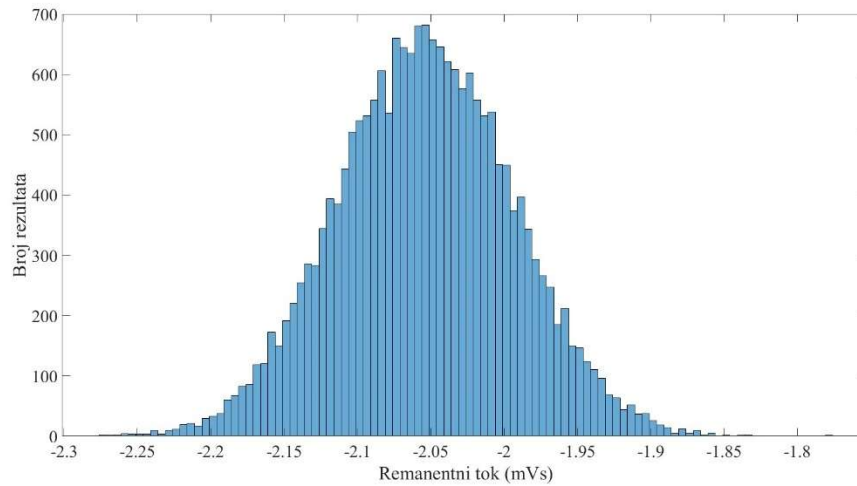
Tablica 6.3. Prikaz broja sljedova simulacije AMC pri relativnoj nesigurnosti od 2 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	142	156	142	142	172	152	165
33 (+)	192	169	163	170	136	171	163
30 (+)	186	179	173	143	175	113	168
27 (+)	140	145	181	164	152	149	156
24 (+)	162	172	166	178	139	169	162
21 (+)	168	148	162	178	165	148	167
18 (+)	163	145	167	2	147	143	134
15 (+)	170	171	161	187	167	186	184
12 (+)	188	155	158	178	130	154	157
9 (+)	142	168	193	140	172	172	145
6 (+)	159	2	189	159	134	161	147
3 (+)	174	189	191	145	161	168	163
0	158	189	157	186	184	150	131
3 (-)	150	163	159	132	186	167	156
6 (-)	145	136	142	157	165	158	171
9 (-)	164	145	138	165	145	165	154
12 (-)	174	176	162	174	161	163	177
15 (-)	159	184	147	163	190	174	171
18 (-)	205	159	192	153	167	185	184
21 (-)	188	148	150	139	153	125	170
24 (-)	175	159	183	167	162	153	166
27 (-)	180	126	152	164	153	2	172
30 (-)	164	176	184	187	171	165	153
33 (-)	161	171	171	143	196	153	160
36 (-)	183	150	132	155	187	161	194

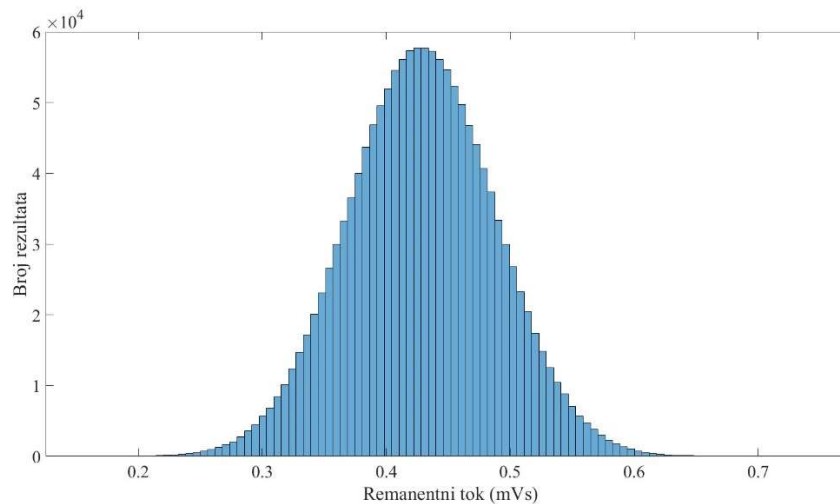
Za svaki parametar U_2 i α mjerna nesigurnost gotovo je ista, što je i prikazano u tablici 6.2. Broj sljedova simulacije H razlikuje se za svaki parametar, pri čemu je 2 najmanji, a 205 najveći broj sljedova za postizanje stabilnih rezultata prema tablici 6.3. Ukupno je provedeno 28.006 sljedova, odnosno 280.060.000 iteracija, što čini prosječno 160,03 sljedova po mjerenju.

