

METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA U MAGNETSKOJ JEZGRI

Vulin, Dragan

Doctoral thesis / Disertacija

2020

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:200:834785>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA
O S I J E K**

Dragan Vulin

**METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA U
MAGNETSKOJ JEZGRI**

Doktorski rad

Osijek, 2020.

Doktorski rad je izrađen u Zavodu za elektrostrojarstvo Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.

Mentor: **prof. dr. sc. Kruno Miličević**

Doktorski rad ima 151 stranicu.

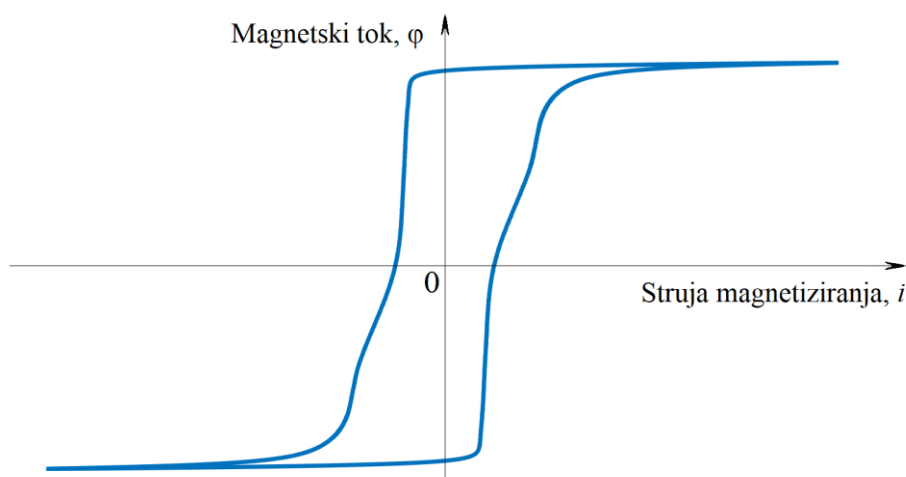
Doktorski rad br.: 78

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. LABORATORIJSKI SUSTAV I MJERNI POSTUPAK.....	11
2.1. Komponente laboratorijskog sustava i mjerna oprema	11
2.2. Postavljanje početne vrijednosti remanentnog toka	16
3. METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA NAKON UKLOPA TRANSFORMATORA NA NAZIVNI IZMJENIČNI, ODNOSNO NISKI ISTOSMJERNI NAPON.....	22
3.1. Metoda određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon	23
3.2. Metoda određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon	38
3.3. Metoda određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na niski istosmjerni napon	45
4. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA ANALIZIRANJEM MALE PETLJE HISTEREZE.....	54
4.1. Teorijska podloga	55
4.2. Rezultati mjerenja.....	56
5. PROCJENA PROPAGACIJE MJERNE NESIGURNOSTI MJERENIH VELIČINA ZA METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA PRIMJENOM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE.....	79
5.1. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon	85
5.2. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon	101
5.3. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na niski istosmjerni napon	117
5.4. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina za metodu određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze	126
6. ZAKLJUČAK.....	136
LITERATURA	140
SAŽETAK.....	147
ABSTRACT	148
ŽIVOTOPIS.....	149
PRILOZI	150

1. UVOD

Remanentni magnetski tok (Φ_R) u željeznoj jezgri transformatora ili zavojnice može uzrokovati značajne probleme u radu elektroenergetskog sustava ako njegova vrijednost nije poznata. U ovom radu, razmatran je samo jednofazni neopterećeni transformator, odnosno transformator kojemu je sekundar u praznom hodu, ali sve predstavljene metode mogu se primijeniti i na zavojnicu sa željeznom jezgrom. Pri isključenju transformatora s napajanja, u feromagnetskoj (željeznoj) jezgri ostat će određeni iznos remanentnog toka koji se još naziva i zaostalim magnetskim tokom ili remanencijom. Magnetske karakteristike transformatora često se prikazuju u φ - i ravnini, odnosno ravnini koja prikazuje ovisnost magnetskog toka (φ) u jezgri transformatora o struji magnetiziranja (i) koja teče jednim namotom transformatora. Zatvorena krivulja u φ - i ravnini koja je posljedica izmjeničnog napona napajanja u periodičkom režimu rada kada se transformator nalazi u ustaljenom stanju naziva se petljom histereze. Nadalje, najveća petlja histereze za promatrani transformator pri određenoj frekvenciji napona napajanja naziva se glavnom petljom histereze. Primjer glavne petlje histereze transformatora u φ - i ravnini prikazan je na slici 1.1.

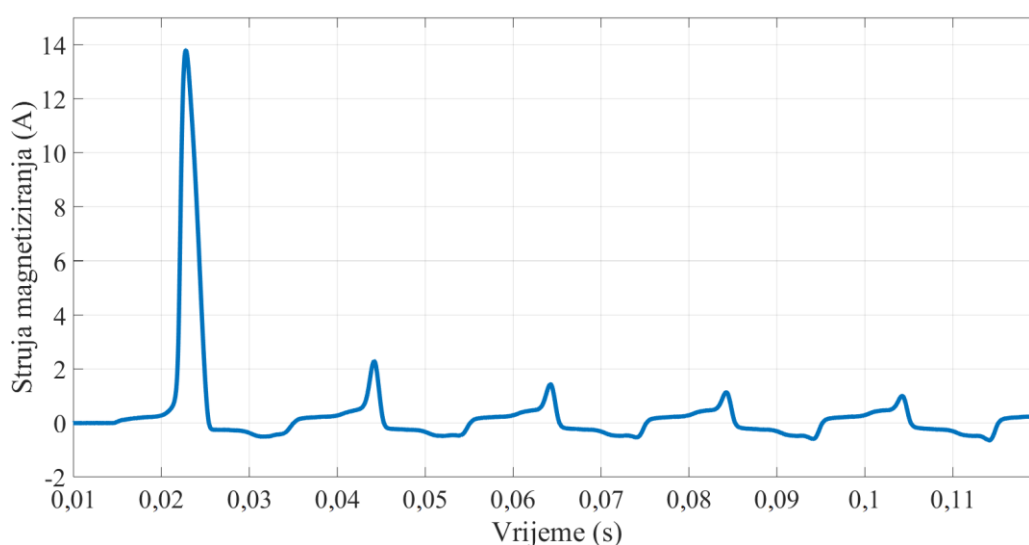


Slika 1.1. Primjer glavne petlje histereze transformatora u φ - i ravnini.

Daljnjim povećanjem amplitude napona napajanja pri istoj frekvenciji, površina petlje histereze više se neće mijenjati. Radna točka, odnosno trenutne vrijednosti u φ - i ravnini u tom će slučaju samo odlaziti dublje u područje zasićenja (pozitivno ili negativno), vraćajući se po istoj liniji. Kada radna točka ode u područje zasićenja, to znači da je jezgra dosegla najveći iznos magnetskog toka koji može primiti, a tok iznad te vrijednosti zapravo prolazi prostorom jezgre i

okolnog područja, ali uz relativnu magnetsku permeabilnost toga prostora jednaku jedinici. Sve ostale petlje histereze za promatrani transformator nazivaju se malim petljama histereze. Remanentni tok je magnetski tok koji ostane u jezgri transformatora nakon isklopa, odnosno nakon isključenja napajanja, te se stoga u φ -i ravnini mora nalaziti na φ -osi. Također, njegova apsolutna vrijednost ne može biti veća od vrijednosti magnetskog toka pri kojoj glavna petlja histereze presijeca φ -os.

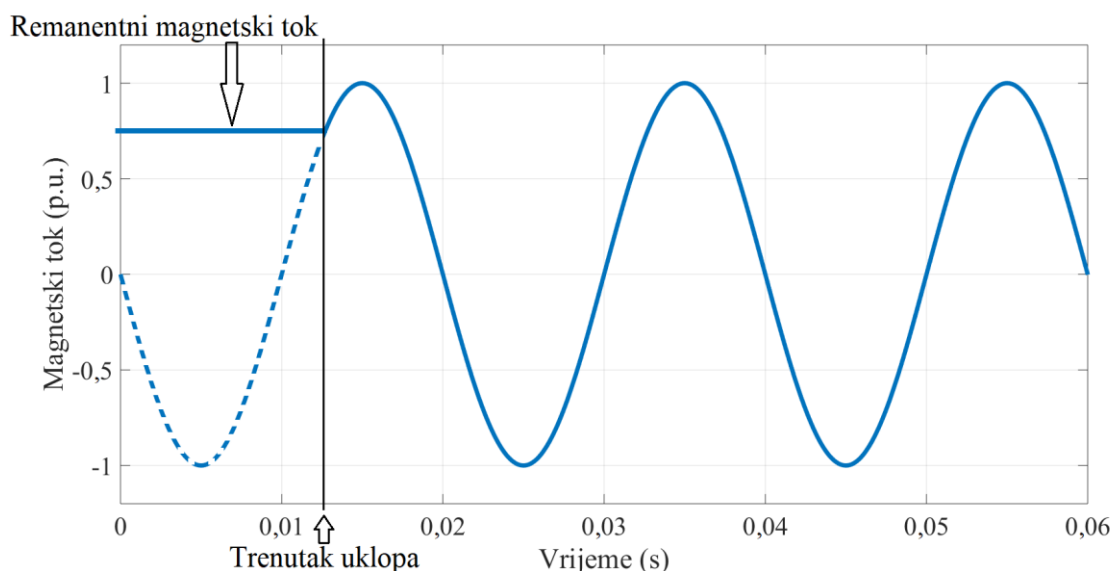
Određivanje remanentnog toka važno je u nekoliko područja, pri čemu je najviše istraživano područje smanjenja udarne struje pri uklopu transformatora [1 – 19]. Naime, prilikom uklopa neopterećenog transformatora na nazivni napon, može se pojaviti udarna struja magnetiziranja koja može uzrokovati niz neželjenih posljedica u sustavu, kao što su nepravilan rad zaštitnih releja i osigurača, rezonancija, mehanička oštećenja namota, oštećenja izolacije te propadi napona. Uobičajeni valni oblik takve struje prikazan je na slici 1.2.



Slika 1.2. Uobičajeni valni oblik udarne struje magnetiziranja.

Glavne značajke udarne struje magnetiziranja su relativno velika vršna vrijednost u prvoj periodu te značajna asimetrija valnog oblika. Vršna vrijednost i trajanje prijelazne pojave ovise o nekoliko faktora, od kojih najveći utjecaj imaju fazni kut napona napajanja i remanentni tok u jezgri u trenutku uklopa, magnetska karakteristika jezgre (φ -i karakteristika) te djelatni otpor primarnog namota. Izvedba transformatora, vrsta spoja namota (ako je trofazni), topologija mreže te karakteristika prekidača također mogu utjecati na udarnu struju.

Kontrolirani uklop, odnosno biranje faznog kuta napona napajanja u trenutku uklopa najčešće je korištena strategija za smanjenje udarne struje magnetiziranja. Naime, optimalan fazni kut (trenutak) uklopa neopterećenog transformatora je kut pri kojemu bi magnetski tok u slučaju da je transformator spojen na nazivni napon u ustaljenom stanju, bio jednak remanentnom toku, kao što je prikazano na slici 1.3.



Slika 1.3. Optimalan trenutak uklopa neopterećenog transformatora.

U suprotnom, ako transformator ne uklopi pri optimalnom faznom kutu, odnosno u optimalnom trenutku, jezgra će otići u područje zasićenja što će uzrokovati pojavu udarne struje. Dakle, za učinkovitu primjenu strategije kontroliranog uklopa potrebno je znati vrijednost remanentnog toka u jezgri u trenutku uklopa. Neke od ostalih strategija za smanjenje udarne struje magnetiziranja su promjena položaja namota transformatora [20], smanjenje udarne struje s pomoću sklopova energetske elektronike [21 – 27], korištenje serijskih otpora [28, 29], te korištenje virtualnog zračnog rasporeda [30].

Nadalje, sljedeće područje u kojemu remanentni tok ima važnu ulogu je sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora [31 – 36]. Naime, zasićenje jezgre strujnog transformatora može negativno utjecati na pouzdan i ispravan rad zaštitnih releja [35]. Niz rezultata ostvaren je u području identifikacije i kompenzacije zasićenja strujnog transformatora [37 – 40], ali remanentni tok i dalje značajno utječe na zasićenje jezgre, posebice za vrijeme prijelaznog stanja, te uzrokuje značajna izobličenja izlaznog signala [34]. Ovaj problem posebno dolazi do izražaja kada sustav radi u režimu automatskog ponovnog uklopa [35]. U tom slučaju, nakon

pojave kvara i isklopa pripadajućeg prekidača, značajan iznos remanentnog toka ostaje u jezgri strujnog transformatora. Ako kvar nije otklonjen prije drugog (automatskog) uklopa prekidača, jezgra može ući u duboko zasićenje pri čemu će izlazni signal biti značajno izobličen. Osnovne strategije sprječavanja zasićenja jezgre strujnog transformatora su korištenje materijala jezgre s visokom permeabilnošću i niskim maksimalnim remanentnim tokom, korištenje jezgre sa zračnim rasporom te korištenje elektroničkih strujnih transformatora [34]. Međutim, prethodno navedene strategije uglavnom povećavaju dimenzije i cijenu strujnog transformatora pa se često koristi metoda demagnetiziranja jezgre dok je prekidač isklopljen, odnosno u vremenskom intervalu između isklopa prekidača i automatskog ponovnog uklopa, koja ne utječe na strukturu i konstrukciju strujnog transformatora.

Još jedno područje u kojemu remanentni tok ima važnu ulogu je predviđanje pojave ferorezonancije koja je karakterizirana prenaponima i izobličenim valnim oblicima napona i struje [41 – 44]. Definira se kao promjena iz monoharmonijskog u višeharmonijsko ustaljeno stanje pri malim promjenama parametara sustava [45], u kojemu su prisutni značajno veći iznosi varijabli stanja od nazivnih. Sva ustaljena stanja, osim monoharmonijskog, smatraju se ferorezonantnim. Proučavanje pojave ferorezonancije posebno je važno operatorima prijenosnog i distribucijskog sustava jer ferorezonancija zbog uništavanja električke opreme uslijed prenapona, značajno utječe na pouzdanost elektroenergetskog sustava. Unatoč brojnim istraživanjima, pojava ferorezonancije još uvijek je relativno nepredvidiva u praksi. Stohastička priroda pojave ferorezonancije proizlazi iz osjetljivosti na parametre sustava i početne uvjete koji ne mogu biti određeni dovoljno precizno kako bi se pouzdano predvidjela pojava ferorezonancije [41]. Iz tog razloga, potrebno je odrediti vrijednost remanentnog toka kako bi se utvrdila ovisnost pojave ferorezonancije o početnom uvjetu remanentnog toka nelinearnog induktiviteta u ferorezonantnom krugu.

U svim prethodno navedenim područjima, magnetska jezgra najčešće formira zatvorenu petlju što znači da je magnetski tok zatvoren unutar jezgre te ne postoji izravan način mjerenja. Dodatno, neizravno određivanje remanentnog toka otežava činjenica što je remanentni tok vremenski nepromjenjiva veličina. To znači da ne uzrokuje induciranje napona u namotima transformatora. Međutim, u prethodno spomenutim područjima postoje metode određivanja remanentnog toka koje se koriste u praksi.

Najčešće korištena metoda određivanja remanentnog toka općenito, a koristi se za smanjenje udarne struje transformatora i predviđanje pojave ferorezonancije, je integriranje napona jednog od namota prilikom isklopa transformatora [1 – 5, 7, 12, 41, 46]. Osnovna ideja ove metode je snimati napon na jednom od namota transformatora neposredno prije isklopa te integriranjem toga napona izračunati magnetski tok u jezgri. Za vrijednost remanentnog toka uzima se vrijednost izračunatog magnetskog toka u trenutku isklopa. Glavni razlog za široku primjenu ove metode je njezina jednostavnost. Naime, remanentni tok određuje se samo iz napona jednog od namota, što ovu metodu u primjeni čini relativno jeftinom, s obzirom da je većina transformatora u elektroenergetskom sustavu već opremljena sustavom nadzora koji može biti korišten za snimanje napona. Međutim, za potrebe smanjenja udarne struje magnetiziranja, ova metoda temelji se na pretpostavci da se remanentni tok neće mijenjati do sljedećeg uklopa transformatora. To je i najveći nedostatak ove metode, s obzirom da se remanentni tok može mijenjati nakon isklopa ako je transformator na mrežu spojen preko prekidača s paralelnim kondenzatorima [47]. Također, remanentni tok može se mijenjati zbog magnetske viskoznosti čak i u slučaju da nema nikakvog vanjskog utjecaja [48]. Naime, demagnetizirana jezgra nije nužno u stanju energetske ravnoteže. Dodatno, značajan nedostatak ove metode je što remanentni tok ne može biti određen ako napon jednog od namota transformatora nije sniman prilikom isklopa.

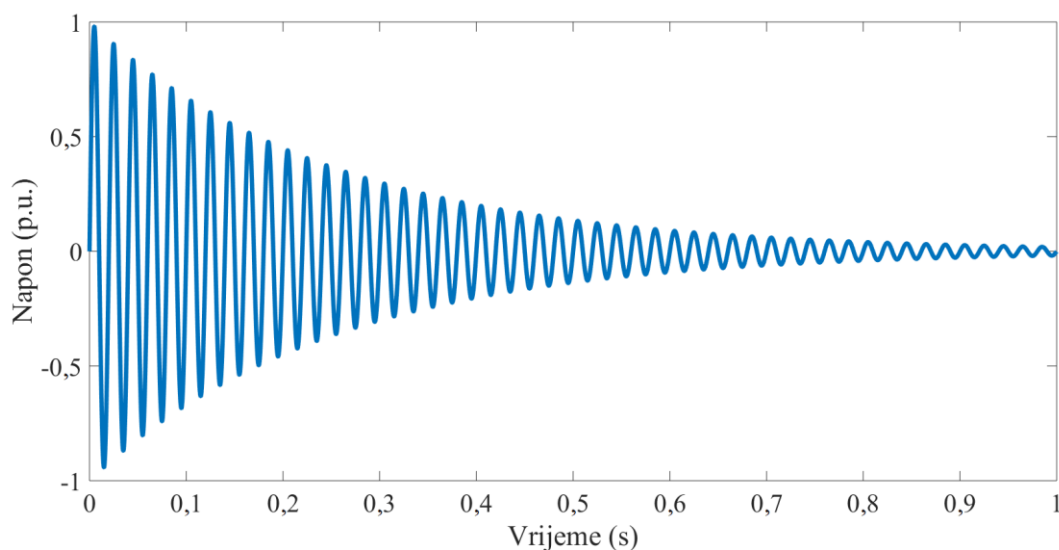
Remanentni tok može biti određen i mjerenjem rasipnog magnetskog toka u blizini jezgre [49, 50]. Ova metoda svodi se na procjenu remanentnog toka na temelju izmjerenog rasipnog magnetskog toka neposredno prije uklopa s pomoću senzora koji su trajno instalirani blizu jezgre. Kako bi ova metoda bila primjenjiva, potrebno je prethodno odrediti funkciju ovisnosti rasipnog toka o toku u jezgri. Prednost ove metode je što određuje, odnosno procjenjuje vrijednost remanentnog toka neposredno prije uklopa transformatora ako se koristi za smanjenje udarne struje magnetiziranja. To znači da, za razliku od prethodno navedene metode, uzima u obzir sve moguće promjene remanentnog toka od trenutka posljednjeg isklopa do novog uklopa. Međutim, ova metoda zahtijeva složenu tehničku izvedbu u smislu ugradnje senzora u neposrednoj blizini jezgre s obzirom na visoku temperaturu i agresivan okoliš u transformatorskom kotlu.

Također, remanentni tok može biti određen i na temelju mjerenja dinamičkog induktiviteta jednog od namota transformatora [51]. Prije korištenja ove metode, potrebno je testirati promatrani transformator te odrediti funkciju ovisnosti remanentnog toka o dinamičkom

induktivitetu. Dinamički induktivitet namota transformatora smanjivat će se povećanjem remanentnog toka u jezgri. Prednost ove metode je u korištenju relativno malog ispitnog naponskog signala koji ne izaziva promjenu remanentnog toka u jezgri prilikom postupka određivanja. To je posebno važno u primjeni za smanjenje udarne struje magnetiziranja jer se određivanje remanentnog toka može provesti neposredno prije uklopa. Međutim, promjena dinamičkog induktiviteta namota je svega oko 5 % za promjenu remanentnog toka od nulte do maksimalne vrijednosti pa je upitna preciznost ove metode.