Nadalje, kako bi se procijenio trend propagacije mjerne nesigurnosti potrebno je izračunati srednju vrijednost mjerne nesigurnosti zaostalog magnetskog toka. Prema izrazu (6-1), srednja vrijednost mjerne nesigurnosti iznosi 0,0626 mVs.

$$u_{SR} = \frac{1}{175} \sum_{i=1}^{175} u_{\Phi Ri} \quad (6-1)$$



Slika 6.1. Razdioba zaostalog magnetskog toka pri relativnoj nesigurnosti od 2 % za mali broj iteracija AMC simulacije



Slika 6.2. Razdioba zaostalog magnetskog toka pri relativnoj nesigurnosti od 2 % za veliki broj iteracija AMC simulacije

Napon sekundara predstavlja ulaznu veličinu kojoj je dodijeljena jedinična razdioba, dok su razdiobe zaostalog magnetskog toka vidljive na slikama 6.1. i 6.2. Iz toga se može uočiti da pri

manjem broju iteracija AMC simulacije dolazi do odstupanja od normalne razdiobe, dok su ta odstupanja za veći broj iteracija zanemariva. Međutim, u svim slučajevima zadovoljen je stabilizacijski kriterij.

Tablica 6.4. pruža prikaz srednjih vrijednosti zaostalog magnetskog toka, dobivenih simulacijom AMC, za slučaj relativne nesigurnosti od 4 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.4. Prikaz dobivenih srednjih vrijednosti zaostalog magnetskog toka izraženog u mVs pri relativnoj nesigurnosti od 4 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,0819	3,0827	3,0847	3,0811	3,0797	3,0789	3,0755
33 (+)	2,7527	2,7882	2,7576	2,7462	2,7474	2,7502	2,7652
30 (+)	2,1229	2,1787	2,1638	2,3698	2,3302	2,1792	2,3371
27 (+)	1,8051	1,8815	2,1036	2,0787	1,8728	1,8636	2,0554
24 (+)	1,6047	1,7214	1,5576	1,7048	1,6649	1,7495	1,6094
21 (+)	1,3234	1,4544	1,37811	1,3432	1,5363	1,3093	1,2429
18 (+)	1,1598	1,3274	1,0407	1,0178	1,2523	1,1895	1,2798
15 (+)	1,0040	1,0727	0,8683	1,0256	0,9139	0,8647	0,8915
12 (+)	0,5842	0,5073	0,6073	0,6875	0,5430	0,6446	0,6500
9 (+)	0,3762	0,3775	0,4437	0,3700	0,4536	0,3533	0,4280
6 (+)	0,2721	0,3308	0,3383	0,3101	0,3402	0,3119	0,2663
3 (+)	0,1664	0,1623	0,1864	0,1508	0,1804	0,1423	0,1487
0	-0,0487	0,0014	0,0018	0,0127	0,0511	-0,0372	-0,0239
3 (-)	-0,1546	-0,1281	-0,1295	-0,1396	-0,1404	-0,1566	-0,1515
6 (-)	-0,3086	-0,2616	-0,2793	-0,2700	-0,3057	-0,3410	-0,3348
9 (-)	-0,4424	-0,3850	-0,3387	-0,4560	-0,3819	-0,4369	-0,4304
12 (-)	-0,7155	-0,7375	-0,7143	-0,6908	-0,6457	-0,8001	-0,6154
15 (-)	-0,9925	-0,7561	-0,8020	-0,9750	-0,8784	-0,8870	-0,9880
18 (-)	-1,0654	-1,1270	-1,0871	-0,9170	-1,0069	-1,0996	-1,2393
21 (-)	-1,4580	-1,2609	-1,1950	-1,4467	-1,3601	-1,3607	-1,2078
24 (-)	-1,5423	-1,6597	-1,7717	-1,7307	-1,5012	-1,5915	-1,8460
27 (-)	-1,8485	-1,8243	-1,8363	-2,0663	-1,8499	-2,0544	-1,9154
30 (-)	-2,1594	-2,2423	-2,2939	-2,1803	-2,2367	-2,1150	-2,2911
33 (-)	-2,7241	-2,7357	-2,7277	-2,7021	-2,6899	-2,7484	-2,7317
36 (-)	-3,0523	-3,0487	-3,0288	-3,0431	-3,0478	-3,0553	-3,0571