Nadalje, remanentni tok može biti određen i analiziranjem valnog oblika struje magnetiziranja prilikom uklopa [52]. Osnovna ideja ove metode je uklop jednog namota transformatora na istosmjerni izvor relativno niskog napona i snimanje valnog oblika struje. Kao i kod prethodno navedene metode, i ovdje je potrebno prije korištenja metode testirati promatrani transformator te odrediti valni oblik struje magnetiziranja prilikom uklopa za sve moguće vrijednosti remanentnog toka. Nakon toga, postupak određivanja provodi se uklopom transformatora na istosmjerni izvor, snimanjem valnog oblika struje magnetiziranja, te usporedbom snimljenog valnog oblika s prethodno dobivenim valnim oblicima struje. Vrijednost remanentnog toka je ona pri kojoj se dva uspoređena valna oblika struje podudaraju. Međutim, nakon određivanja primjenom ove metode, remanentni tok u jezgri poprima maksimalnu vrijednost. To znači da remanentni tok koji je određen ovim postupkom neće biti očuvan nakon mjerenja, što značajno ograničava mogućnost primjene ove metode.

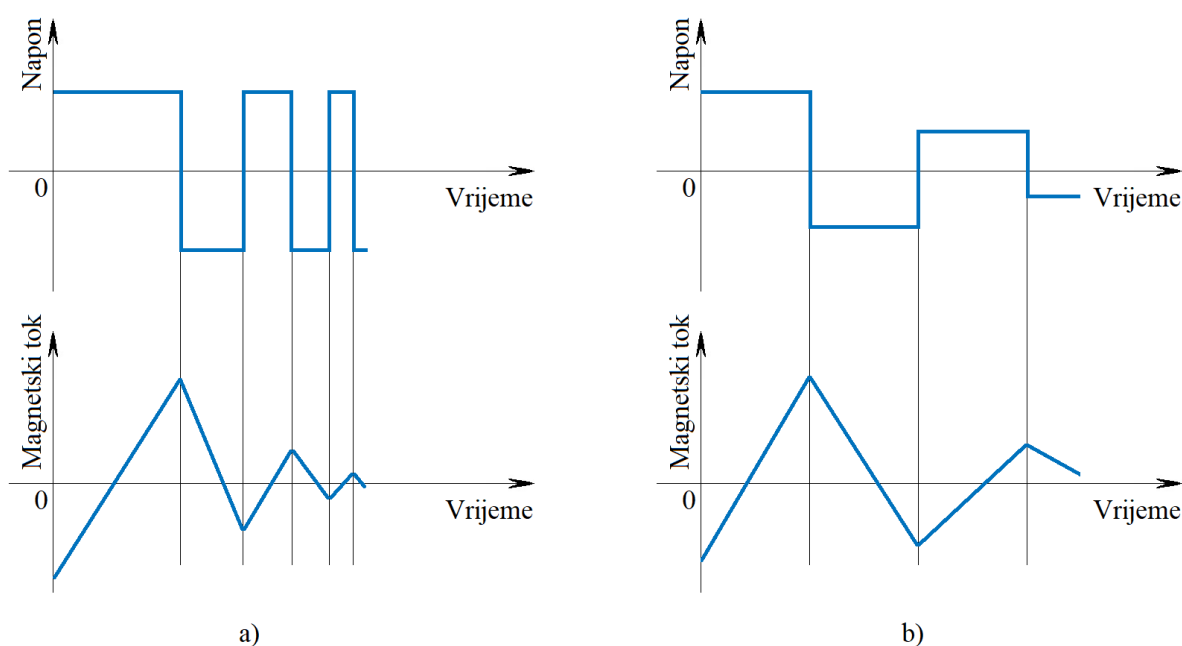
Postoje još dva postupka koja ne određuju iznos remanentnog toka, već ga postavljaju na neku poznatu vrijednost. Demagnetiziranje postavlja remanentni tok na nultu vrijednost, a najčešće se koristi za sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora [31 – 36] i za smanjenje udarne struje magnetiziranja [53 – 55], te može biti izvedeno na nekoliko načina. Konvencionalni način je izmjenično demagnetiziranje [56], a provodi se korištenjem promjenjivog izmjeničnog izvora napajanja na način da se polako snižava napon izvora spojenog na jedan od namota transformatora, kao što je prikazano na slici 1.4.



Slika 1.4. Postupak izmjeničnog demagnetiziranja.

Međutim, ovaj način demagnetiziranja zahtijeva promjenjivi izmjenični izvor napajanja maksimalnog napona približno jednakog nazivnom naponu transformatora, što je kod visokonaponskih transformatora teško izvedivo. Nadalje, vrijeme potrebno za provođenje postupka izmjeničnog demagnetiziranja pri frekvenciji od 50 Hz predugo je za neke primjene, primjerice kod sprječavanja zasićenja jezgre strujnog transformatora kada sustav radi u režimu automatskog ponovnog uklopa. Naime, u tom slučaju postupak demagnetiziranja mora biti obavljen u vremenu kraćem od trajanja intervala u kojemu je prekidač otvoren, a što je obično oko 200 milisekundi [35]. Stoga, češće se koriste metode u kojima se demagnetiziranje odvija s pomoću istosmjernog izvora [34, 35, 53 – 55]. Jedna od tih metoda je demagnetiziranje korištenjem nepromjenjivog napona i promjenjive frekvencije. U prvom koraku toga postupka, na transformator se narine negativni istosmjerni napon čime se jezgra iz neke nepoznate vrijednosti remanentnog toka dovede u negativno zasićenje. U sljedećem koraku, napon izvora mijenja polaritet te dovodi jezgru u pozitivno zasićenje, pri čemu se izmjeri vrijeme potrebno da jezgra dođe iz negativnog u pozitivno zasićenje. Nakon toga, napon izvora ponovno mijenja polaritet i magnetizira jezgru polovicu prethodno izmjerenog vremena. Na kraju, jezgra će biti demagnetizirana, odnosno remanentni tok bit će postavljen u nulu. Sljedeća metoda, koja također koristi istosmjerni izvor, demagnetiziranje provodi na način da se postupno povećava frekvencija promjene polariteta napona istosmjernog izvora [54]. Na taj se način amplituda magnetskog toka u jezgri smanjuje iz periode u periodu sve dok ne postigne nultu vrijednost, kao što je prikazano na slici 1.5. a). U primjeni ove metode važno je odrediti optimalno trajanje prvog intervala na način da dovedeni magnetski tok u tom intervalu bude približno jednak dvostrukom iznosu toka

zasićenja jezgre. Nadalje, taj iznos magnetskog toka treba postupno smanjivati u svakom sljedećem intervalu uz promjenu polariteta. Postoji još jedna metoda demagnetiziranja koja koristi istosmjerni izvor, ali promjenjivog napona. Naime, koristi se isti princip smanjenja amplitude magnetskog toka iz periode u periodu, ali uz nepromjenjivu frekvenciju i smanjenje iznosa napona istosmjernog izvora [54]. Dakle, trajanje intervala je jednako, a smanjenjem napona se amplituda magnetskog toka smanjuje iz periode u periodu sve dok ne postigne nultu vrijednost, kao što je prikazano na slici 1.5. b).

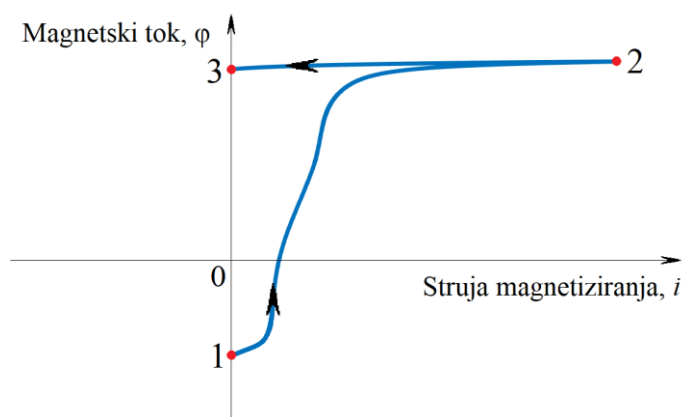


Slika 1.5. Postupak demagnetiziranja korištenjem istosmjernog izvora:
a) povećanjem frekvencije, **b)** smanjenjem napona.

Dvije prethodno opisane metode demagnetiziranja relativno su slične i podjednako učinkovite, ali češće se koristi metoda prikazana na slici 1.5. a). Razlog tome je jednostavnija izvedba s obzirom da se koristi istosmjerni izvor nepromjenjivog napona te kraći postupak demagnetiziranja u usporedbi s metodom prikazanom na slici 1.5. b).

Nadalje, predmagnetiziranje je postupak koji postavlja remanentni tok na maksimalnu vrijednost, a koristi se za smanjenje udarne struje magnetiziranja [57 – 59]. Naime, nakon postavljanja remanentnog toka na maksimalnu vrijednost, optimalan fazni kut uklopa relativno je jednostavno izračunati. Prije korištenja ove metode, potrebno je odrediti maksimalnu vrijednost remanentnog

toka promatranog transformatora iz glavne petlje histereze. Postupak predmagnetiziranja u φ - i ravnini prikazan je na slici 1.6.



Slika 1.6. Postupak predmagnetiziranja prikazan u φ - i ravnini.

Predmagnetiziranje se provodi na način da se iz neke nepoznate vrijednosti remanentnog toka (točka 1 na slici 1.6.) jezgra dovede u zasićenje (točka 2 na slici 1.6.), nakon čega se struja transformatora smanji na nultu vrijednost čime se radna točka u φ - i ravnini postavi na maksimalnu vrijednost remanentnog toka (točka 3 na slici 1.6.).

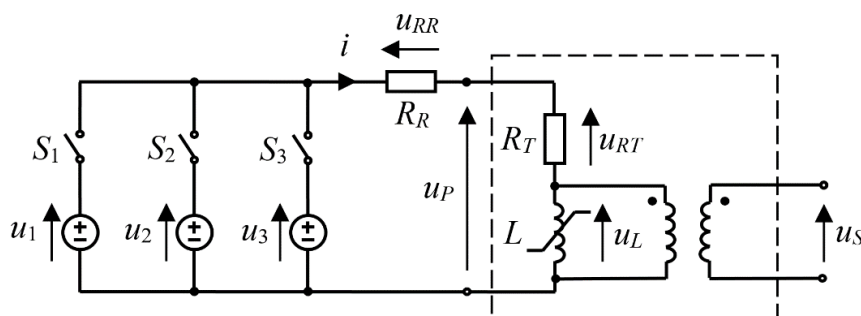
Dakle, vidljivo je kako postoji potreba za razvojem metoda koje će moći odgovoriti na dva izazova. Prvi je pouzdano i precizno odrediti remanentni tok na kraju razdoblja neuklopljenosti transformatora kako bi se mogao istražiti utjecaj tranzijenata u mreži te ostalih pojava poput vanjskih elektromagnetskih polja na remanentni tok u jezgri transformatora, ali i općenito odrediti ovisnost remanentnog toka o vremenu bez vanjskih utjecaja. Drugi izazov je odrediti remanentni tok uz uvjet da njegova vrijednost ne bude promijenjena nakon provođenja mjernog postupka. U ovom doktorskom radu razvijene su ukupno četiri metode koje mogu u potpunosti ili djelomično odgovoriti na prethodno navedene izazove.

U drugom poglavlju ovoga rada predstavljen je laboratorijski sustav i pripadajući mjerni postupak za postavljanje početne vrijednosti remanentnog toka te određivanje remanentnog toka u jezgri transformatora primjenom novorazvijenih metoda. U trećem poglavlju opisane su metode određivanja remanentnog toka u jezgri transformatora nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični, odnosno niski istosmjerni napon. U prvoj metodi, tok je određen na temelju novog ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični

napon pri čemu je precizna vrijednost remanentnog toka određena bez podataka o prethodnim stanjima i parametrima transformatora. Nadalje, primjenom sljedeće dvije metode, remanentni tok određen je na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični, odnosno niski istosmjerni napon. Međutim, primjenom ove tri metode, nakon provedenog mjernog postupka postojat će u jezgri transformatora neka nova nepoznata vrijednost remanentnog toka nakon uklopa na nazivni izmjenični napon, odnosno maksimalna vrijednost nakon uklopa na niski istosmjerni napon. Iako prethodno navedene novorazvijene metode ne odgovaraju u potpunosti na postavljene izazove, imaju svoje prednosti u određenim područjima primjene u odnosu na prethodno poznate metode. U četvrtom poglavlju, opisana je metoda određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze nakon primjene testnog naponskog signala. Korištenjem ove metode, moguće je uspješno odgovoriti na oba postavljena izazova jer će vrijednost remanentnog toka biti precizno određena te očuvana nakon provođenja mjernog postupka. Nakon toga, u petom poglavlju, procijenjena je propagacija mjerne nesigurnosti mjerenih veličina izračunata primjenom adaptivne Monte Carlo metode za sve metode. Na kraju, u šestom poglavlju, izveden je zaključak ovoga rada.

2. LABORATORIJSKI SUSTAV I MJERNI POSTUPAK

Za provedbu novorazvijenih metoda za određivanje remanentnog toka, uspostavljen je laboratorijski sustav čiji je model prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1. Model laboratorijskog sustava za određivanje remanentnog toka u jezgri jednofaznog transformatora.

Laboratorijski sustav sastoji se od jednofaznog transformatora koji je modeliran serijskim spojem otpora R_T i savršenog transformatora (unutar kvadrata na slici 2.1.), dodatnog otpornika koji je modeliran otporom R_R , dva promjenjiva izmjenična naponska izvora koji su modelirani izvorima u_1 i u_2 , obične mehaničke sklopke koja je modelirana sklopkom S_1 te elektronički upravljane sklopke koja je modelirana sklopkom S_2 . Prethodno navedene komponente laboratorijskog sustava zajedničke su svim novorazvijenim metodama. Međutim, fizička realizacija izvora u_3 i sklopke S_3 u modelu ovisi o pojedinoj metodi, a o čemu će biti riječi u odgovarajućim poglavljima u kojima su predstavljene metode.

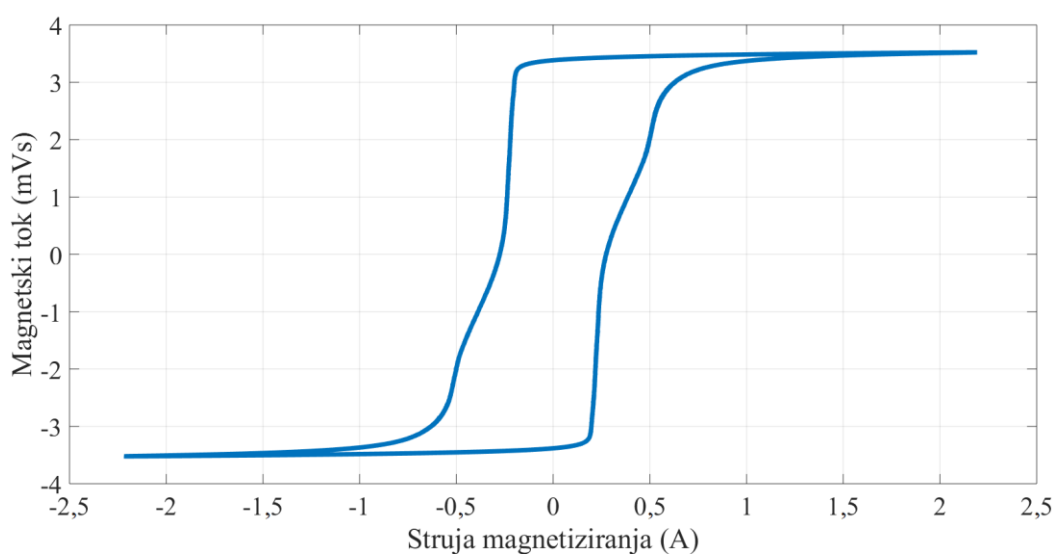
2.1. Komponente laboratorijskog sustava i mjerna oprema

Transformator korišten u ovom istraživanju prikazan je na slici 2.2., a ima toroidnu jezgru od orijentiranog magnetskog lima (M5) površine poprečnog presjeka 20 cm^2 . Primarni namot ima 47 zavoja, a sekundarni 7. Oba namota izvedena su od trostruke žice (tri paralelna vodiča u jednom zavoju) od kojih svaka ima puni okrugli poprečni presjek površine $1,3 \text{ mm}^2$. Nazivna snaga transformatora je 200 VA. Nazivni napon primara je 30 V, sekundara 4,5 V, dok je nazivna struja primara 6,5 A, a sekundara 44,5 A.



Slika 2.2. Jednofazni dvonamotni toroidni transformator korišten u istraživanju.

Djelatni otpor primarnog namota modeliran je otporom R_T na slici 2.1. i iznosi $0,19 \, \Omega$. Sekundarni namot transformatora je u praznom hodu i koristi se samo za snimanje napona sekundara (u_S u modelu na slici 2.1.). Induktivnost primarnog namota kad jezgra nije u zasićenju iznosi $0,59 \, \text{H}$. Magnetska karakteristika transformatora modelirana je nelinearnim induktivitetom L prikazanim na slici 2.1. Karakteristika toga induktiviteta, odnosno glavna petlja histereze prikazana je u φ - i ravnini na slici 2.3.



Slika 2.3. Glavna petlja histereze nelinearnog induktiviteta L .

Glavna petlja histereze prikazana na slici 2.3. dobivena je eksperimentalnim putem na način da je na primar neopterećenog transformatora narinut izmjenični monoharmonijski napon efektivne vrijednosti 39 V i frekvencije 50 Hz. Međutim, radna točka u φ - i ravnini nelinearnog induktiviteta L može se nalaziti bilo gdje unutar prikazane glavne petlje histereze za neki drugi poticaj, što ovaj model čini upotrebljivim za potrebe simulacije samo za ustaljeno stanje uz određeni poticaj za koji je dobivena karakteristika. Drugim riječima, za bilo koji drugi poticaj, kao i za prijelazno stanje, ovaj model je neupotrebljiv za potrebe simulacije. Dodatno, važno je naglasiti kako induktivitet L zbog histerezne karakteristike uz reaktivni, ima i disipativni karakter. Naime, uz pohranu energije, u induktivitetu L odvija se i disipacija energije koja je u stvarnom svijetu uzrokovana pojavom vrtložnih struja, odnosno tzv. gubicima u željezu transformatora.

Općenitiji modeli prikladni za simulacije su Chuin model [60], Preisachov model [61] te Jiles-Athertonov model [62]. U novijim radovima, može se vidjeti usporedba Preisachovog i Jiles-Athertonovog modela [63], kao i poboljšani Jiles-Athertonov model transformatora za niske frekvencije [64]. Za razliku od Preisachovog i Jiles-Athertonovog modela, Chuin matematički model može se prikazati ekvivalentnim modelom električkog kruga koji se sastoji od paralelnog spoja nelinearnog induktiviteta i nelinearnog otpora. Međutim, njihove karakteristike nisu histerezne te prolaze kroz ishodište što znači da se s pomoću Chuinog modela ne može objasniti pojava remanentnog toka. Dakle, na φ - i karakteristici nelinearnog induktiviteta u Chuinom modelu ne postoji točka koja ima nenultu vrijednost magnetskog toka za nultu vrijednost struje magnetiziranja. Iako Preisachov i Jiles-Athertonov matematički model ne mogu biti prikazani ekvivalentnim električkim krugom, oni daju histereznu karakteristiku kao rješenje svojih jednažbi. Histerezna karakteristika trebala bi biti jednaka onoj eksperimentalno dobivenoj koja je prikazana na slici 2.3., što znači da se s pomoću ova dva modela može objasniti pojava remanentnog toka kao što je i prikazano u [65] za Preisachov model. Međutim, određivanje parametara Preisachovog i Jiles-Athertonovog modela je relativno složeno i nije tema ovoga rada. Stoga, iako model transformatora prikazan na slici 2.1. nije prikladan za simulacije, za potrebe ovoga istraživanja daje zadovoljavajuće rezultate.

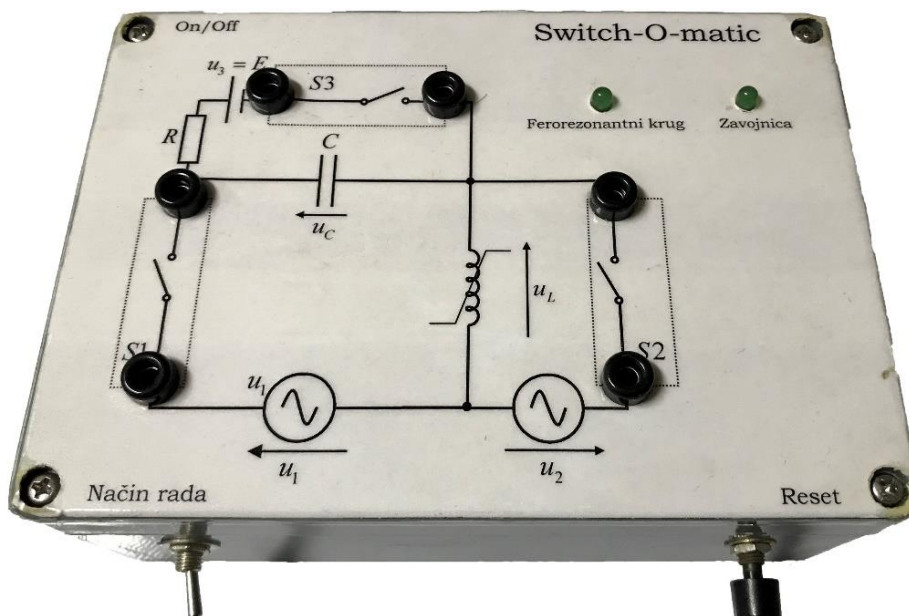
Nadalje, dodatni otpornik iznosa otpora 1,22 Ω (modeliran otporom R_R na slici 2.1.) spojen je u seriju s primarnim namotom transformatora kako bi ograničio maksimalnu vrijednost struje primara transformatora prilikom uklopa na nazivni napon i napone više od nazivnoga. Naime, bez dodatnog otpornika, udarna struja magnetiziranja dosegla bi vrijednost od 120 A što bi

bilo previše za mjernu opremu korištenu u ovom istraživanju. Međutim, u mogućim primjenama novorazvijenih metoda dodatni otpornik ne treba biti korišten, odnosno njegovo korištenje bit će uvjetovano nazivnim naponom, odnosno nazivnoj struji i snazi korištene opreme. Dodatni otpornik prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4. Dodatni otpornik.