Tablica 6.5. pruža prikaz mjernih nesigurnosti, dobivenih simulacijom AMC, za slučaj relativne nesigurnosti od 4 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.5. Prikaz dobivenih mjernih nesigurnosti u mVs pri relativnoj nesigurnosti od 4 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	0,1201	0,1189	0,1195	0,1194	0,1203	0,1195	0,1190
33 (+)	0,1196	0,1199	0,1185	0,1178	0,1195	0,1196	0,1196
30 (+)	0,1179	0,1192	0,1194	0,1196	0,1189	0,1197	0,1172
27 (+)	0,1175	0,1204	0,1192	0,1186	0,1187	0,1185	0,1165
24 (+)	0,1189	0,1204	0,1193	0,1201	0,1182	0,1174	0,1196
21 (+)	0,1199	0,1192	0,1185	0,1195	0,1200	0,1192	0,1158
18 (+)	0,1190	0,1197	0,1205	0,1202	0,1175	0,1183	0,1197
15 (+)	0,1185	0,1203	0,1199	0,1204	0,1211	0,1192	0,1203
12 (+)	0,1211	0,1205	0,1204	0,1197	0,1207	0,1172	0,1184
9 (+)	0,1166	0,1185	0,1209	0,1152	0,1203	0,1205	0,1183
6 (+)	0,1189	0,1193	0,1194	0,1185	0,1157	0,1174	0,1182
3 (+)	0,1202	0,1208	0,1210	0,1210	0,1199	0,1181	0,1184
0	0,1200	0,1173	0,1163	0,1184	0,1164	0,1192	0,1180
3 (-)	0,1213	0,1178	0,1180	0,1189	0,1208	0,1174	0,1168
6 (-)	0,1186	0,1183	0,1181	0,1176	0,1209	0,1166	0,1190
9 (-)	0,1178	0,1176	0,1171	0,1188	0,1146	0,1186	0,1163
12 (-)	0,1202	0,1200	0,1209	0,1203	0,1186	0,1195	0,1181
15 (-)	0,1182	0,1213	0,1174	0,1210	0,1185	0,1199	0,1211
18 (-)	0,1195	0,1187	0,1198	0,1178	0,1191	0,1195	0,1194
21 (-)	0,1186	0,1161	0,1199	0,1203	0,1187	0,1181	0,1186
24 (-)	0,1190	0,1194	0,1198	0,1204	0,1171	0,1192	0,1200
27 (-)	0,1189	0,1210	0,1205	0,1205	0,1202	0,1206	0,1198
30 (-)	0,1202	0,1190	0,1187	0,1192	0,1199	0,1174	0,1198
33 (-)	0,1194	0,1179	0,1187	0,1182	0,1182	0,1182	0,1190
36 (-)	0,1201	0,1194	0,1173	0,1167	0,1184	0,1185	0,1181

Tablica 6.6. pruža prikaz boja sljedova simulacije AMC za slučaj relativne nesigurnosti od 4 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.6. Prikaz broja sljedova simulacije AMC pri relativnoj nesigurnosti od 4 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	8	13	5	6	7	2	5
33 (+)	9	3	8	7	2	2	2
30 (+)	10	2	6	5	2	5	2
27 (+)	8	4	10	5	4	16	9
24 (+)	8	2	2	4	6	2	6
21 (+)	7	10	6	7	5	3	2
18 (+)	8	2	6	6	9	12	2
15 (+)	7	11	2	11	2	2	2
12 (+)	6	2	6	3	7	6	2
9 (+)	9	10	3	6	8	10	5
6 (+)	3	9	8	14	7	11	9
3 (+)	10	3	8	10	3	4	8
0	2	2	7	6	6	2	10
3 (-)	6	8	2	6	2	3	11
6 (-)	2	4	2	6	2	2	10
9 (-)	3	9	10	2	2	2	2
12 (-)	2	6	11	2	2	10	5
15 (-)	10	5	6	9	12	7	10
18 (-)	7	6	6	2	7	4	5
21 (-)	7	6	6	8	8	2	2
24 (-)	5	6	3	6	2	6	8
27 (-)	3	2	4	2	11	8	2
30 (-)	6	3	4	2	2	2	5
33 (-)	17	3	2	11	6	3	12
36 (-)	2	4	2	3	11	6	2