Elektronički upravljana sklopka (modelirana sklopkom S_2 na slici 2.1.) dio je elektroničkog sklopnog uređaja koji je prikazan na slici 2.5., a izrađen je na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek za potrebe prethodnih istraživanja, odnosno nije izrađen u okviru ovoga rada.



Slika 2.5. Elektronički sklopni uređaj.

Elektronički sklopni uređaj sadrži tri poluvodička ventila, odnosno tri trijaka BT139, a izrađen je za ispitivanje ferorezonantnog kruga [41, 66, 67], te remanentnog toka zavojnice ili transformatora [68]. Upravljanje poluvodičkim ventilima ostvareno je ugrađenim mikrokontrolerom ATMEGA8. Elektronički sklopni uređaj u ovom istraživanju koristi se za postavljanje početnog uvjeta remanentnog toka transformatora, što će biti objašnjeno u nastavku ovoga poglavlja, te za ispitivanje dvije novorazvijene metode s obzirom da je s pomoću ovoga uređaja moguće postaviti fazni kut napona pri uklopu transformatora u koracima od dva stupnja. Elektroničkim sklopnim uređajem upravlja se s pomoću programa instaliranog na osobnom računalu koje je s uređajem povezano serijskom (RS-232) vezom.

Mjerenja napona i struje ostvarena su s pomoću multifunkcijske akvizicijske (DAQ) kartice National Instruments NI-USB 6212 prikazane na slici 2.6. i programskog paketa LabVIEW. Frekvencija uzorkovanja je 50 kHz na svakom kanalu akvizicijske kartice.



Slika 2.6. Multifunkcijska akvizicijska (DAQ) kartica National Instruments NI-USB 6212.

Struja magnetiziranja transformatora (i u modelu) izračunata je mjerenjem napona dodatnog otpornika korištenjem aktivne diferencijalne sonde GW Instek GDP-025 te primjenom Ohmovog zakona. Naponi primara (u_P u modelu) i sekundara (u_S u modelu) također su snimljeni korištenjem aktivne diferencijalne sonde GW Instek GDP-025 koja je i prikazana na slici 2.7.



Slika 2.7. Aktivna diferencijalna sonda GW Instek GDP-025.

Tijekom provođenja mjernog postupka, sve komponente laboratorijskog sustava i mjerna oprema galvanski su izolirani od elektroenergetske mreže.

2.2. Postavljanje početne vrijednosti remanentnog toka

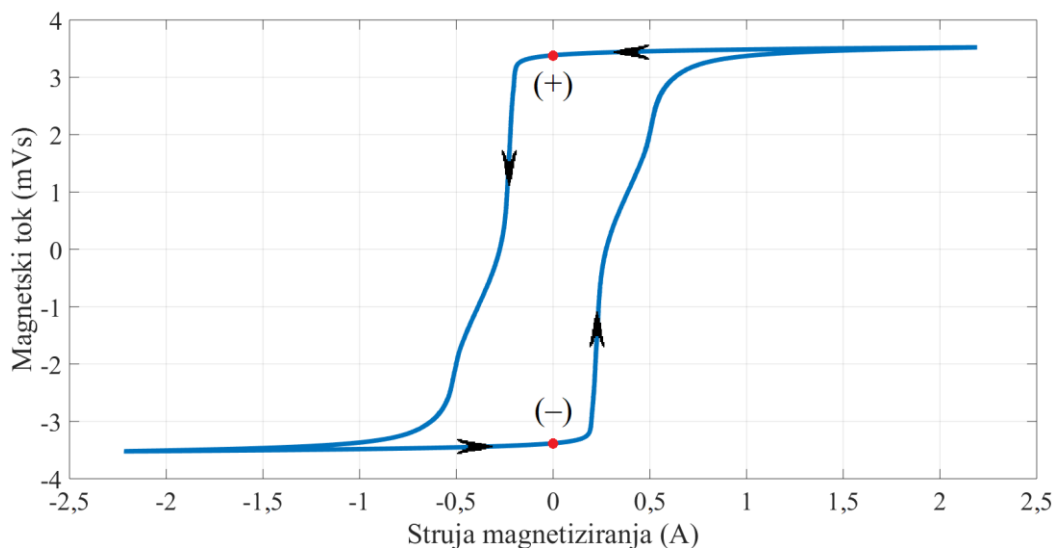
Za dokazivanje ispravnosti novorazvijenih metoda, potrebno je prethodno znati vrijednost remanentnog toka, odnosno potrebno je postaviti željenu početnu vrijednost remanentnog toka. Ovaj postupak postavljanja početne vrijednosti zajednički je za sve četiri novorazvijene metode

pa će biti detaljno opisan u nastavku ovoga potpoglavlja. U potencijalnoj primjeni metoda, ovaj dio mjernog postupka nije potrebno provoditi. Mjerni postupak za primjenu pojedine metode detaljno je opisan u odgovarajućem poglavlju u kojemu je predstavljena metoda.

Postupak postavljanja željene početne vrijednosti remanentnog toka u jezgri transformatora počinje konvencionalnim izmjeničnim demagnetiziranjem jezgre kao što je opisano u [56] i prikazano na slici 1.4., na način da se napon spušta od vrijednosti 36 V do nule u približno pet sekundi. Za demagnetiziranje se koristi laboratorijski izmjenični izvor promjenjivog napona (modeliran izvorom u_1) spojen na primar transformatora preko obične mehaničke sklopke (modelirane sklopkom S_1). Tijekom provođenja postupka demagnetiziranja, sklopke S_2 i S_3 prikazane u modelu na slici 2.1. su otvorene, a sklopka S_1 je zatvorena. U pravilu, demagnetiziranje jezgre nije nužno provoditi, ali ono značajno ubrzava postupak postavljanja željene početne vrijednosti remanentnog toka. Primjerice, u slučaju da je prije postupka postavljanja remanentni tok imao vrijednost blisku maksimalnoj, a željena početna vrijednost značajno je niža od maksimalne, može se dogoditi da postupak traje i po nekoliko minuta ako jezgra prethodno nije demagnetizirana. Naime, u tom slučaju, radna točka u ϕ -i ravlini će se lagano kretati po zamišljenoj spirali do ishodišta, odnosno do uspostave ustaljenog stanja koje je nužno radi preciznog postavljanja željene početne vrijednosti remanentnog toka.

Sljedeći korak je uklop primara transformatora na laboratorijski izmjenični izvor promjenjivog napona (modeliran izvorom u_2) preko elektronički upravljane sklopke (modelirane sklopkom S_2) te uspostava ustaljenog stanja. U ovom koraku koji slijedi neposredno nakon postupka demagnetiziranja, sklopke S_1 i S_3 prikazane u modelu na slici 2.1. su otvorene, a sklopka S_2 je zatvorena. Osnovna ideja postavljanja željene početne vrijednosti remanentnog toka je isklopiti elektronički upravljanu sklopku (S_2), odnosno trijak, nakon uspostave ustaljenog stanja u trenutku u kojem struja magnetiziranja transformatora prolazi kroz nultu vrijednost. To znači da će remanentni tok biti jednak vrijednosti magnetskog toka u trenutku u kojemu je trijak (S_2) isklopio, odnosno u kojemu je struja magnetiziranja dosegla nultu vrijednost. Dakle, postavljeni remanentni tok definiran je naponom promjenjivog izmjeničnog izvora (u_2) koji određuje petlju histereze u ustaljenom stanju i trenutkom isklopa elektronički upravljane sklopke (S_2). Naime, za jednu petlju histereze koja odgovara jednoj efektivnoj vrijednosti napona promjenjivog izmjeničnog izvora (u_2), ovisno o trenutku isklopa sklopke (S_2), moguće je postaviti dvije početne vrijednosti remanentnog toka. Ako sklopka (S_2) isklopi u trenutku prolaska struje magnetiziranja kroz nulu dok se struja smanjuje, bit će postavljen pozitivan

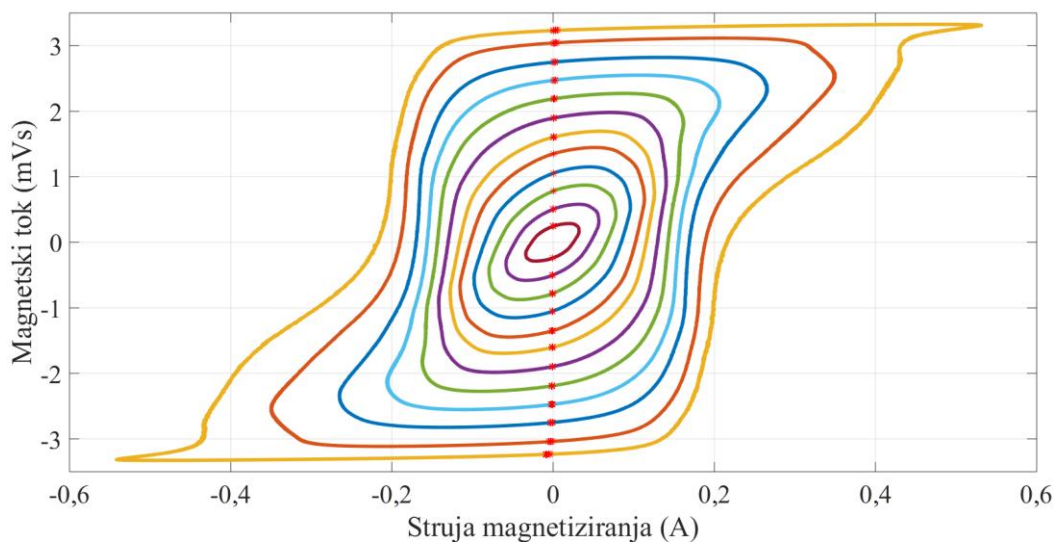
remanentni tok, odnosno ako sklopka (S_2) isklopi u trenutku prolaska struje magnetiziranja kroz nulu dok struja raste, bit će postavljen negativan remanentni tok, što je vidljivo i na slici 2.8.



Slika 2.8. Dva trenutka isklopa elektronički upravljane sklopke.

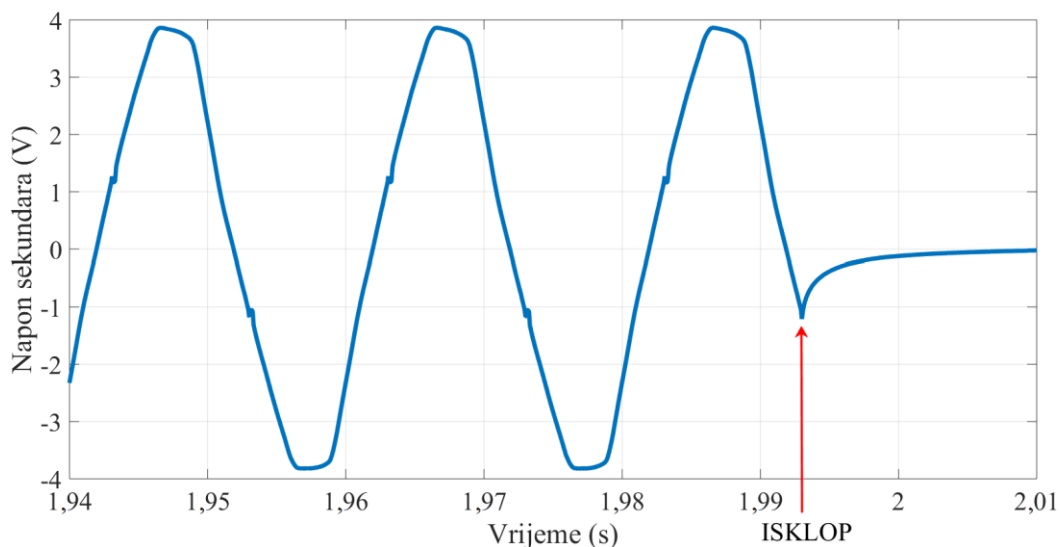
Dakle, ako se za petlju histereze koja odgovara pripadajućem parametru napona izvora (u_2) želi postaviti pozitivna vrijednost remanentnog toka, elektronički kontroliranu sklopku treba iskllopiti u točki (+) označenoj na karakteristici prikazanoj na slici 2.8., odnosno ako se za pripadajuću petlju histereze želi postaviti negativna vrijednost remanentnog toka, elektronički kontroliranu sklopku treba iskllopiti u točki (-).

U ovom radu postavljeno je ukupno 25 različitih početnih vrijednosti remanentnog toka što odgovara 12 različitih petlji histereze i nultoj vrijednosti (točka u ishodištu). Petlje histereze dobivene su eksperimentalnim putem i to računanjem struje magnetiziranja snimanjem napona na dodatnom otporu (R_R) te korištenjem Ohmovog zakona, te računanjem magnetskog toka integriranjem snimljenog napona sekundara transformatora (u_s) uz pravilnu primjenu broja zavoja sekundarnog namota transformatora. Magnetski tok računa se integriranjem napona sekundara (u_s) jer napon sekundara odgovara naponu induktiviteta L (u_L) u modelu prikazanom na slici 2.1. (uvažavajući prijenosni omjer), dok napon primara (u_P) uz napon induktiviteta (u_L) u sebi sadrži i napon djelatnog otpora primarnog namota (u_{RT}). Svaka petlja histereze snimljena je u ustaljenom stanju za jednu efektivnu vrijednost napona promjenjivog izmjeničnog izvora (u_2), i to za: 3 V, 6 V, ..., 36 V. Svih 12 petlji histereze prikazane su u ϕ - i ravnini na slici 2.9.



Slika 2.9. Petlje histereze s označenim pripadajućim početnim vrijednostima remanentnog toka.

Dakle, vrijednosti magnetskog toka u kojima je struja magnetiziranja jednaka nuli označene su crvenom zvjezdicom za svaku petlju histereze na slici 2.9. Međutim, te vrijednosti ne odgovaraju u potpunosti postavljenim početnim vrijednostima remanentnog toka. Naime, napon induktiviteta (u_L), odnosno napon sekundara transformatora (u_S) ne padne trenutno na nulu isklupom elektronički upravljane sklopke (S_2), što je prikazano na slici 2.10.



Slika 2.10. Napon sekundara prilikom isklupa sklopke (S_2).

Stoga, potrebno je postavljenu početnu vrijednost remanentnog toka izračunati integriranjem napona sekundara:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N_2} \int_0^t u_s(\tau) d\tau + \varphi(0), \quad (2-1)$$

gdje je $\varphi(t)$ magnetski tok u jezgri transformatora, N_2 broj zavoja sekundarnog namota, τ pomoćna varijabla vremena, a $\varphi(0)$ vrijednost magnetskog toka u trenutku početka snimanja napona sekundara. S obzirom da je ta vrijednost magnetskog toka nepoznata, a transformator se nalazi u ustaljenom stanju prije isklopa sklopke (S_2), što znači da u valnom obliku magnetskog toka nema više utjecaja početnog uvjeta, magnetski tok u jezgri transformatora može se izraziti kao:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N_2} \int u_s(t) dt. \quad (2-2)$$

Stoga, na temelju snimljenog valnog oblika napona sekundara (u_s) prilikom isklopa elektronički upravljane sklopke (S_2) za svaku petlju histereze i za svaki trenutak isklopa, izračunata je vrijednost postavljenog remanentnog toka korištenjem jednadžbe (2-2). Pri tome je za trenutak t za koji je izračunat magnetski tok prema jednadžbi (2-2) uzeta vrijednost od 2,5 sekundi što je značajno veće od trenutka isklopa sklopke (S_2) koji se zbilo oko druge sekunde, a što je vidljivo na slici 2.10. Postavljeni remanentni tok (Φ_{R0}) uz pripadajuće efektivne vrijednosti napona promjenjivog izmjeničnog izvora (u_2) prikazan je u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Postavljene početne vrijednosti remanentnog toka.

U_2 (V)	Φ_{R0} (mVs)	U_2 (V)	Φ_{R0} (mVs)
36	2,997	18	1,152
33	2,752	15	0,901
30	2,364	12	0,650
27	2,040	9	0,433
24	1,728	6	0,140
21	1,441	3	0,061

U tablici 2.1. prikazane su samo pozitivne vrijednosti postavljenog remanentnog toka zbog simetrije snimljenih petlji histereze. Te postavljene vrijednosti bit će uspoređivane s odgovarajućim vrijednostima remanentnog toka određenima primjenom novorazvijenih metoda kako bi se dokazala njihova ispravnost.

Nakon postavljanja željenih početnih vrijednosti remanentnog toka na prethodno opisani način, slijedi mjerni postupak koji odgovara primjeni pojedine novorazvijene metode, a koji će biti detaljno opisan u poglavlju ovoga rada u kojemu je predstavljena pripadajuća metoda. S obzirom da mjerni postupak primjene pojedine metode slijedi neposredno nakon isklopa elektronički upravljane sklopke (S_2), postavljena početna vrijednost (Φ_{R0}) može se smatrati vrijednošću remanentnog toka na početku mjernog postupka određivanja njegove vrijednosti primjenom novorazvijenih metoda. Naime, to je uobičajena praksa kod prethodno poznate metode koja remanentni tok određuje u trenutku isklopa transformatora, kao što je opisano u [69], a s obzirom da mjerni postupak kreće neposredno nakon isklopa elektronički upravljane sklopke (S_2), značajno se smanjuje vjerojatnost promjene remanentnog toka u jezgri uslijed vanjskih utjecaja.

3. METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA NAKON UKLOPA TRANSFORMATORA NA NAZIVNI IZMJENIČNI, ODNOSNO NISKI ISTOSMJERNI NAPON

Tri metode predstavljene u ovom poglavlju mogu uspješno odgovoriti na prvi postavljeni izazov, a to je pouzdano i precizno odrediti remanentni tok na kraju razdoblja neuklopljenosti transformatora. Naime, najčešće korištena metoda određivanja remanentnog toka u praksi, integriranje napona jednog od namota prilikom isklopa transformatora [1 – 5, 7, 12, 41, 46], temelji se na pretpostavci kako se remanentni tok u jezgri neće mijenjati od trenutka isklopa do trenutka novog uklopa. Međutim, između isklopa i novog uklopa energetskog transformatora ili zavojnice koja se koristi za kompenzaciju jalove snage u praksi mogu proći mjeseci. Nadalje, dokazano je kako se remanentni tok u jezgri može mijenjati zbog vanjskih utjecaja [47], pa čak i u slučaju da nema vanjskih utjecaja, zbog magnetske viskoznosti [48]. Stoga, korištenjem novorazvijenih metoda predstavljenih u ovom poglavlju, može se istražiti kako vanjski utjecaji poput prenapona ili magnetskih polja mijenjaju remanentni tok u jezgri. Također, može se istražiti i vremenska ovisnost remanentnog toka, odnosno mijenja li se remanentni tok s vremenom ako nema nikakvih vanjskih utjecaja. To može biti učinjeno na način da se primjenom prethodno poznate metode integriranja napona jednog od namota prilikom isklopa transformatora odredi vrijednost remanentnog toka u trenutku isklopa, a zatim nakon određenog vremena neuklopljenosti transformatora, primjenom neke od novorazvijenih metoda, ponovno odredi vrijednost remanentnog toka. Nakon toga, te dvije vrijednosti mogu biti uspoređene i iz toga izveden zaključak o promjeni remanentnog toka s vremenom ili o utjecaju prenapona i vanjskih magnetskih polja, ako ih je bilo, na promjenu remanentnog toka. To je važno ne samo u primjeni za smanjenje udarne struje magnetiziranja, već i za istraživanje ferorezonancije. Naime, kod određivanja utjecaja početnog uvjeta remanentnog toka na pojavu ferorezonancije, uz precizno postavljanje remanentnog toka, važno je znati i hoće li se ta vrijednost mijenjati s vremenom kako bi rezultati istraživanja bili valjani.