Za svaki parametar U_2 i α , mjerna nesigurnost gotovo je ista, što je prikazano u tablici 6.5. Broj sljedova simulacije H razlikuje se za svaki parametar, pri čemu je 2 najmanji, a 17 najveći broj sljedova za postizanje stabilnih rezultata prema tablici 6.6. Ukupno je provedeno 985 sljedova, odnosno 9.580.000 iteracija, što čini prosječno 5,36 sljedova po mjerenju.

Prema (6-1), srednja vrijednost mjerne nesigurnosti pri relativnoj nesigurnosti od 2 % za izmjereni napon sekundarnog namota iznosi 0,1183 mVs.

Tablica 6.7. pruža prikaz srednjih vrijednosti zaostalog magnetskog toka, dobivenih simulacijom AMC, za slučaj relativne nesigurnosti od 6 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.7. Prikaz dobivenih srednjih vrijednosti zaostalog magnetskog toka izraženog u mVs pri relativnoj nesigurnosti od 6 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,0809	3,0829	3,0840	3,0798	3,0783	3,0784	3,0757
33 (+)	2,7527	2,7882	2,7588	2,7465	2,7475	2,7506	2,7659
30 (+)	2,1257	2,1782	2,1641	2,3692	2,3301	2,1778	2,3356
27 (+)	1,8051	1,8832	2,1023	2,0779	1,8728	1,8632	2,0557
24 (+)	1,6063	1,7204	1,5569	1,7054	1,6647	1,7527	1,6100
21 (+)	1,3221	1,4542	1,3771	1,3440	1,5360	1,3086	1,2406
18 (+)	1,1601	1,3261	1,0411	1,0172	1,2521	1,1885	1,2807
15 (+)	1,0036	1,0730	0,8697	1,0263	0,9132	0,8643	0,8928
12 (+)	0,5837	0,5077	0,6066	0,6898	0,5433	0,6449	0,6494
9 (+)	0,3768	0,3784	0,4446	0,3704	0,4545	0,3535	0,4295
6 (+)	0,2727	0,3315	0,3375	0,3104	0,3409	0,3114	0,2669
3 (+)	0,1673	0,1626	0,1858	0,1510	0,1806	0,1427	0,1478
0	-0,0479	0,0031	0,0022	0,0128	0,0516	-0,0375	-0,0232
3 (-)	-0,1547	-0,1288	-0,1303	-0,1391	-0,1398	-0,1556	-0,1510
6 (-)	-0,3083	-0,2628	-0,2788	-0,2696	-0,3069	-0,3419	-0,3343
9 (-)	-0,4413	-0,3867	-0,3392	-0,4559	-0,3810	-0,4378	-0,4298
12 (-)	-0,7137	-0,7383	-0,7114	-0,6909	-0,6437	-0,8007	-0,6138
15 (-)	-0,9917	-0,7383	-0,8022	-0,9736	-0,8784	-0,8860	-0,9889
18 (-)	-1,0652	-1,1264	-1,0865	-0,9170	-1,0059	-1,0996	-1,2386
21 (-)	-1,4577	-1,2614	-1,1945	-1,4458	-1,3607	-1,3599	-1,2069
24 (-)	-1,5426	-1,6616	-1,7714	-1,7315	-1,5017	-1,5902	-1,8459
27 (-)	-1,8470	-1,8249	-1,8367	-2,0675	-1,8500	-2,0537	-1,9157
30 (-)	-2,1596	-2,2412	-2,2928	-2,1801	-2,2372	-2,1155	-2,2906
33 (-)	-2,7256	-2,7354	-2,7268	-2,7018	-2,6896	-2,7494	-2,7322
36 (-)	-3,0515	-3,0494	-3,0277	-3,0434	-3,0453	-3,0556	-3,0578