Međutim, ove tri metode ne mogu uspješno odgovoriti na drugi izazov, a to je da vrijednost remanentnog toka ne bude promijenjena, odnosno bude očuvana, nakon provođenja mjernog postupka. Primjenom dvije metode koje određuju remanentni tok nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon, remanentni tok će poprimiti neku nepoznatu vrijednost nakon provođenja mjernog postupka. Primjenom metode koja određuje remanentni tok nakon uklopa na

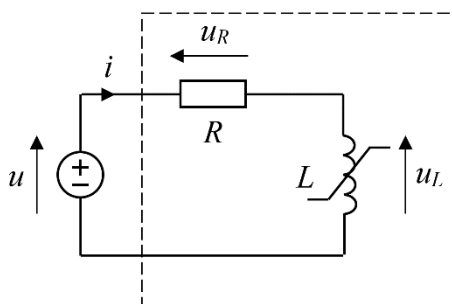
niski istosmjerni napon, remanentni tok će poprimiti maksimalnu vrijednost nakon provođenja mjernog postupka, što je u pravilu isti učinak koji se postiže predmagnetiziranjem. To znači da se ove metode ne mogu koristiti za smanjenje udarne struje magnetiziranja jer je u toj primjeni potrebno znati vrijednost remanentnog toka neposredno prije uklopa, odnosno remanentni tok mora biti očuvan nakon provođenja mjernog postupka. Međutim, za istraživanje utjecaja prenapona ili vanjskih magnetskih polja, odnosno vremenske ovisnosti remanentnog toka, ovaj nedostatak nije ključan jer je cilj odrediti vrijednost remanentnog toka na kraju stanja neuklopljenosti transformatora. Vrijednost remanentnog toka nakon provođenja mjernog postupka u tom slučaju nije važna.

3.1. Metoda određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon

Prva novorazvijena metoda temelji se na činjenici da će u ustaljenom stanju pri izmjeničnom poticaju magnetski tok u jezgri biti izmjeničan, odnosno da neće imati istosmjernu komponentu. Stoga, potrebno je integrirati napon neopterećenog sekundara transformatora koji odgovara naponu induktiviteta od trenutka uklopa do uspostavljanja ustaljenog stanja kako bi se odredio valni oblik magnetskog toka u jezgri.

3.1.1. Teorijska podloga

Za dokaz valjanosti ove metode korišten je model neopterećenog transformatora prikazan unutar pravokutnika na slici 3.1.



Slika 3.1. Model neopterećenog transformatora napajan izmjeničnim izvorom.

Model se sastoji od linearnog otpora R koji je spojen u seriju s nelinearnim induktivitetom L . Karakteristika nelinearnog induktiviteta L , prikazana na slici 2.3., dobivena je eksperimentalnim putem na način da je na primar neopterećenog transformatora narinut izmjenični

monoharmonijski napon efektivne vrijednosti 39 V i frekvencije 50 Hz, kao što je već navedeno u drugom poglavlju ovoga rada. S obzirom da se radi o glavnoj petlji histereze, radna točka u φ - i ravnini nelinearnog induktiviteta L može se nalaziti bilo gdje unutar prikazane petlje za neki drugi poticaj. To ovaj model čini neprikladnim za simulacije, ali za potrebe ovoga istraživanja daje zadovoljavajuće rezultate.

Neka je napon izvora (u) jednak:

$$u(t) = \hat{U} \sin \omega t, \quad (3-1)$$

gdje je $\hat{U}$ vršna vrijednost napona izvora, ω frekvencija napona izvora, a t varijabla vremena. Kirchhoffov zakon napona za model prikazan na slici 3.1. jednak je:

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

gdje je φ magnetski tok induktiviteta, a N broj zavoja induktiviteta. U ustaljenom stanju, jednačbu (3-2) može se izraziti za istosmjerne vrijednosti:

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

gdje su $I(0)$, $\Phi(0)$ i $U(0)$ istosmjerne komponente struje magnetiziranja (i), magnetskog toka (φ) i napona izvora (u). Uzimajući u obzir da je istosmjerna komponenta napona izvora, $U(0)$, jednaka nuli te da je istosmjerna komponenta magnetskog toka, $\Phi(0)$, nepromjenjiva vrijednost čime je njezina derivacija po definiciji jednaka nuli, iz jednačbe (3-3) proizlazi da i istosmjerna komponenta struje magnetiziranja, $I(0)$, mora biti jednaka nuli. Nadalje, s obzirom da je ovisnost magnetskog toka o struji magnetiziranja neparna funkcija, kao što je vidljivo na slici 2.3., proizlazi da i istosmjerna komponenta magnetskog toka, $\Phi(0)$, mora biti jednaka nuli u ustaljenom stanju. Magnetski tok (φ) induktiviteta jednak je:

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

gdje je τ pomoćna varijabla vremena, a Φ_R remanentni tok, odnosno iznos magnetskog toka u trenutku $t = 0$. Koristeći jednadžbu (3-4), istosmjerna komponenta magnetskog toka, $\Phi(0)$, može se izraziti u ustaljenom stanju kao:

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

gdje je T period napona izvora u , a t_{US} je proizvoljno izabrani trenutak u ustaljenom stanju. Dakle, uzimajući u obzir da je istosmjerna komponenta magnetskog toka, $\Phi(0)$, u ustaljenom stanju jednaka nuli, iz jednadžbe (3-5) može se izraziti remanentni tok:

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

Iz jednadžbe (3-6) vidljivo je kako remanentni tok može biti izračunat korištenjem napona induktiviteta (u_L). Radi jednostavnosti prikaza rezultata mjerenja, uvedena je dodatna varijabla, valni oblik magnetskog toka (φ_{VO}):

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

Dakle, radi se o varijabli koja vjerno prikazuje valni oblik magnetskog toka, ali u trenutku $t = 0$ ima nultu vrijednost. Stoga, remanentni tok može biti izražen i kao:

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

Ključno je da srednja vrijednost varijable valnog oblika magnetskog toka (φ_{VO}) bude izračunata iz periode u ustaljenom stanju, odnosno da trenutak t_{US} bude izabran u ustaljenom stanju. Dakle, remanentni tok jednak je negativnoj srednjoj vrijednosti varijable valnog oblika magnetskog toka (φ_{VO}) izračunatoj u ustaljenom stanju.

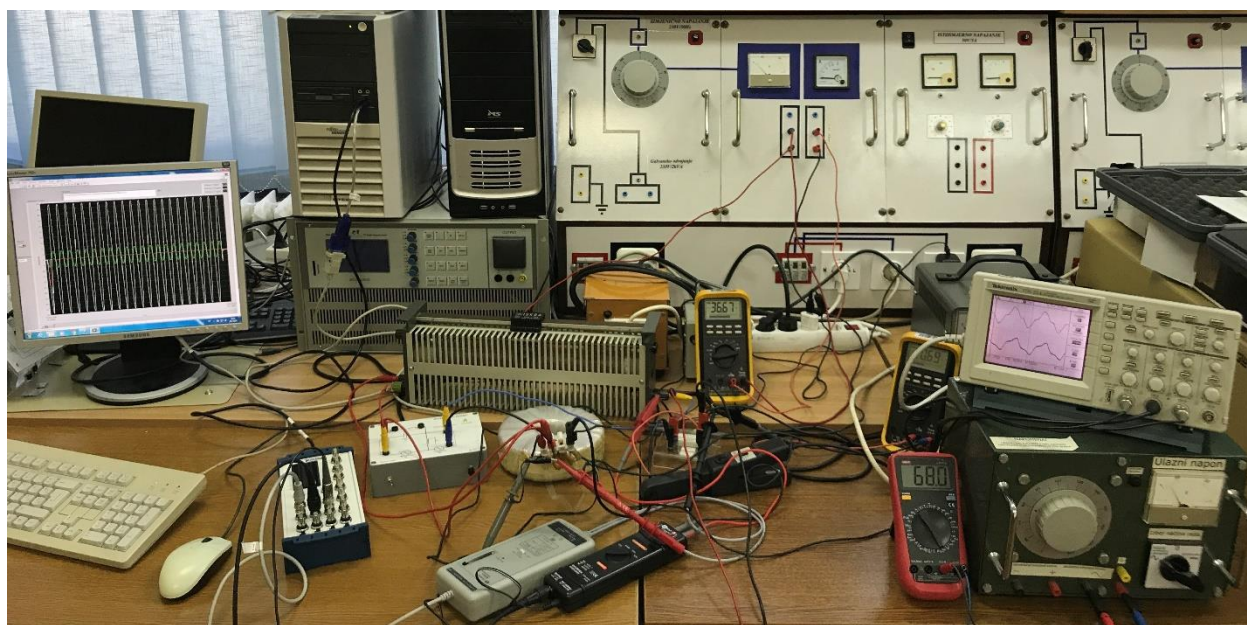
3.1.2. Rezultati mjerenja

Nakon postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka (Φ_{R0}), što je detaljno opisano u drugom poglavlju ovoga rada, transformator je uklopljen na nazivni napon, odnosno napon 20 % veći od nazivnoga. Razlog većem naponu od nazivnoga je brža uspostava ustaljenoga stanja. Naime, vremenska konstanta koja utječe na brzinu uspostave ustaljenoga stanja je $L/(R_T+R_R)$, pri čemu su iskazane vrijednosti iz modela sa slike 2.1. Induktivnost L nije nepromjenjiva vrijednost, već je jednaka:

$$L = \frac{d\phi}{di} . \quad (3-9)$$

Kada jezgra uđe u područje zasićenja, induktivnost je značajno manja nego kad je jezgra u nezasićenom području. Dakle, što je manja induktivnost, manja je i vremenska konstanta, što za posljedicu ima bržu uspostavu ustaljenoga stanja koje je potrebno za izračun remanentnog toka. Međutim, isti rezultat bio bi postignut i uklopom na nazivni napon, ali uz značajno dulje vrijeme potrebno za uspostavu ustaljenoga stanja.

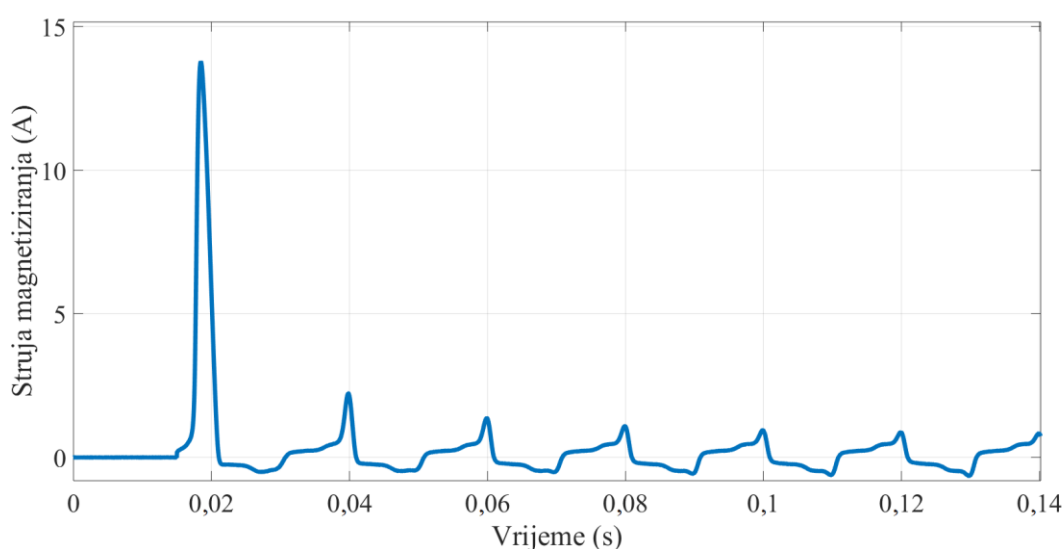
Prilikom primjene ove metode, izvodi se jedino ovaj korak mjernog postupka, bez prethodnog postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka. Laboratorijski sustav prikazan je na slici 3.2.



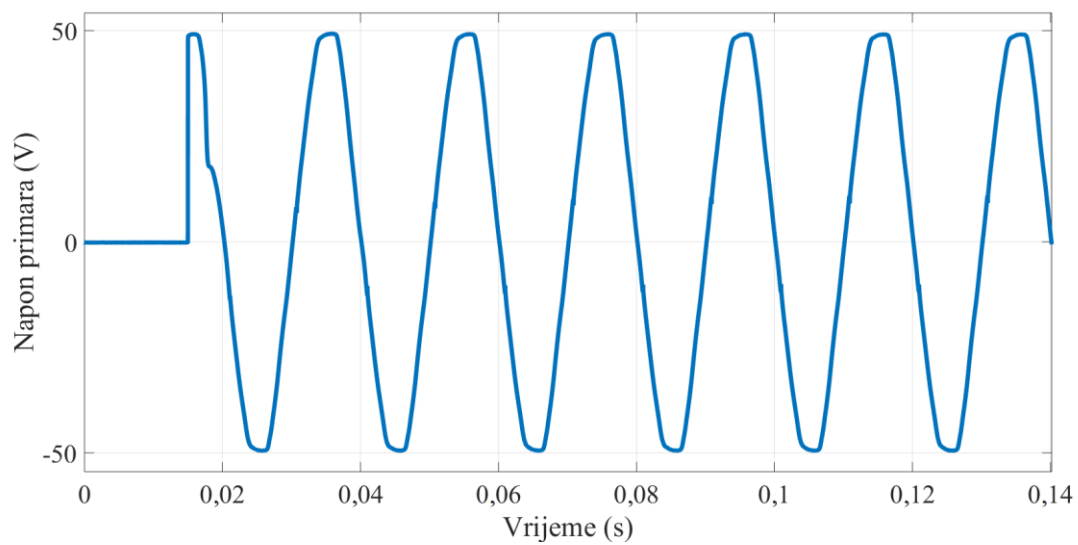
Slika 3.2. Laboratorijski sustav.

Kao izvor napajanja (modeliran izvorom u_3 na slici 2.1.) koristi se laboratorijski izmjenični izvor promjenjivog napona pri čemu je vrijednost napona postavljena na 36 V. Transformator je na izvor spojen preko elektronički upravljane sklopke (modelirane sklopkom S_3 na slici 2.1.) koja je dio elektroničkog sklopnog uređaja prikazanog na slici 2.5. Sklopkom je moguće postaviti fazni kut napona pri uklopu transformatora u koracima od dva stupnja. Prilikom izvođenja ovoga dijela mjernog postupka, sklopke S_1 i S_2 prikazane na slici 2.1. su isključene.

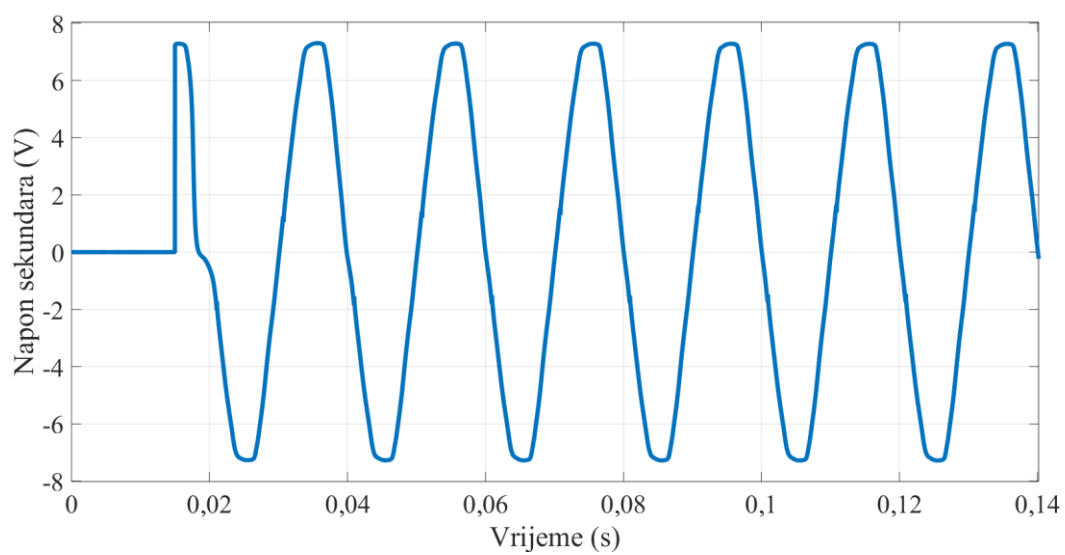
Stoga, kako bi bila dokazana valjanost metode te kako različiti početni uvjeti postavljenog remanentnog toka (Φ_{R0}) i faznog kuta uklopa (α) ne utječu na točnost metode, mjerenja su provedena uz sljedeće parametre kuta α : 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° i 180° ; što uz postavljenih 25 različitih početnih vrijednosti remanentnog toka koje odgovaraju parametru efektivne vrijednosti napona promjenjivog izmjeničnog izvora (u_2) i trenutka isklopa sklopke S_2 : 36 V (–), 33 V (–), ..., 0 V, ..., 33 V (+) i 36 V (+), čini ukupno 175 mjerenja. Prethodno spomenuti parametar efektivne vrijednosti napona i trenutka isklopa sklopke S_2 označen je efektivnom vrijednošću napona te predznakom postavljene početne vrijednosti remanentnog toka u zagradi iza efektivne vrijednosti. Rezultati za svako pojedino mjerenje uključuju snimljene valne oblike, nakon uklopa sklopke S_3 , struje magnetiziranja (i), napona primara (u_P), napona sekundara (u_S) te izračunati valni oblik magnetskog toka u jezgri transformatora (φ_{VO}) s pomoću programskog paketa MATLAB. Programski kod te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada. Primjeri snimljenih i izračunatih valnih oblika prikazani su na slikama 3.3., 3.4., 3.5. i 3.6.



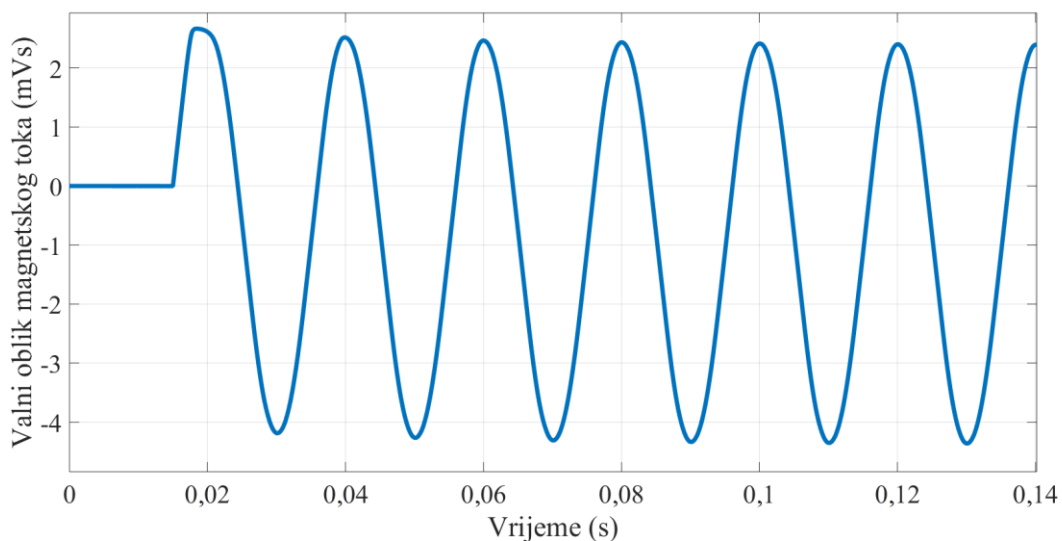
Slika 3.3. Struja magnetiziranja za parametre $U_2 = 18$ V (+) i $\alpha = 90^\circ$.



Slika 3.4. Napon primara transformatora za parametre $U_2 = 18 \text{ V (+)}$ i $\alpha = 90^\circ$.



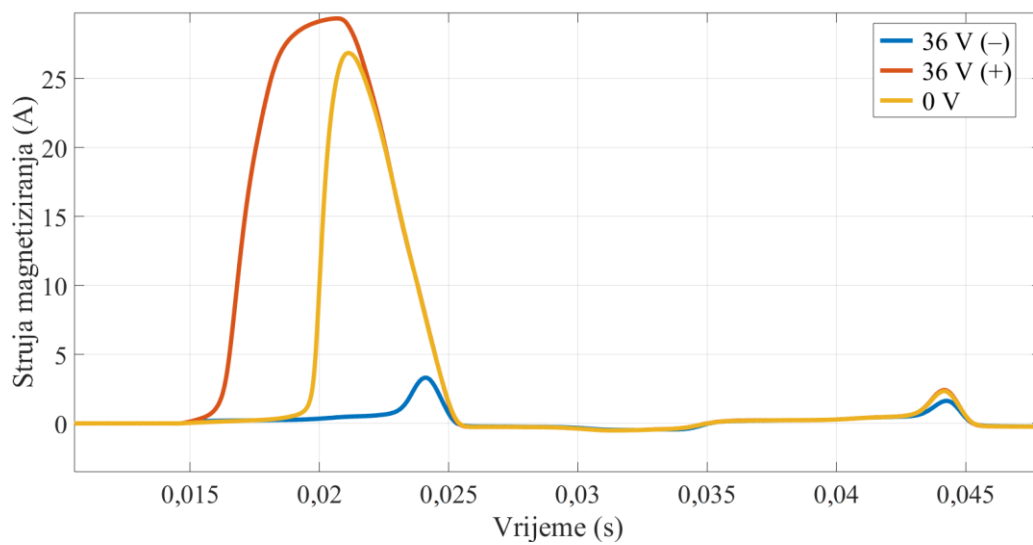
Slika 3.5. Napon sekundara transformatora za parametre $U_2 = 18 \text{ V (+)}$ i $\alpha = 90^\circ$.



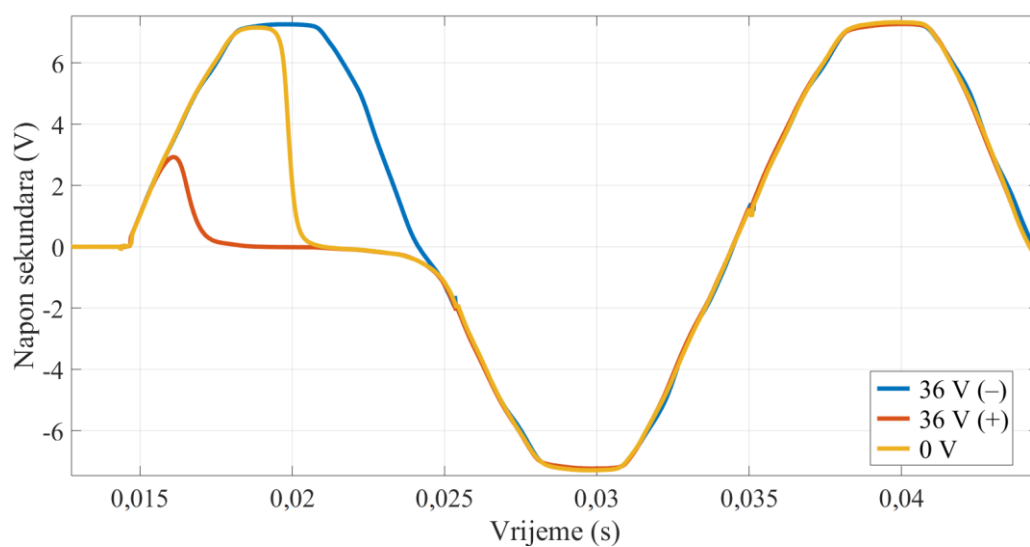
Slika 3.6. Valni oblik magnetskog toka (ϕ_{vo}) za parametre $U_2 = 18 \text{ V (+)}$ i $\alpha = 90^\circ$.

Za parametre efektivne vrijednosti napona i trenutka isklopa sklopke $U_2 = 18 \text{ V (+)}$ te faznog kuta uklopa $\alpha = 90^\circ$, ustaljeno stanje uspostavljeno je kroz stotinjak milisekundi od trenutka uklopa. Udar na struju magnetiziranja u ovom slučaju postiže maksimalnu vrijednost od 13,5 A. Naponi primara i sekundara, prikazani na slikama 3.4. i 3.5., značajno su izobličeni tijekom prve periode nakon uklopa, odnosno tijekom prijelaznog stanja dok struja magnetiziranja ima visoke vrijednosti. Valni oblik magnetskog toka na slici 3.6. već se tijekom prve periode značajno približi vrijednostima kakve će biti i u ustaljenom stanju. Naime, fizikalno gledajući, nulta istosmjerna komponenta magnetskog toka u jezgri transformatora u ustaljenom stanju posljedica je nesimetričnog valnog oblika struje magnetiziranja u prijelaznom stanju i serijskih otpora (R_T i R_R u modelu na slici 2.1.). Nesimetričan oblik struje uzrokuje nesimetričan pad napona na serijskim otporima, što za posljedicu ima nesimetričan napon na induktivitetu (u_L u modelu na slici 2.1.), kao što je i prikazano u valnom obliku napona sekundara na slici 3.5. U poluperiodi u kojoj struja magnetiziranja postiže maksimalnu vrijednost, dovedeni magnetski tok u jezgru značajno je manji, nego u ostalim poluperiodama.

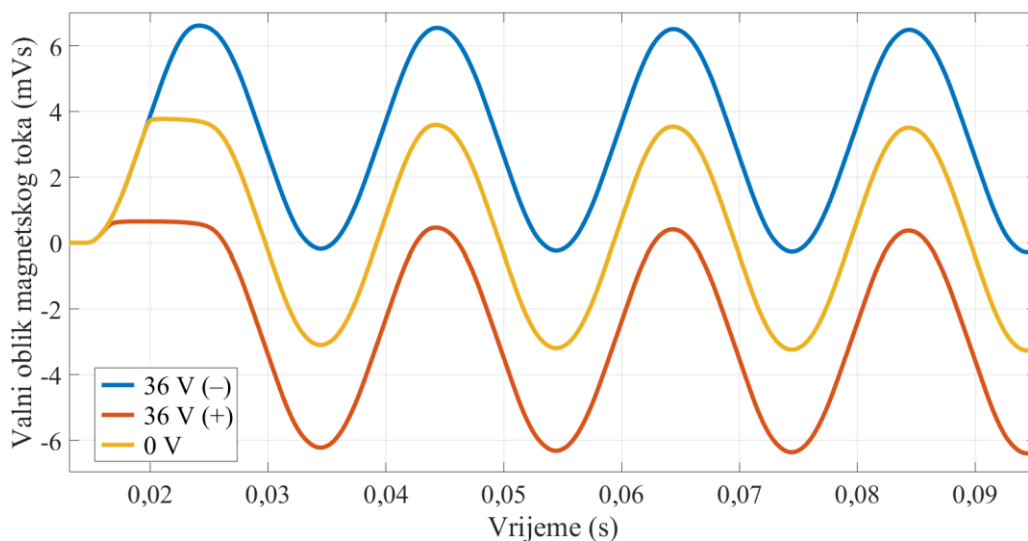
Nadalje, na slikama 3.7., 3.8. i 3.9. prikazani su snimljeni valni oblici struje magnetiziranja (i) i napona sekundara (u_s), te izračunati valni oblik magnetskog toka (ϕ_{vo}) za karakteristične postavljene početne vrijednosti remanentnog toka, odnosno parametra U_2 (36 V (–), 36 V (+) i 0 V), uz fazni kut uklopa $\alpha = 0^\circ$.



Slika 3.7. Struja magnetiziranja za tri karakteristična parametra U_2 pri $\alpha = 0^\circ$.



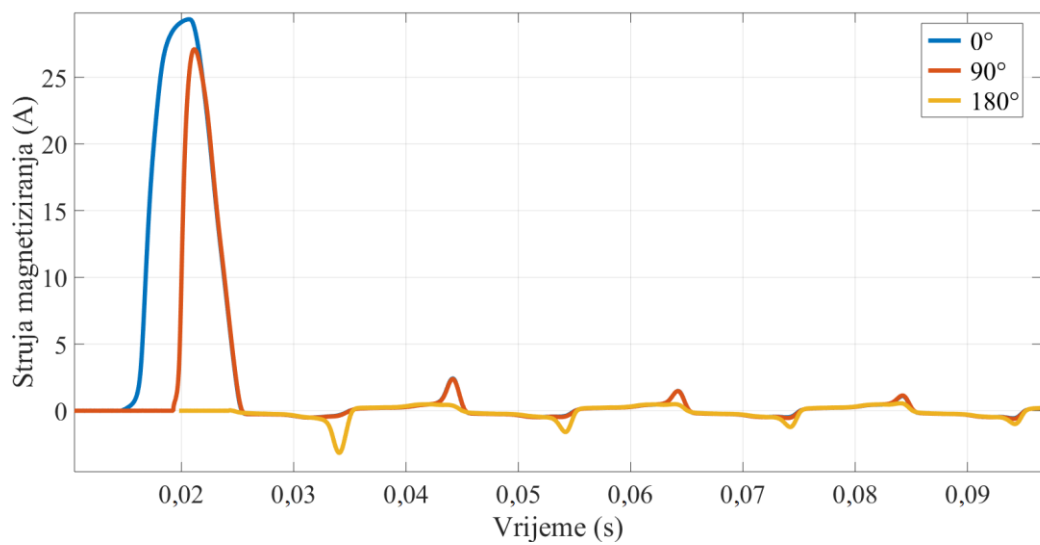
Slika 3.8. Napon sekundara za tri karakteristična parametra U_2 pri $\alpha = 0^\circ$.



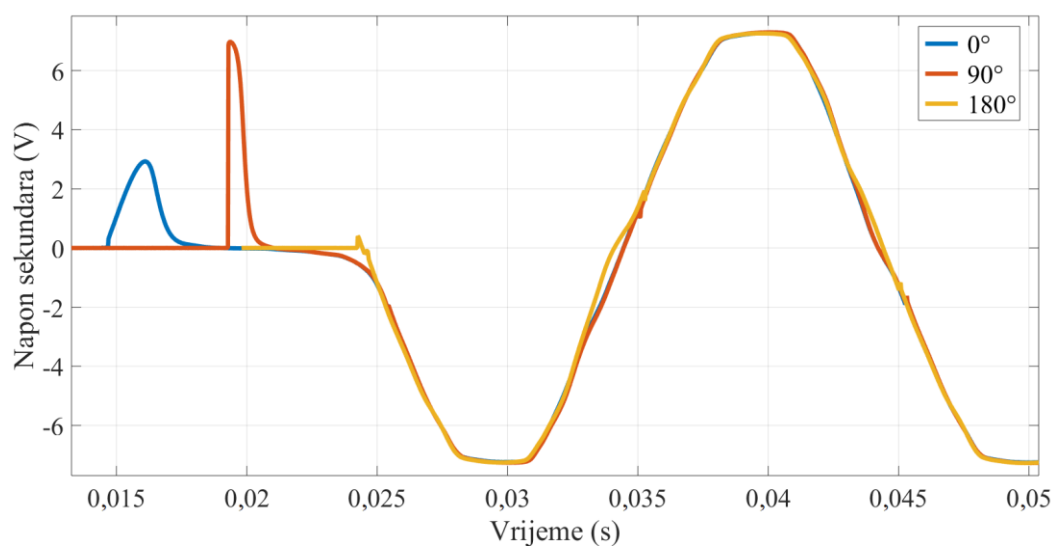
Slika 3.9. Valni oblik magnetskog toka (ϕ_{vo}) za tri karakteristična parametra U_2 pri $\alpha = 0^\circ$.

Struja magnetiziranja na slici 3.7. za najveću postavljenu početnu vrijednost remanentnog toka, što odgovara parametru $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, pri kutu $\alpha = 0^\circ$, ima maksimalnu vrijednost od gotovo 30 A. To je ujedno i najnepovoljnija kombinacija parametara U_2 i α u smislu pojave udarne struje. Nadalje, kut od 0° vrlo je blizu optimalnom kutu uklopa ako se želi izbjeći pojava udarne struje pri najmanjoj postavljenoj početnoj vrijednosti remanentnog toka, što odgovara parametru $U_2 = 36 \text{ V (-)}$. Izobličenje napona sekundara na slici 3.8., koji odgovara naponu induktiviteta, najveće je pri najvećoj struji magnetiziranja. Dakle, u tom će slučaju najmanji iznos magnetskog toka biti doveden u jezgru u prvoj poluperiodi, što će doprinijeti relativno brzom uspostavljanju ustaljenog stanja u kojemu je istosmjerna komponenta toka jednaka nuli, kao što je prikazano na slici 3.9. Dodatno, različite su srednje vrijednosti valnog oblika magnetskog toka (ϕ_{vo}) u ustaljenom stanju na slici 3.9. za različite postavljene početne vrijednosti remanentnog toka koje odgovaraju parametru U_2 . Dakle, za postavljenu maksimalnu negativnu početnu vrijednost remanentnog toka koja odgovara parametru $U_2 = 36 \text{ V (-)}$, srednja vrijednost valnog oblika magnetskog toka (ϕ_{vo}) u ustaljenom stanju je najveća, dok je za postavljenu maksimalnu pozitivnu početnu vrijednost remanentnog toka najmanja.

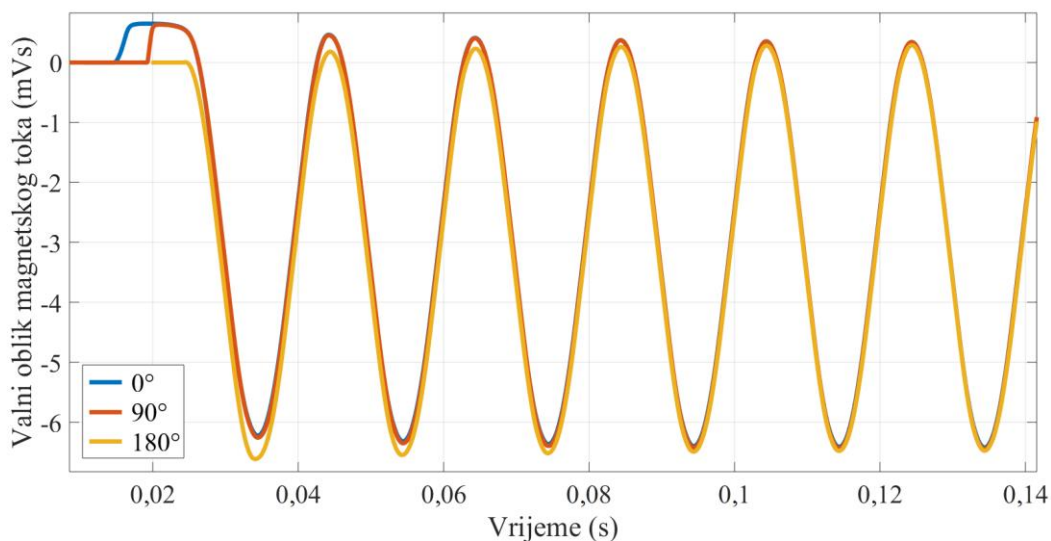
Nadalje, na slikama 3.10., 3.11. i 3.12. prikazani su snimljeni valni oblici struje magnetiziranja (i) i napona sekundara (u_s), te izračunati valni oblik magnetskog toka (ϕ_{vo}) za karakteristične fazne kutove uklopa α (0° , 90° i 180°), uz postavljenu početnu vrijednost remanentnog toka koja odgovara parametru $U_2 = 36 \text{ V (+)}$.



Slika 3.10. Struja magnetiziranja za tri karakteristična parametra α pri $U_2 = 36$ V (+).



Slika 3.11. Napon sekundara za tri karakteristična parametra α pri $U_2 = 36$ V (+).



Slika 3.12. Valni oblik magnetskog toka (φ_{VO}) za tri parametra α pri $U_2 = 36 \text{ V (+)}$.

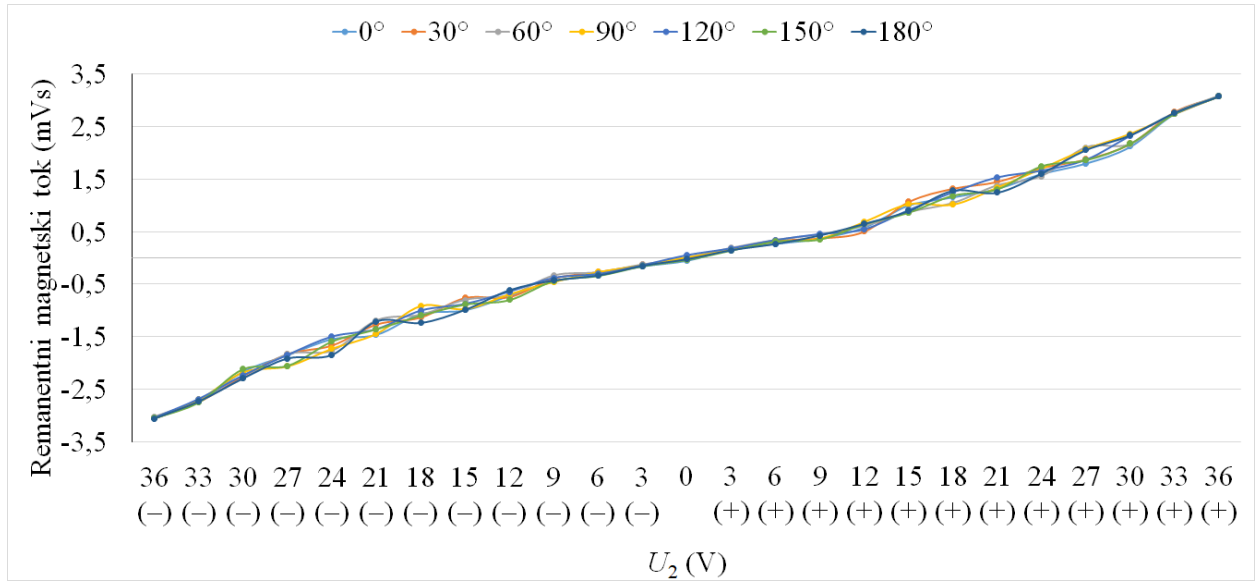
Ponovno, kao i na slici 3.7., za kombinaciju parametara $U_2 = 36 \text{ V (+)}$ i $\alpha = 0^\circ$, struja magnetiziranja na slici 3.10. ima maksimalnu vrijednost od gotovo 30 A. S druge strane, najpovoljniji slučaj u smislu pojave udarne struje je uklop pri kutu $\alpha = 180^\circ$, koji je vrlo blizak optimalnom za slučaj maksimalne pozitivne postavljene početne vrijednosti remanentnog toka koja odgovara parametru $U_2 = 36 \text{ V (+)}$. Naime, optimalan kut uklopa u tom slučaju bio bi nešto manji od 180° jer je maksimalna vrijednost remanentnog toka ipak nešto niža od maksimalne vrijednosti koju uzrokuje napon izvora u ustaljenom stanju. Također, na slici 3.10. pri kutu $\alpha = 180^\circ$, ustaljeno stanje ne bude uspostavljeno odmah nakon uklopa, što bi bio slučaj kod uklopa pri optimalnom kutu. Nadalje, slika 3.11. prikazuje napone sekundara, koji odgovaraju naponima induktiviteta, značajno izobličene za kutove uklopa od 0° i 90° , dok je za 180° izobličenje zanemarivo. Razlog izobličenju je ponovno velika vrijednost struje magnetiziranja u tim slučajevima, a značajna nesimetrija struje, koja uzrokuje značajnu nesimetriju napona sekundara, uzrok je relativno brzom uspostavljanju ustaljenog stanja, što se vidi iz valnih oblika magnetskog toka (φ_{VO}) na slici 3.12. Također, za različite fazne kutove uklopa, uz istu postavljenu početnu vrijednost remanentnog toka, srednje vrijednosti valnog oblika magnetskog toka u ustaljenom su stanju jednake. Dakle, ovo je dokaz kako fazni kut uklopa ne utječe na srednju vrijednost valnog oblika magnetskog toka u ustaljenom stanju, odnosno ne utječe na izračunatu vrijednost remanentnog toka korištenjem ove metode.

Za svako pojedino mjerenje, remanentni tok (Φ_R) u jezgri transformatora izračunat je kao negativna srednja vrijednost valnog oblika magnetskog toka (ϕ_{VO}) u ustaljenom stanju, prema jednadžbi (3-6). Izračunate vrijednosti remanentnog toka prikazane su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Izračunate vrijednosti remanentnog toka u mVs.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,083	3,085	3,080	3,078	3,079	3,077
33 (+)	2,752	2,788	2,757	2,747	2,748	2,751	2,766
30 (+)	2,123	2,179	2,164	2,369	2,330	2,178	2,337
27 (+)	1,805	1,881	2,104	2,078	1,872	1,864	2,055
24 (+)	1,605	1,721	1,557	1,705	1,664	1,750	1,609
21 (+)	1,323	1,455	1,378	1,344	1,536	1,309	1,242
18 (+)	1,160	1,326	1,041	1,018	1,252	1,189	1,280
15 (+)	1,004	1,072	0,868	1,026	0,913	0,864	0,892
12 (+)	0,584	0,508	0,606	0,687	0,544	0,645	0,650
9 (+)	0,377	0,378	0,445	0,370	0,454	0,353	0,429
6 (+)	0,273	0,331	0,339	0,310	0,340	0,312	0,267
3 (+)	0,167	0,163	0,186	0,151	0,181	0,143	0,148
0	-0,049	0,002	0,002	0,013	0,051	-0,037	-0,023
3 (-)	-0,155	-0,128	-0,130	-0,139	-0,140	-0,156	-0,151
6 (-)	-0,308	-0,263	-0,278	-0,270	-0,307	-0,342	-0,335
9 (-)	-0,443	-0,386	-0,339	-0,457	-0,381	-0,438	-0,430
12 (-)	-0,714	-0,738	-0,713	-0,692	-0,644	-0,801	-0,614
15 (-)	-0,992	-0,756	-0,802	-0,974	-0,879	-0,887	-0,988
18 (-)	-1,065	-1,126	-1,087	-0,917	-1,006	-1,099	-1,239
21 (-)	-1,458	-1,261	-1,195	-1,447	-1,361	-1,360	-1,208
24 (-)	-1,543	-1,660	-1,771	-1,731	-1,502	-1,591	-1,847
27 (-)	-1,848	-1,825	-1,837	-2,067	-1,850	-2,054	-1,916
30 (-)	-2,159	-2,243	-2,295	-2,180	-2,238	-2,115	-2,291
33 (-)	-2,725	-2,735	-2,727	-2,702	-2,690	-2,749	-2,731
36 (-)	-3,051	-3,049	-3,028	-3,043	-3,048	-3,055	-3,057

Rezultati iz tablice 3.1. prikazani su i grafički na slici 3.13.