Tablica 6.8. pruža prikaz mjernih nesigurnosti, dobivenih simulacijom AMC za slučaj relativne nesigurnosti od 6 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.8. Prikaz dobivenih mjernih nesigurnosti u mVs pri relativnoj nesigurnosti od 6 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	0,1792	0,1787	0,1791	0,1797	0,1795	0,1804	0,1797
33 (+)	0,1781	0,1795	0,1774	0,1782	0,1792	0,1781	0,1786
30 (+)	0,1766	0,1793	0,1793	0,1791	0,1785	0,1791	0,1764
27 (+)	0,1765	0,1788	0,1787	0,1782	0,1781	0,1780	0,1752
24 (+)	0,1791	0,1798	0,1793	0,1794	0,1772	0,1777	0,1793
21 (+)	0,1799	0,1789	0,1776	0,1781	0,1794	0,1787	0,1745
18 (+)	0,1789	0,1805	0,1806	0,1801	0,1759	0,1783	0,1792
15 (+)	0,1782	0,1801	0,1805	0,1813	0,1815	0,1812	0,1792
12 (+)	0,1817	0,1812	0,1808	0,1809	0,1806	0,1770	0,1787
9 (+)	0,1743	0,1766	0,1809	0,1731	0,1802	0,1805	0,1775
6 (+)	0,1784	0,1785	0,1793	0,1788	0,1728	0,1766	0,1774
3 (+)	0,1808	0,1796	0,1810	0,1820	0,1809	0,1760	0,1773
0	0,1806	0,1749	0,1748	0,1785	0,1747	0,1770	0,1767
3 (-)	0,1820	0,1779	0,1773	0,1777	0,1814	0,1756	0,1744
6 (-)	0,1779	0,1775	0,1776	0,1760	0,1808	0,1759	0,1785
9 (-)	0,1785	0,1765	0,1764	0,1783	0,1747	0,1777	0,1747
12 (-)	0,1790	0,1796	0,1814	0,1793	0,1762	0,1791	0,1777
15 (-)	0,1772	0,1821	0,1756	0,1807	0,1790	0,1798	0,1814
18 (-)	0,1784	0,1797	0,1793	0,1768	0,1785	0,1791	0,1793
21 (-)	0,1791	0,1755	0,1799	0,1799	0,1778	0,1773	0,1781
24 (-)	0,1791	0,1788	0,1789	0,1808	0,1765	0,1789	0,1804
27 (-)	0,1787	0,1791	0,1805	0,1803	0,1796	0,1809	0,1803
30 (-)	0,1804	0,1792	0,1795	0,1798	0,1786	0,1760	0,1793
33 (-)	0,1794	0,1780	0,1774	0,1783	0,1789	0,1781	0,1780
36 (-)	0,1793	0,1782	0,1757	0,1757	0,1772	0,1779	0,1776

Tablica 6.9. pruža prikaz broja sljedova simulacije AMC za slučaj relativne nesigurnosti od 6 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

Tablica 6.9. Prikaz broja sljedova simulacije AMC pri relativnoj nesigurnosti od 6 % za izmjereni napon sekundarnog namota.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	21	19	20	25	19	6	4
33 (+)	2	17	9	20	20	18	20
30 (+)	2	17	20	13	15	22	2
27 (+)	16	2	8	13	16	8	10
24 (+)	3	22	17	18	24	2	6
21 (+)	2	20	7	3	14	20	3
18 (+)	16	16	22	19	12	18	4
15 (+)	15	6	2	18	2	16	19
12 (+)	17	17	11	2	11	2	17
9 (+)	2	14	20	14	2	10	16
6 (+)	15	2	3	16	4	19	19
3 (+)	25	11	11	16	26	12	11
0	14	14	4	15	21	12	16
3 (-)	24	18	9	18	20	10	11
6 (-)	15	19	2	13	8	22	16
9 (-)	2	16	17	14	24	21	12
12 (-)	16	7	2	14	18	20	2
15 (-)	15	13	26	23	2	17	19
18 (-)	2	9	16	12	14	18	18
21 (-)	17	23	12	20	21	8	7
24 (-)	2	2	24	17	26	2	25
27 (-)	20	13	15	2	22	14	9
30 (-)	20	13	2	10	2	2	2
33 (-)	5	20	18	19	20	17	8
36 (-)	14	2	10	6	3	16	18

Za svaki parametar U_2 i α mjerna nesigurnost gotovo je ista, što je prikazano u tablici 6.8. Broj sljedova simulacije H razlikuje se za svaki parametar, pri čemu je 2 najmanji, a 26 najveći broj sljedova za postizanje stabilnih rezultata prema tablici 6.9. Ukupno je provedeno 2.293 sljedova, odnosno 22.930.000 iteracija, što čini prosječno 13,10 sljedova po mjerenju.