Slika 3.13. Izračunate vrijednosti remanentnog toka.

Za svaki parametar U_2 , vrijednost remanentnog toka (Φ_R) trebala bi biti jednaka, neovisno o faznom kutu uklopa (α). Kako bi rezultat mogao biti evaluiran, izračunata je srednja vrijednost remanentnog toka (Φ_{RS}) za svaki parametar U_2 :

$$\Phi_{RS} = \frac{\sum_{i=1}^7 \Phi_{Ri}}{7}. \quad (3-10)$$

Također, izračunata je i standardna devijacija (σ), kao i relativna standardna devijacija ($\sigma\%$) remanentnog toka za svaki parametar U_2 :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (\Phi_{Ri} - \Phi_{RS})^2}{6}}, \quad (3-11)$$

$$\sigma\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (\Phi_{Ri} - \Phi_{RS})^2}{6}}}{\Phi_{RS}} \cdot 100 \%. \quad (3-12)$$

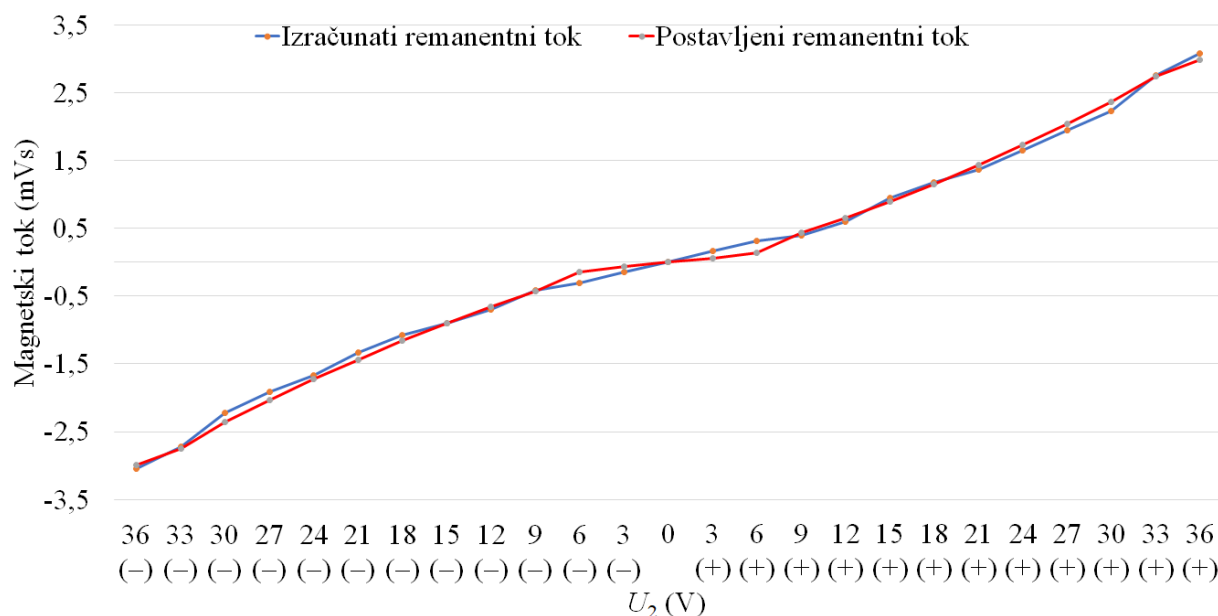
Rezultati su prikazani u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Standardna devijacija i relativna standardna devijacija izračunatih vrijednosti remanentnog toka.

U_2 (V)	Srednja vrijednost remanentnog toka, Φ_{RS} (mVs)	Standardna devijacija, σ (mVs)	Relativna standardna devijacija, $\sigma\%$
36 (+)	3,080	0,003	0,09 %
33 (+)	2,759	0,014	0,49 %
30 (+)	2,240	0,093	4,17 %
27 (+)	1,951	0,114	5,82 %
24 (+)	1,659	0,066	3,95 %
21 (+)	1,370	0,091	6,63 %
18 (+)	1,181	0,109	9,19 %
15 (+)	0,949	0,078	8,21 %
12 (+)	0,603	0,058	9,69 %
9 (+)	0,401	0,037	9,35 %
6 (+)	0,310	0,028	9,01 %
3 (+)	0,163	0,015	9,42 %
0	-0,006	0,031	535,62 %
3 (-)	-0,143	0,011	7,43 %
6 (-)	-0,300	0,029	9,63 %
9 (-)	-0,410	0,039	9,60 %
12 (-)	-0,702	0,057	8,06 %
15 (-)	-0,897	0,087	9,69 %
18 (-)	-1,077	0,092	8,59 %
21 (-)	-1,327	0,100	7,51 %
24 (-)	-1,664	0,117	7,03 %
27 (-)	-1,914	0,097	5,06 %
30 (-)	-2,217	0,063	2,84 %
33 (-)	-2,723	0,019	0,69 %
36 (-)	-3,047	0,009	0,30 %

Relativna standardna devijacija ($\sigma\%$) u tablici 3.2. ne prelazi iznos od 10 %, osim za parametar $U_2 = 0$ V. Razlog za tu iznimku je relativno mala apsolutna vrijednost srednje vrijednosti remanentnog toka, vrlo bliska nuli, s obzirom da se ta vrijednost nalazi u nazivniku pri računanju relativne standardne devijacije. Također, standardna devijacija značajno se smanjuje povećanjem apsolutne vrijednosti remanentnog toka, odnosno parametra U_2 . Naime, prilikom postavljanja nižih početnih vrijednosti remanentnog toka (Φ_{R0}) u drugom koraku mjernog postupka, moguće je da željena vrijednost nije precizno postavljena s obzirom na potrebno relativno dugo vrijeme (nekoliko minuta) da se u jezgri uspostavi ustaljeno stanje. Pri postavljenim višim početnim vrijednostima remanentnog toka, to vrijeme je značajno kraće jer jezgra prilikom postupka ode u zasićenje, te su i željene vrijednosti remanentnog toka preciznije postavljene, odnosno iznosi standardne devijacije značajno su niži.

Izračunate srednje vrijednosti remanentnog toka (Φ_{RS}) uspoređene su s postavljenim početnim vrijednostima remanentnog toka (Φ_{R0}) za svaki parametar U_2 , što je prikazano grafički na slici 3.14.



Slika 3.14. Izračunate srednje vrijednosti i postavljene početne vrijednosti remanentnog toka.

Nadalje, u tablici 3.3. prikazani su omjeri srednje i postavljene vrijednosti remanentnog toka za svaki parametar U_2 .

Tablica 3.3. Omjeri srednje i postavljene vrijednosti remanentnog toka.

U_2 (V)	Srednja vrijednost / postavljena vrijednost	U_2 (V)	Srednja vrijednost / postavljena vrijednost
36 (+)	102,79 %	36 (-)	101,69 %
33 (+)	100,23 %	33 (-)	98,93 %
30 (+)	94,74 %	30 (-)	93,78 %
27 (+)	95,65 %	27 (-)	93,80 %
24 (+)	95,97 %	24 (-)	96,25 %
21 (+)	95,01 %	21 (-)	92,07 %
18 (+)	102,47 %	18 (-)	93,46 %
15 (+)	105,28 %	15 (-)	99,55 %
12 (+)	92,88 %	12 (-)	108,08 %
9 (+)	92,56 %	9 (-)	94,81 %
6 (+)	222,05 %	6 (-)	214,98 %
3 (+)	266,70 %	3 (-)	233,93 %

Srednje vrijednosti remanentnog toka u tablici 3.3. nalaze se između 93 % i 108 % pripadajućih postavljenih vrijednosti za većinu parametara U_2 . Veća odstupanja pojavljuju se za parametre

$U_2 = 3 \text{ V (+)}$, $U_2 = 3 \text{ V (-)}$, $U_2 = 6 \text{ V (+)}$ i $U_2 = 6 \text{ V (-)}$. Razlog tome je relativno neprecizno postavljanje početne vrijednosti remanentnog toka s obzirom da se radi o malim iznosima za koje je potrebno značajno više vremena za uspostavljanje ustaljenog stanja, nego što je to slučaj kod viših početnih vrijednosti remanentnog toka.

Na kraju, dokazano je kako se korištenjem ove metode može pouzdano i precizno odrediti remanentni tok u magnetskoj jezgri bez podataka o prethodnim stanjima jezgre i parametrima transformatora. Potrebno je znati samo nazivni napon transformatora. Također, za određivanje remanentnog toka potrebno je provesti samo mjerenje napona sekundara (u_s) koji odgovara naponu induktiviteta (u_L) u modelu na slici 2.1. U ovom radu snimljeni su i valni oblici struje magnetiziranja (i) i napona primara transformatora (u_P) kako bi rezultati bili detaljnije prikazani, ali u potencijalnoj primjeni ove metode to nije potrebno.

3.2. Metoda određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon

Drua novorazvijena metoda temelji se na prethodnom određivanju jedne točke u φ - i ravnini kroz koju će proći krivulja magnetiziranja pri uklopu transformatora na nazivni izmjenični napon. Nakon toga, potrebno je integrirati napon neopterećenog sekundara transformatora, koji odgovara naponu induktiviteta, od trenutka uklopa do trenutka u kojemu radna točka dođe u izabranu točku u φ - i ravnini s prethodno poznatim vrijednostima. U pravilu, to će se dogoditi tijekom prve periode napona izvora.

3.2.1. Teorijska podloga

Za dokaz valjanosti ove metode korišten je model neopterećenog transformatora prikazan na slici 3.1. Neka je napon izvora (u) jednak:

$$u(t) = \hat{U} \sin \omega t . \quad (3-13)$$

Kirchhoffov zakon napona za model prikazan na slici 3.1. jednak je:

$$iR + u_L = \hat{U} \sin \omega t . \quad (3-14)$$

Magnetski tok (φ) induktiviteta jednak je:

$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t u_L(\tau) d\tau + \Phi_R. \quad (3-15)$$

Osnovna ideja ove metode je izabrati točku u φ -i ravnini u području zasićenja jezgre s odgovarajućim vrijednostima struje magnetiziranja (i) i magnetskog toka (φ), koje će biti definirane kao struja zasićenja (I_Z) i tok zasićenja (Φ_Z). Osnovni uvjet za izbor točke je to da za jednu vrijednost struje magnetiziranja postoji samo jedna vrijednost magnetskog toka na glavnoj petlji histereze. Optimalno izabrana točka je ona u kojoj struja ima najmanju vrijednost, naravno, uz ispunjavanje prethodno postavljenog uvjeta. Naime, ako nije ispunjen osnovni uvjet, odnosno ako vrijednost toka na glavnoj petlji histereze za određenu vrijednost struje nije jednoznačna, ne može se precizno odrediti tok zasićenja. S druge strane, ako struja nije optimalno izabrana, odnosno ako je veća od najmanje za koju je ispunjen osnovni uvjet, povećava se vjerojatnost da remanentni tok neće moći biti određen jer radna točka prilikom uklopa transformatora na nazivni napon neće dostići izabranu točku zasićenja. Dakle, prema jednadžbi (3-15), izabrani tok zasićenja (Φ_Z) jednak je:

$$\Phi_Z = \varphi(t_Z) = \frac{1}{N} \int_0^{t_Z} u_L(t) dt + \Phi_R, \quad (3-16)$$

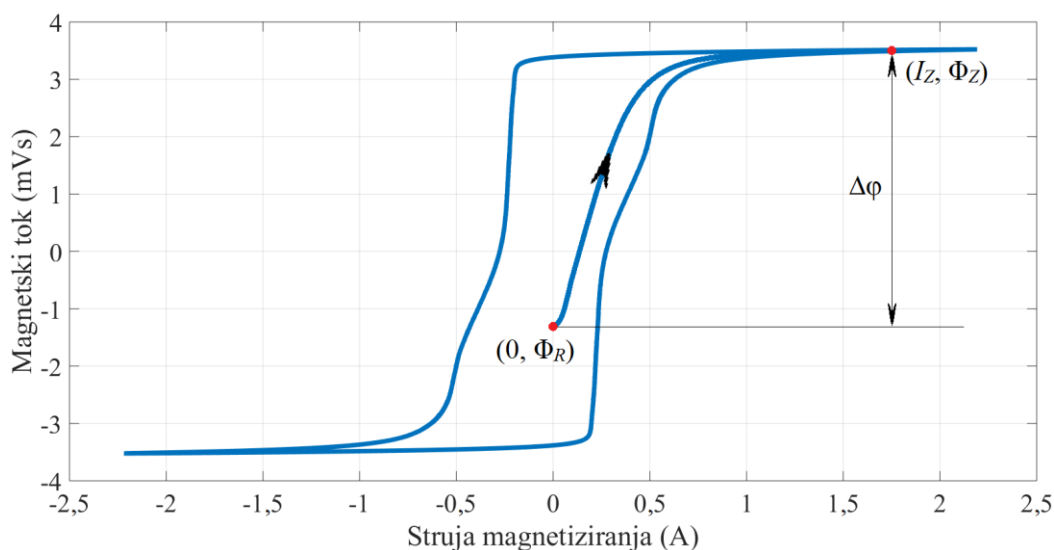
gdje je t_Z trenutak u kojemu radna točka dostiže izabranu točku zasićenja nakon uklopa transformatora na nazivni napon. S obzirom da je točka zasićenja proizvoljno izabrana, poznate su vrijednosti struje zasićenja (I_Z) i toka zasićenja (Φ_Z), te se remanentni tok može izraziti kao:

$$\Phi_R = \Phi_Z - \frac{1}{N} \int_0^{t_Z} u_L(t) dt. \quad (3-17)$$

Prema tome, razlika između remanentnog toka i toka zasićenja može biti definirana kao magnetski tok razlike ($\Delta\varphi$):

$$\Delta\varphi = \Phi_Z - \Phi_R = \frac{1}{N} \int_0^{t_Z} u_L(t) dt. \quad (3-18)$$

Prethodno spomenute vrijednosti magnetskog toka prikazane su grafički u ϕ - i ravnini na slici 3.15.



Slika 3.15. Tok zasićenja, magnetski tok razlike i remanentni tok u ϕ - i ravnini.

Uz pretpostavku pozitivnog napona nakon uklopa transformatora, radna točka u ϕ - i ravnini će ići od neke nepoznate vrijednosti remanentnog toka $(0, \Phi_R)$ prema izabranoj točki zasićenja (I_Z, Φ_Z) , kao što je prikazano na slici 3.15. Razlika magnetskog toka između te dvije točke je $\Delta\phi$.

3.2.2. Rezultati mjerenja

U ovoj metodi koriste se snimljeni valni oblici struje magnetiziranja (i), napona primara transformatora (u_P), napona sekundara transformatora (u_S) te izračunati valni oblik magnetskog toka u jezgri transformatora (ϕ_{VO}) iz prethodno opisane metode u potpoglavlju 3.1., za svih 175 mjerenja. Programski kod u programskom paketu MATLAB te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada. Također, prilikom primjene ove metode, izvodi se jedino mjerni postupak opisan u potpoglavlju 3.1., bez prethodnog postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka.

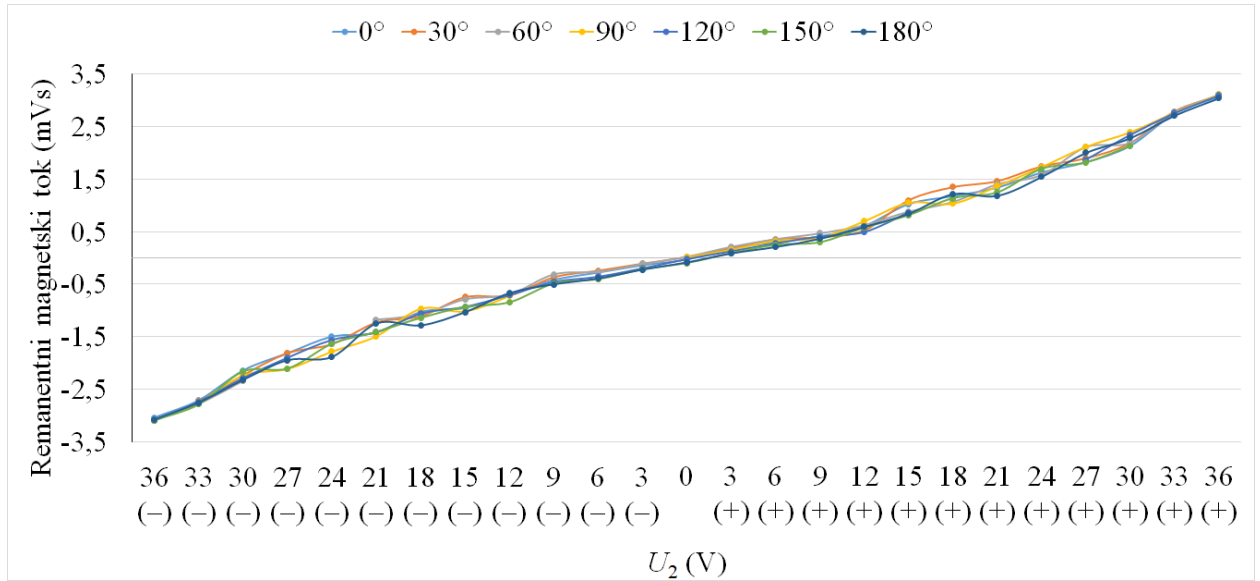
Za svako pojedino mjerenje, remanentni tok (Φ_R) u jezgri transformatora izračunat je kao razlika izabranog toka zasićenja (Φ_Z) i magnetskog toka razlike ($\Delta\phi$), prema jednadžbi (3-17). Izračunate vrijednosti remanentnog toka prikazane su u tablici 3.4. U ovom radu, izabrana vrijednost toka zasićenja (Φ_Z) iznosi 3,56 mVs, što odgovara struji zasićenja (I_Z) od 3 A.

Tablica 3.4. Izračunate vrijednosti remanentnog toka u mVs.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,089	3,111	3,115	3,095	-	3,048
33 (+)	2,761	2,793	2,782	2,773	2,762	-	2,718
30 (+)	2,142	2,189	2,195	2,398	2,348	2,134	2,287
27 (+)	1,829	1,898	2,115	2,119	1,876	1,816	2,005
24 (+)	1,634	1,745	1,584	1,734	-	1,696	1,548
21 (+)	1,345	1,463	1,405	1,367	-	1,246	1,186
18 (+)	1,181	1,349	1,068	1,035	-	1,135	1,218
15 (+)	1,030	1,100	0,885	1,050	0,870	0,811	0,844
12 (+)	0,612	0,527	0,626	0,699	0,494	0,577	0,594
9 (+)	0,414	0,398	0,469	0,382	0,409	0,296	0,365
6 (+)	0,300	0,355	0,360	0,325	0,276	0,246	0,208
3 (+)	0,183	0,192	0,213	0,157	0,126	0,088	0,087
0	-0,029	0,020	0,024	0,010	-0,023	-0,099	-0,085
3 (-)	-0,137	-0,105	-0,114	-	-0,199	-0,220	-0,221
6 (-)	-0,278	-0,240	-0,263	-	-0,360	-0,407	-0,392
9 (-)	-0,418	-0,365	-0,311	-	-0,459	-0,490	-0,503
12 (-)	-0,686	-0,713	-0,695	-0,728	-0,710	-0,847	-0,671
15 (-)	-0,953	-0,744	-0,785	-1,021	-0,935	-0,936	-1,034
18 (-)	-1,029	-1,106	-1,071	-0,971	-1,063	-1,143	-1,287
21 (-)	-1,422	-1,226	-1,173	-1,495	-1,417	-1,413	-1,250
24 (-)	-1,501	-1,636	-	-1,788	-1,565	-1,637	-1,889
27 (-)	-1,816	-1,807	-	-2,118	-1,902	-2,108	-1,952
30 (-)	-2,143	-2,227	-2,335	-2,243	-2,289	-2,162	-2,325
33 (-)	-2,712	-2,733	-2,772	-2,752	-2,742	-2,787	-2,761
36 (-)	-3,045	-	-3,089	-3,099	-3,098	-3,094	-3,083

Za određene kombinacije parametara U_2 i α u tablici 3.4. nije određen remanentni tok. Naime, u tim slučajevima, struja magnetiziranja nije dosegla vrijednost izabrane struje zasićenja, odnosno jezgra nije otišla u zasićenje nakon uklopa transformatora, zbog čega nije bilo moguće odrediti remanentni tok primjenom ove metode. Tu se radi upravo o približno optimalnim faznim kutovima uklopa za pojedine postavljene početne vrijednosti remanentnog toka u smislu pojave udarne struje magnetiziranja. Iako povoljno za sprječavanje pojave udarne struje, ovo je značajan nedostatak ove metode jer se vidi kako remanentni tok neće moći biti određen ako jezgra ne ode u zasićenje. To u potencijalnoj primjeni ove metode znači da remanentni tok neće moći biti određen prilikom svakog pokušaja.

Rezultati iz tablice 3.4. prikazani su i grafički na slici 3.16.



Slika 3.16. Izračunate vrijednosti remanentnog toka.

Kao i kod prethodne metode, vrijednost remanentnog toka (Φ_R) trebala bi biti jednaka za svaki parametar U_2 , neovisno o faznom kutu uklopa (α). Kako bi rezultat mogao biti evaluiran, izračunata je srednja vrijednost remanentnog toka (Φ_{RS}) za svaki parametar U_2 :

$$\Phi_{RS} = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_{Ri}}{n}, \quad (3-19)$$

gdje je n broj dobivenih rezultata remanentnog toka za pojedini parametar U_2 . Kao što je vidljivo iz tablice 3.4., n će biti jednak šest ili sedam. Također, izračunata je i standardna devijacija (σ), kao i relativna standardna devijacija ($\sigma\%$) remanentnog toka za svaki parametar U_2 :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_{Ri} - \Phi_{RS})^2}{n-1}}, \quad (3-20)$$

$$\sigma\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_{Ri} - \Phi_{RS})^2}{n-1}}}{\Phi_{RS}} \cdot 100\%. \quad (3-21)$$

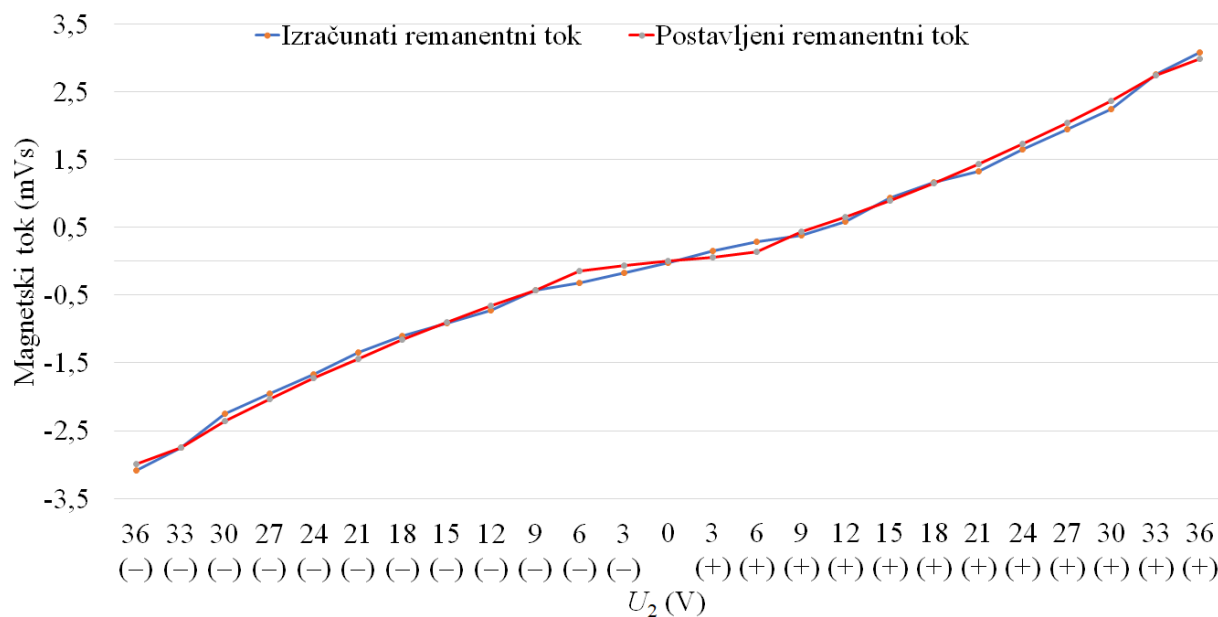
Rezultati su prikazani u tablici 3.5.

Tablica 3.5. Standardna devijacija i relativna standardna devijacija izračunatih vrijednosti remanentnog toka.

U_2 (V)	Srednja vrijednost remanentnog toka, Φ_{RS} (mVs)	Standardna devijacija, σ (mVs)	Relativna standardna devijacija, $\sigma\%$
36 (+)	3,090	0,022	0,71 %
33 (+)	2,765	0,024	0,85 %
30 (+)	2,242	0,096	4,26 %
27 (+)	1,951	0,119	6,11 %
24 (+)	1,657	0,074	4,47 %
21 (+)	1,335	0,093	6,99 %
18 (+)	1,164	0,103	8,87 %
15 (+)	0,941	0,107	11,32 %
12 (+)	0,590	0,062	10,55 %
9 (+)	0,391	0,049	12,50 %
6 (+)	0,296	0,052	17,62 %
3 (+)	0,149	0,047	31,28 %
0	-0,026	0,046	177,59 %
3 (-)	-0,166	0,049	29,35 %
6 (-)	-0,323	0,065	20,18 %
9 (-)	-0,424	0,069	16,15 %
12 (-)	-0,722	0,054	7,51 %
15 (-)	-0,915	0,103	11,22 %
18 (-)	-1,096	0,093	8,50 %
21 (-)	-1,342	0,114	8,50 %
24 (-)	-1,669	0,132	7,88 %
27 (-)	-1,951	0,125	6,42 %
30 (-)	-2,246	0,070	3,10 %
33 (-)	-2,751	0,023	0,84 %
36 (-)	-3,085	0,019	0,60 %

Relativna standardna devijacija ($\sigma\%$) u tablici 3.5. značajno se smanjuje povećanjem apsolutne vrijednosti remanentnog toka. Razlog je isti kao i kod prethodne metode, a radi se o slabijoj preciznosti postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka (Φ_{R0}) u drugom koraku mjernog postupka za manje apsolutne vrijednosti remanentnog toka. Naime, ista početna vrijednost trebala bi biti postavljena prije snimanja valnih oblika u trećem koraku mjernog postupka za svaki parametar faznog kuta uklopa. To je teže postići, odnosno treba značajno više vremena prilikom postavljanja manjih apsolutnih vrijednosti remanentnog toka.

Izračunate srednje vrijednosti remanentnog toka (Φ_{RS}) uspoređene su s postavljenim početnim vrijednostima remanentnog toka (Φ_{R0}) za svaki parametar U_2 , što je prikazano grafički na slici 3.17.



Slika 3.17. Izračunate srednje vrijednosti i postavljene početne vrijednosti remanentnog toka.

Nadalje, u tablici 3.6. prikazani su omjeri srednje i postavljene vrijednosti remanentnog toka za svaki parametar U_2 .

Tablica 3.6. Omjeri srednje i postavljene vrijednosti remanentnog toka.

U_2 (V)	Srednja vrijednost / postavljena vrijednost	U_2 (V)	Srednja vrijednost / postavljena vrijednost
36 (+)	103,12 %	36 (-)	102,93 %
33 (+)	100,46 %	33 (-)	99,97 %
30 (+)	94,82 %	30 (-)	95,00 %
27 (+)	95,64 %	27 (-)	95,62 %
24 (+)	95,85 %	24 (-)	96,59 %
21 (+)	92,65 %	21 (-)	93,11 %
18 (+)	101,04 %	18 (-)	95,09 %
15 (+)	104,50 %	15 (-)	101,61 %
12 (+)	90,79 %	12 (-)	111,06 %
9 (+)	90,24 %	9 (-)	98,03 %
6 (+)	211,67 %	6 (-)	231,33 %
3 (+)	245,02 %	3 (-)	272,42 %

Srednje vrijednosti remanentnog toka u tablici 3.6. nalaze se između 90 % i 111 % pripadajućih postavljenih vrijednosti za većinu parametara U_2 . Veća odstupanja pojavljuju se za parametre $U_2 = 3$ V (+), $U_2 = 3$ V (-), $U_2 = 6$ V (+) i $U_2 = 6$ V (-). Razlog tome je, kao i kod prethodne metode, relativno neprecizno postavljanje početne vrijednosti remanentnog toka.

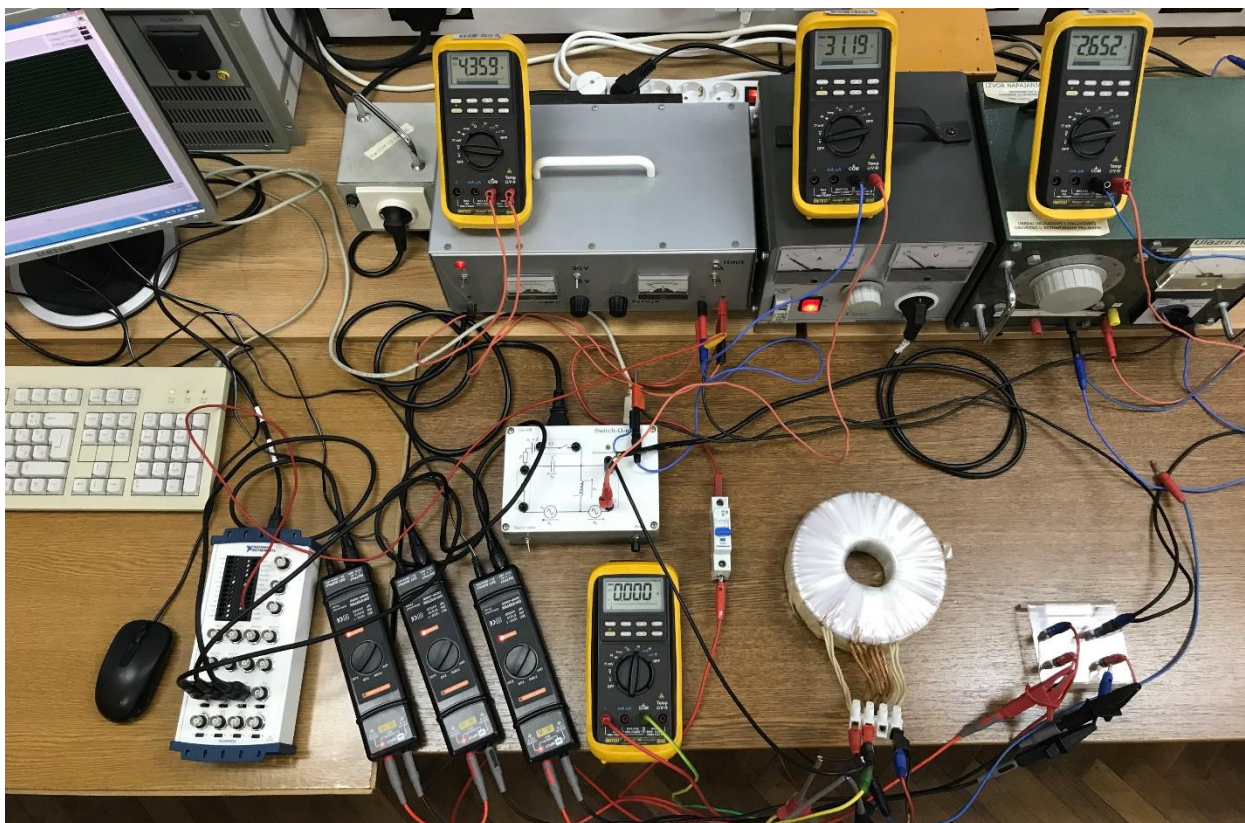
Na kraju, dokazano je kako se korištenjem ove metode može precizno odrediti remanentni tok u magnetskoj jezgri bez podataka o stanjima jezgre prije mjerenja. Međutim, potrebno je prethodno snimiti glavnu petlju histereze te izabrati točku zasićenja na toj petlji. Najveći nedostatak ove metode je činjenica kako remanentni tok neće moći biti određen prilikom svakog pokušaja. Kao i kod prethodne metode opisane u potpoglavlju 3.1., za određivanje remanentnog toka primjenom ove metode potrebno je provesti samo mjerenje napona sekundara (u_s) koji odgovara naponu induktiviteta (u_L) u modelu na slici 2.1.

3.3. Metoda određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovano uklopom transformatora na niski istosmjerni napon

Treća novorazvijena metoda temelji se na istoj teorijskoj podlozi kao i prethodna metoda, opisana u potpoglavlju 3.2. Međutim, razlika je u tome što transformator uklapa na niski istosmjerni napon, umjesto na nazivni izmjenični. Dvije su važne prednosti u odnosu na prethodnu metodu, od kojih je prva što neće biti slučajeva u kojima remanentni tok nije moguće odrediti. Druga prednost je uklop transformatora na napon značajno niži od nazivnoga, što je posebno važno kod visokonaponskih energetskih transformatora. Nedostatak ove metode je potreba za dodatnim istosmjernim izvorom, što kod prethodne metode nije slučaj jer se koristi izvor nazivnog napona.

3.3.1. Rezultati mjerenja

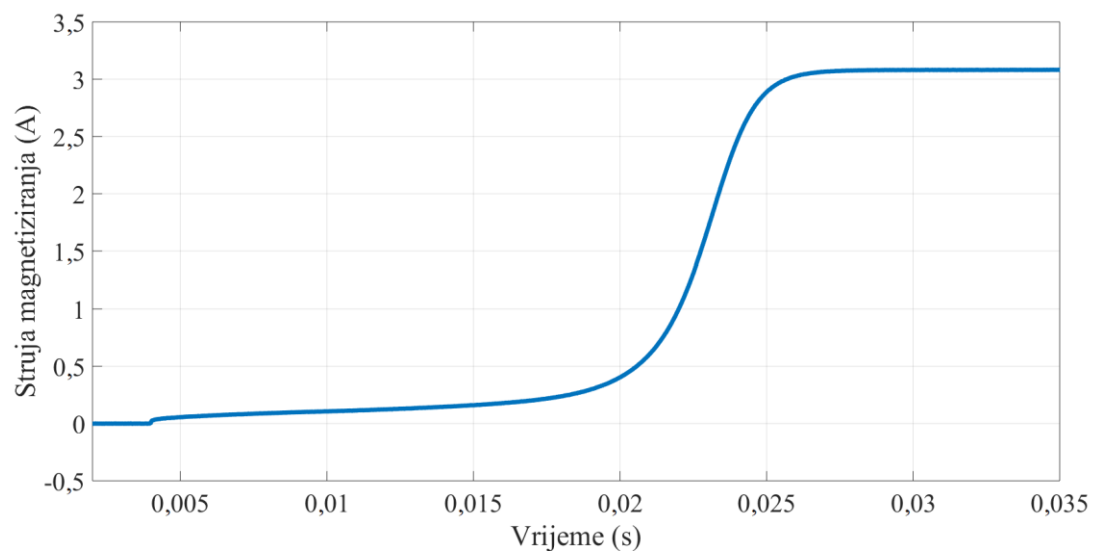
Nakon postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka (Φ_{R0}), što je detaljno opisano u drugom poglavlju ovoga rada, transformator je uklopljen na niski istosmjerni napon. Prilikom primjene ove metode, izvodi se jedino ovaj korak mjernog postupka, bez prethodnog postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka. Laboratorijski sustav prikazan je na slici 3.18.



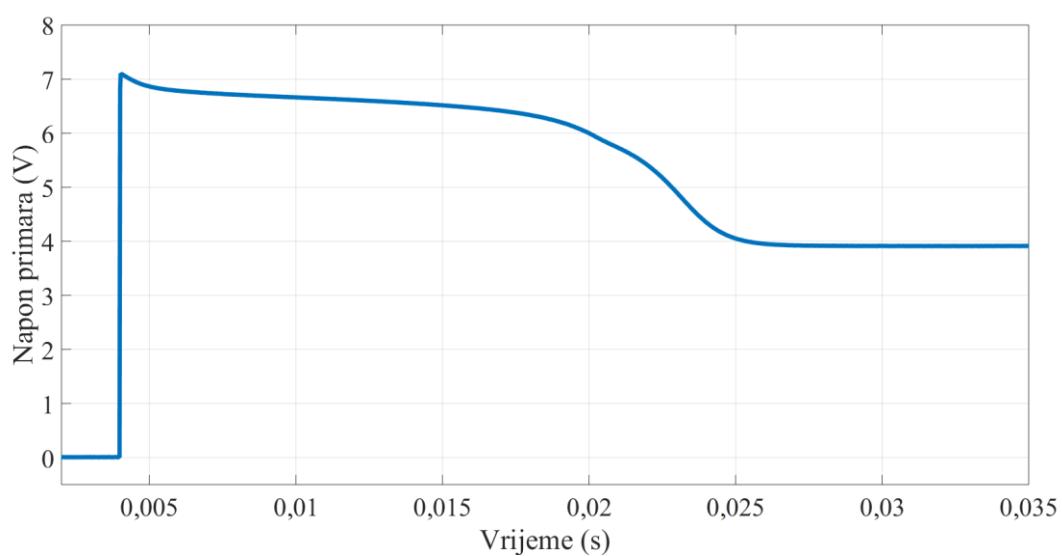
Slika 3.18. Laboratorijski sustav.

Kao izvor napajanja (modeliran izvorom u_3 na slici 2.1.) koristi se laboratorijski istosmjerni izvor promjenjivog napona pri čemu je vrijednost napona postavljena na 7 V. Kao i kod prethodne metode, izabrana vrijednost toka zasićenja (Φ_Z) iznosi 3,56 mVs, što odgovara struji zasićenja (I_Z) od 3 A. Transformator je na izvor spojen preko mehaničke sklopke (modelirane sklopkom S_3 na slici 2.1.), odnosno zaštitnog prekidača. Prilikom izvođenja ovog dijela mjernog postupka, sklopke S_1 i S_2 prikazane na slici 2.1. su isključene. Mjerenja su provedena za 25 različitih početnih vrijednosti remenantnog toka koje odgovaraju parametru efektivne vrijednosti napona promjenjivog izmjeničnog izvora (u_2) i trenutka isklopa sklopke S_2 : 36 V (–), 33 V (–), ..., 0 V, ..., 33 V (+) i 36 V (+).

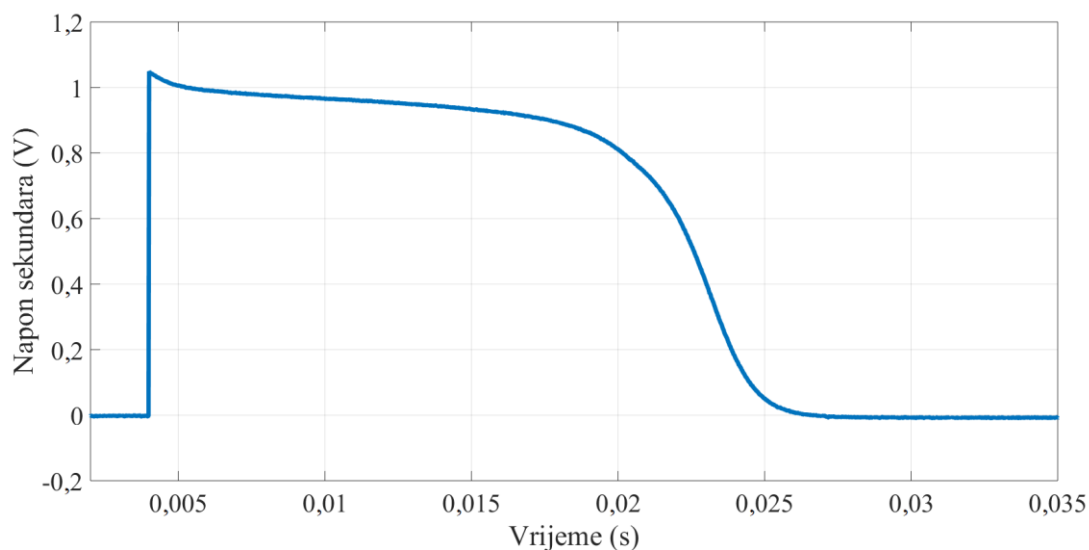
Rezultati za svako pojedino mjerenje uključuju snimljene valne oblike, nakon uklopa sklopke S_3 , struje magnetiziranja (i), napona primara (u_P), napona sekundara (u_S) te izračunati valni oblik magnetskog toka u jezgri transformatora (ϕ_{VO}) s pomoću programskog paketa MATLAB. Programski kod te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada. Primjeri snimljenih i izračunatih valnih oblika prikazani su na slikama 3.19., 3.20., 3.21. i 3.22.



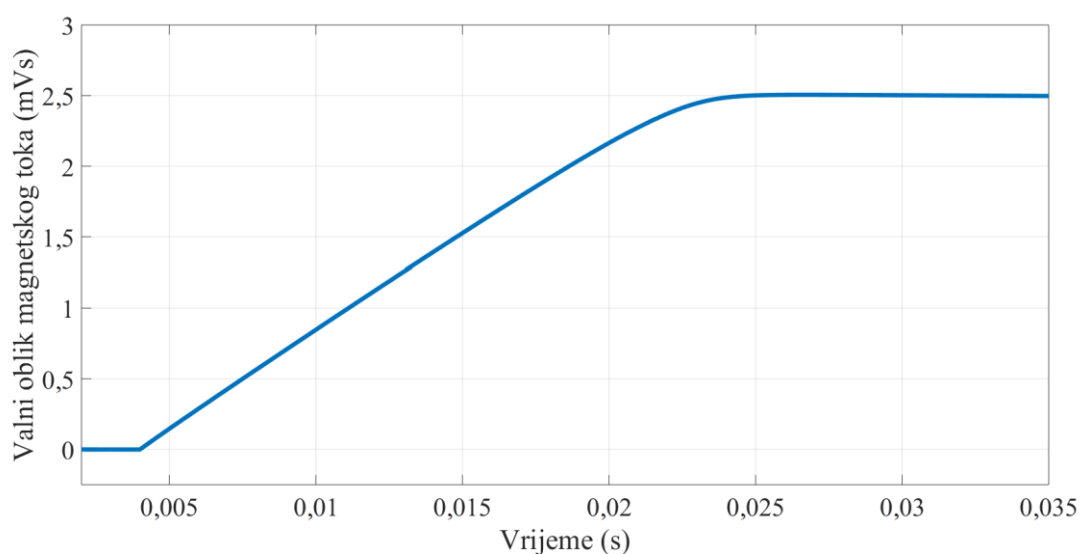
Slika 3.19. Struja magnetiziranja transformatora za $U_2 = 18 \text{ V (+)}$.