Prema (6-1), srednja vrijednost mjerne nesigurnosti pri relativnoj nesigurnosti od 6 % za izmjereni napon sekundarnog namota iznosi 0,1785 mVs.

Tablica 6.10. prikaz je trenda propagacije mjerne nesigurnosti za 2 %, 4 % i 6 % relativne nesigurnosti za napon sekundarnog namota.

Tablica 6.10. Usporedba srednjih vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti i prosječnog broja sljedova po mjerenju za 2 %, 4 % i 6 % relativne nesigurnosti za napon sekundarnog namota.

Relativna nesigurnost mjerene veličine	Srednja vrijednost mj. nes., u_{SR} (mVs)	Prosječan broj sljedova
2 %	0,0623	160,03
4 %	0,1183	5,36
6 %	0,1785	13,10

Prema podacima iz tablice 6.10., trend propagacije mjerne nesigurnosti zaostalog magnetskog toka linearan je pri linearnom povećanju nesigurnosti napona sekundara. Nadalje, najveći broj sljedova po mjerenju bio je pri nesigurnosti od 2 %, a najmanji pri 4 %.

7. ZAKLJUČAK

Zaostali magnetski tok u feromagnetskoj jezgri transformatora često je uzrok nastalih smetnji u elektroenergetskom sustavu, posebno prilikom uklopa na nazivni napon. Praktično nije moguće izravno mjerenje zaostalog toka zbog njegovog zatvorenog položaja u jezgri. S druge strane, neizravne metode imaju mnoge nedostatke, što stvara potrebu za novim metodama koje koje mogu pouzdano i precizno odrediti remanentni tok na prije samog uklopa, kao i određivanje remanentnog toka pri čemu je očuvana njegova vrijednost na kraju postupka.

Metoda određivanja zaostalog magnetskog toka pri ustaljenom stanju, koje je uspostavljeno nakon što je transformator uklopljen na nazivni napon, pouzdana je i precizna pri čemu nisu potrebne informacije o prethodnom stanju i parametrima, već je dovoljno izmjeriti napon neopterećenog sekundara transformatora. Nadalje, metoda omogućuje proučavanje načina na koje promjene u mreži ili vanjska elektromagnetska polja utječu na zaostali magnetski tok, te se može koristiti u svrhu istraživanja načina na koje se mijenja zaostali magnetski tok s vremenom, bez vanjskih utjecaja. Metoda koja se najviše koristi kako bi se smanjila udarna struja podrazumijeva određivanje zaostalog toka pri isklopu transformatora i pretpostavlja da se taj tok neće promijeniti do ponovnog uklopa. Ipak, postoje dokazi kako vrijednosti zaostalog magnetskog toka mogu biti promijenjene, iako nije bilo vanjskih utjecaja. Iz tog razloga, prethodna metoda može se koristiti pri određivanju zaostalog magnetskog toka pri isklopu, dok se ova metoda koristi pri određivanju zaostalog magnetskog toka na kraju kada transformator nije uklopljen. Izmjerene vrijednosti mogu se usporediti, čime se može dokazati kako se zaostali magnetski tok mijenja tijekom vremena, s obzirom na vanjske ili neke druge utjecaje. Glavni problem s ovom metodom je što dolazi do promjene zaostalog toka u jezgri tijekom mjerenja, a to znatno sužava područje primjene. Shodno tome, metoda nije pogodna za upravljanje udarnim strujama kontroliranim uklopom.

Trend propagacije mjerne nesigurnosti za 2 %, 4 % i 6 % relativne nesigurnosti za napon sekundarnog namota je linearan za ovu metodu. Naponu sekundara pridružena je jedinična normalna razdioba, dok izlazni signal zaostalog toka slijedi normalnu razdiobu. Značajnija odstupanja od normalne razdiobe prisutna su za manji broj iteracija, dok su odstupanja pri većem broju iteracija u simulaciji AMC gotovo zanemariva.

LITERATURA

- [1] Magnetski tok. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013., dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/magnetski-tok>. [26.5.2024.].
- [2] B. Kuzmanović, Osnove elektrotehnike I, Element, Zagreb, 2000.
- [3] D. Vulin, FERIT, Doktorski rad, Metode određivanja remanentnog magnetskog toka u magnetskoj jezgri, 2020.
- [4] Z. Godec, Iskazivanje mjernog rezultata, Graphis, Zagreb, 1995.
- [5] Z. Godec, Cjelovit mjerni rezultat, Elektrotehnika, br. 5-6, sv. 41, str. 187-189, 1998., dostupno na: <https://www.bib.irb.hr:8443/43731>. [24.6.2024.]
- [6] K. Miličević, FERIT, predavanja iz kolegija Osnove mjerenja, 2022.
- [7] N. Metropolis, The Beginning of the Monte Carlo Method, Los Alamos Science Special Issue, sv. 15, str. 125-130, 1987., dostupno na: <https://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326866.pdf>. [13.6.2024.]
- [8] Weisstein, Eric W., Monte Carlo Method, From MathWorld--A Wolfram Web Resource, dostupno na: <https://mathworld.wolfram.com/MonteCarloMethod.html>. [13.6.2024.].
- [9] M. Uroić, Uvod u Monte Carlo metodu, *Matematičko fizički list*, br. 246, sv. 62, str. 87-92, 2011., dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/354540>. [13.6.2024.]
- [10] D. Crnjac Milić, D. Masle, Mogućnost primjene Monte Carlo metode na primjeru agroekonomskog problema prilikom donošenja odluka u uvjetima rizika, *Ekonomski vjesnik*, br. 1, sv. 26, str. 309-313, 2013., dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/159533>. [18.6.2024.]

SAŽETAK

Ovaj rad definira pojam remanentnog magnetskog toka i mjerne nesigurnosti. Nadalje, pruža opis adaptivne Monte Carlo metode i metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon. Primjenom adaptivne Monte Carlo metode, procijenjena je propagacija relativne mjerne nesigurnosti mjerene veličine za pomenutu metodu pomoću programskog paketa MATLAB.

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

ABSTRACT

ESTIMATION OF PROPAGATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY USING THE ADAPTIVE MONTE CARLO METHOD IN DETERMINING THE REMANENT FLUX BASED ON THE STEADY STATE ESTABLISHED AFTER ENERGIZING THE TRANSFORMER AT THE NOMINAL ALTERNATING VOLTAGE

This paper defines the concept of remanent magnetic flux and measurement uncertainty. Furthermore, it provides a description of the adaptive Monte Carlo method and the method of determining the remanent flux in the magnetic core based on the steady state established after the transformer is connected to the rated alternating voltage. Using the adaptive Monte Carlo method, the propagation of relative measurement uncertainty of the measured quantity for the specified method was estimated with MATLAB software.

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

ŽIVOTOPIS

Veronika Šumić rođena je 18. listopada 2001. godine u Žepču. Pohađala je Osnovnu školu „Žepče“ u Žepču koju završava s odličnim uspjehom. Nakon osnovne škole, upisuje Opću gimnaziju u Katoličkom školskom centru „Don Bosco“ Žepče, gdje također postiže odličan uspjeh i uzorno vladanje. Tijekom školovanja sudjelovala je na brojnim školskim i općinskim natjecanjima iz matematike, fizike i informatike, gdje je i postigla mnoge izvrsne rezultate. Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek upisuje 2021. godine, te na drugoj godini studija odabire izborni blok elektroenergetika.

PRILOZI

U dodatku ovom radu, u elektroničkom formatu na CD-u, nalazi se:

- MATLAB skripta pod nazivom „Metoda_1.m“ za metodu određivanja zaostalog magnetskog toka na temelju ustaljenog stanja koje je uspostavljeno nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon;
- MATLAB skripte pod nazivom „Metoda_1_AMC.m“ i „AMC_funkcija_1.m“ za procjenu propagacije mjerne nesigurnosti;
- Rezultati mjerenja koji se odnose na obrađivanu metodu u datoteci „Rezultati mjerenja“.