Slika 3.20. Napon primara transformatora za $U_2 = 18 \text{ V (+)}$.



Slika 3.21. Napon sekundara transformatora za $U_2 = 18 \text{ V (+)}$.

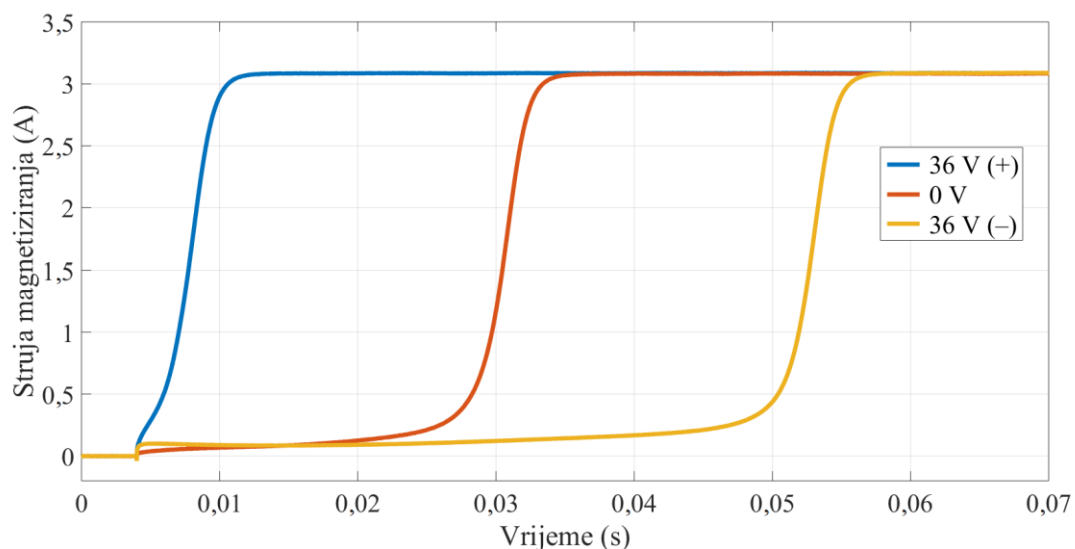


Slika 3.22. Valni oblik magnetskog toka (ϕ_{VO}) za $U_2 = 18 \text{ V (+)}$.

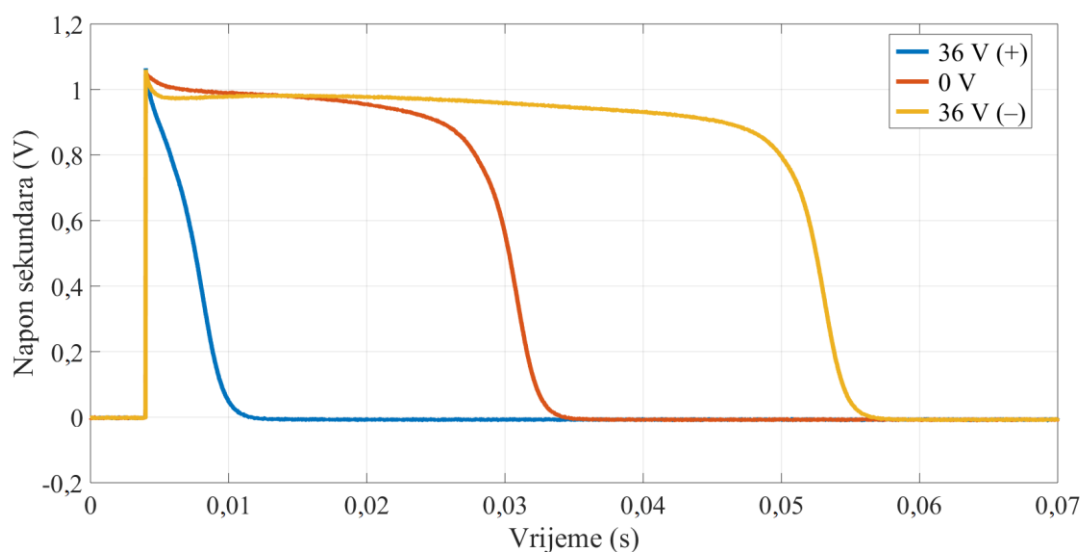
Iz prikazanih valnih oblika na slikama 3.19. i 3.22., može se vidjeti kako struja naglo poraste kada jezgra ode u zasićenje, odnosno magnetski tok postigne vrijednost blisku izabranom toku zasićenja. Struja magnetiziranja ograničena je otporom primarnog namota (R_T) i dodatnog otpornika (R_R), te unutarnjim otporom laboratorijskog istosmjernog izvora. Napon izvora izabran je tako da u ustaljenom stanju struja magnetiziranja zadrži vrijednost izabrane struje zasićenja (I_Z). Napon primara transformatora se od početne vrijednosti od 7 V, uslijed povećanja struje magnetiziranja, smanji na 4 V u ustaljenom stanju na slici 3.20. Razlog tome je pad napona na unutarnjem otporu izvora i otporu R_R (u modelu na slici 2.1.). Površina ispod krivulje napona

sekundara na slici 3.21. predstavlja magnetski tok razlike ($\Delta\phi$). Napon sekundara poprima nultu vrijednost nakon što struja magnetiziranja postigne vrijednost struje zasićenja, što znači da nakon toga nema promjene magnetskog toka u jezgri. Ta činjenica olakšava određivanje magnetskog toka razlike ($\Delta\phi$) prema jednadžbi (3-18) jer trenutak t_z ne mora biti precizno određen. Dakle, važno je samo da je gornja granica integrala trenutak koji dolazi poslije trenutka t_z u kojemu struja dosegne vrijednost struje zasićenja. Nadalje, iz slike 3.22. ne može se očitati početna vrijednost toka, odnosno vrijednost remanentnog toka, s obzirom da je prikazan samo valni oblik magnetskog toka (ϕ_{VO}) koji kreće od nulte vrijednosti. Međutim, remanentni tok može se i grafički odrediti na način da se krivulja valnog oblika magnetskog toka (ϕ_{VO}) pomakne tako da krajnja vrijednost magnetskog toka te krivulje poprimi vrijednost izabranog toka zasićenja. U tom slučaju, početna vrijednost magnetskog toka te krivulje bit će postavljena u vrijednost remanentnog toka, kao što je prikazano na slici 3.25.

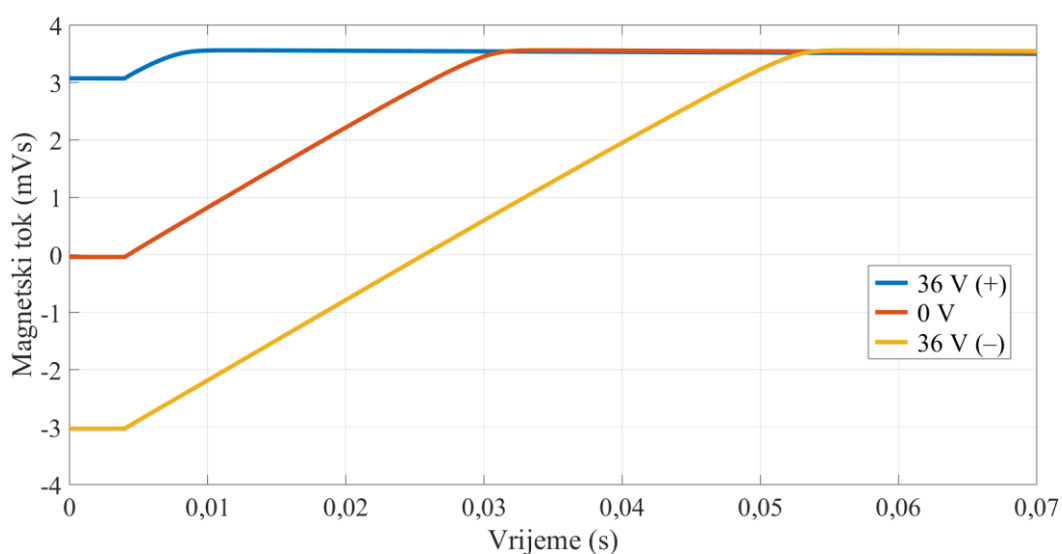
Nadalje, na slikama 3.23., 3.24. i 3.25. prikazani su snimljeni valni oblici struje magnetiziranja (i) i napona sekundara (u_s), te izračunati magnetski tok (ϕ) za karakteristične postavljene početne vrijednosti remanentnog toka, odnosno parametra U_2 .



Slika 3.23. Struja magnetiziranja za tri karakteristična parametra U_2 .



Slika 3.24. Napon sekundara za tri karakteristična parametra U_2 .

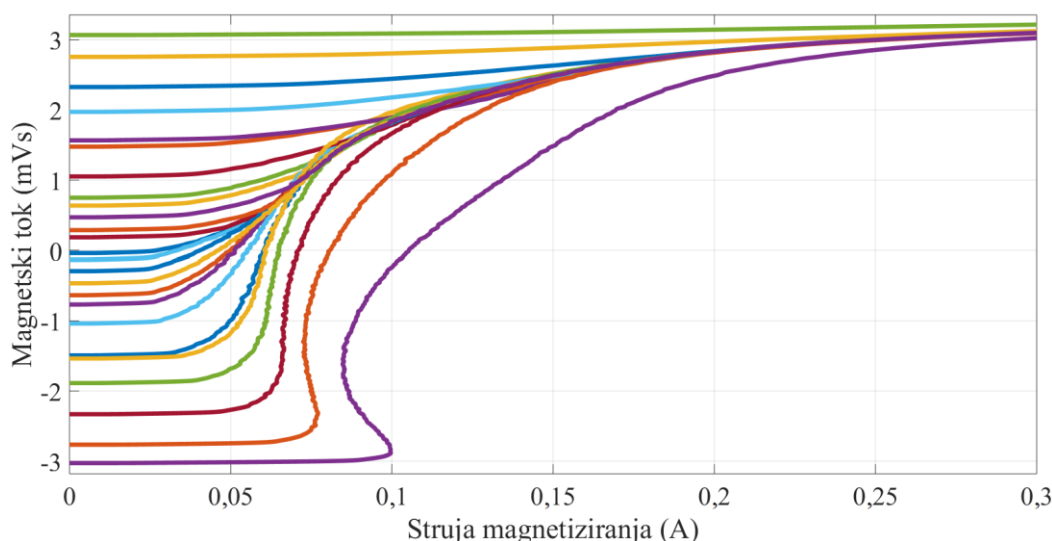


Slika 3.25. Magnetski tok (ϕ) za tri karakteristična parametra U_2 .

Struja magnetiziranja na slici 3.23. najranije poraste na vrijednost struje zasićenja za parametar $U_2 = 36 \text{ V (+)}$ jer je početna vrijednost remanentnog toka najbliža toku zasićenja, a narinut je jednak napon koji zapravo odgovara brzini rasta magnetskog toka u jezgri. Naravno, sukladno tome, za parametar $U_2 = 36 \text{ V (-)}$, struji treba najviše vremena za postići vrijednost struje zasićenja. Ista logika može se primijeniti i za napone sekundara prikazane na slici 3.24. Naime, površina ispod krivulje napona sekundara odgovara magnetskom toku razlike ($\Delta\phi$), a on će biti najmanji kada je postavljena najveća početna vrijednost remanentnog toka, a najveći kada je postavljena najmanja početna vrijednost. Za razliku od valnog oblika magnetskog toka (ϕ_{VO})

prikazanog na slici 3.22., magnetski tok (Φ) prikazan na slici 3.25. stvarni je prikaz magnetskog toka u jezgri transformatora s obzirom da kreće iz vrijednosti remanentnog toka na početku mjerenja te završava u vrijednosti toka zasićenja u novom ustaljenom stanju. Na taj se način vrijednost remanentnog toka može odrediti i grafički, odnosno očitati iz prikazanog vremenskog dijagrama. Također, brzina rasta toka u jezgri, odnosno nagib krivulje toka jednak je za sve parametre U_2 , što je i očekivano s obzirom na isti napon primara, a samim time i sekundara u svim slučajevima.

Nadalje, na slici 3.26. prikazane su krivulje magnetiziranja, odnosno putanje radnih točaka u Φ - i ravnini za svih 25 mjerenja.



Slika 3.26. Krivulje magnetiziranja u Φ - i ravnini za svih 25 mjerenja.

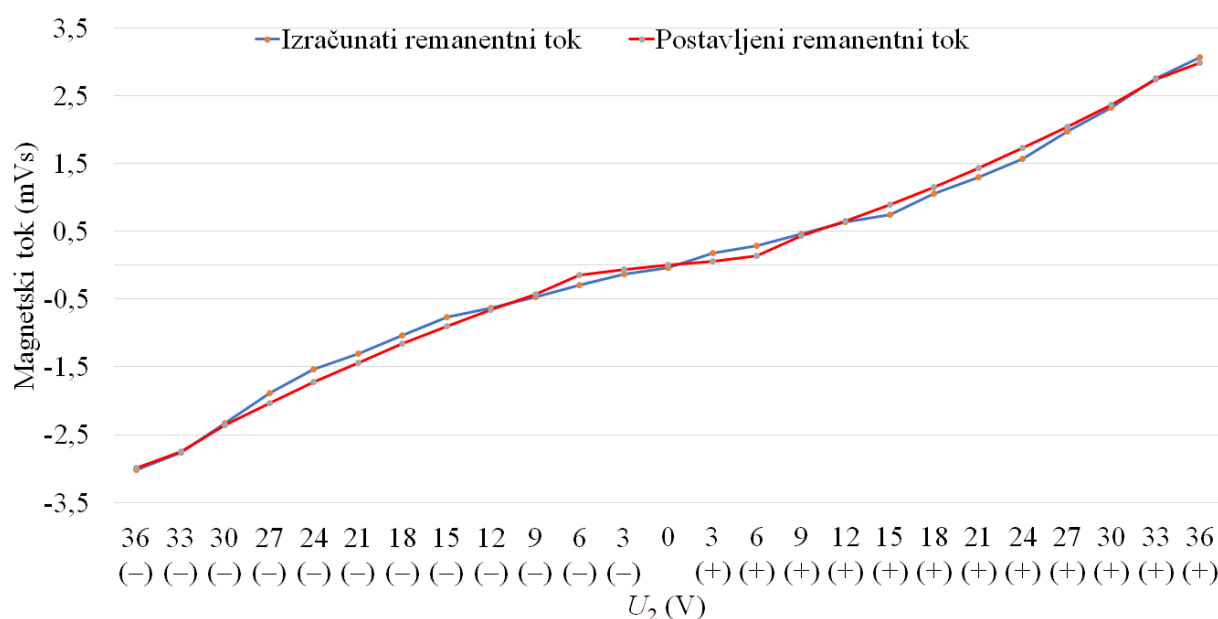
Radna točka u Φ - i ravnini na slici 3.26. putuje od nulte struje i postavljene početne vrijednosti remanentnog toka prema struji i toku zasićenja. Kako bi se krivulje mogle lakše razlikovati, uvećan je dio bliži ishodištu pa nije prikazana točka zasićenja, ali sve krivulje završavaju u izabranoj točki zasićenja (3 A, 3,56 mVs).

Za svako pojedino mjerenje, remanentni tok (Φ_R) u jezgri transformatora izračunat je kao razlika izabranog toka zasićenja (Φ_Z) i magnetskog toka razlike ($\Delta\Phi$), prema jednadžbi (3-17). Izračunate vrijednosti remanentnog toka te omjeri izračunatog i postavljenog remanentnog toka prikazani su u tablici 3.7.

Tablica 3.7. Izračunati remanentni tok i omjeri izračunatog i postavljenog remanentnog toka.

U_2 (V)	Izračunati remanentni tok, Φ_R (mVs)	Izračunata / postavljena vrijednost	U_2 (V)	Izračunati remanentni tok, Φ_R (mVs)	Izračunata / postavljena vrijednost
36 (+)	3,072	102,50 %	36 (-)	-3,026	100,97 %
33 (+)	2,760	100,30 %	33 (-)	-2,764	100,42 %
30 (+)	2,330	98,55 %	30 (-)	-2,329	98,49 %
27 (+)	1,975	96,83 %	27 (-)	-1,885	92,37 %
24 (+)	1,569	90,76 %	24 (-)	-1,534	88,77 %
21 (+)	1,305	90,51 %	21 (-)	-1,306	90,58 %
18 (+)	1,055	91,51 %	18 (-)	-1,035	89,79 %
15 (+)	0,751	83,32 %	15 (-)	-0,764	84,77 %
12 (+)	0,638	98,26 %	12 (-)	-0,631	97,12 %
9 (+)	0,472	108,94 %	9 (-)	-0,461	106,52 %
6 (+)	0,288	206,09 %	6 (-)	-0,288	206,19 %
3 (+)	0,186	304,63 %	3 (-)	-0,129	211,09 %

Srednje vrijednosti remanentnog toka u tablici 3.7. nalaze se između 83 % i 108 % pripadajućih postavljenih vrijednosti za većinu parametara U_2 . Veća odstupanja pojavljuju se za parametre $U_2 = 3$ V (+), $U_2 = 3$ V (-), $U_2 = 6$ V (+) i $U_2 = 6$ V (-). Razlog tome je, kao i kod prethodnih metoda, relativno neprecizno postavljanje početne vrijednosti remanentnog toka. Najveća podudarnost izračunatih i postavljenih vrijednosti remanentnog toka, gdje je njihov omjer između 98,55 % i 102,50 %, vidljiva je za najveće apsolutne vrijednosti remanentnog toka koje odgovaraju parametrima U_2 od 30 V do 36 V za oba predznaka. Nadalje, izračunate i postavljene početne vrijednosti remanentnog toka prikazane su na slici 3.27. za svaki parametar U_2 .



Slika 3.27. Izračunate i postavljene vrijednosti remanentnog toka.

Na kraju, dokazano je kako se korištenjem i ove metode može precizno odrediti remanentni tok u magnetskoj jezgri bez podataka o stanjima jezgre prije mjerenja. Međutim, kao i kod prethodno opisane metode u potpoglavlju 3.2., potrebno je snimiti glavnu petlju histereze te izabrati točku zasićenja na toj petlji prije prve primjene metode. Također, za određivanje remanentnog toka primjenom ove metode, potrebno je provesti samo mjerenje napona sekundara (u_s) koji odgovara naponu induktiviteta (u_L) u modelu na slici 2.1.

4. METODA ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA ANALIZIRANJEM MALE PETLJE HISTEREZE

Metoda određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze može uspješno odgovoriti na oba postavljena izazova. Dakle, može pouzdano i precizno odrediti remanentni tok na kraju razdoblja neuklopljenosti transformatora, kao i prve tri metode, ali može i odrediti remanentni tok uz uvjet da njegova vrijednost ne bude promijenjena nakon provođenja mjernog postupka. To je ključna prednost u odnosu na prve tri metode predstavljene u ovom radu jer time se područje primjene proširuje i na smanjenje udarne struje magnetiziranja, naravno, u kombinaciji s kontroliranim uklopom. Također, to je i značajna prednost u odnosu na najčešće korištenu metodu [1 – 5, 7, 12, 41, 46] jer njezinom se primjenom ne može odrediti remanentni tok ako prethodna stanja nisu poznata, odnosno ako napon nije sniman prije isključenja. Dodatno, primjenom novorazvijene metode, remanentni tok je određen neposredno prije uklopa transformatora, što znači da eventualna promjena remanentnog toka nakon posljednjeg isklopa transformatora uslijed vanjskih utjecaja [47] ili magnetske viskoznosti [48] ne utječe na pouzdanost ove metode. Iako postoje metode koje mogu odrediti remanentni tok bez podataka o prethodnim stanjima, mjerenjem rasipnog magnetskog toka u blizini jezgre [49, 50] i mjerenjem dinamičkog induktiviteta jednog od namota transformatora [51], novorazvijena metoda predstavljena u ovom poglavlju ima prednosti u odnosu na njih u smislu preciznosti te jednostavnije implementacije. Također, jedna od prednosti ove metode je upotreba izvora relativno niskog napona za generiranje testnog signala prilikom određivanja remanentnog toka, što je posebno važno kod visokonaponskih energetske transformatora. Nadalje, metoda je neinvazivna u smislu da nema potrebe za bilo kakvom fizičkom intervencijom u jezgri ili neki drugi dio transformatora. Potrebno je provesti samo mjerenja napona sekundara i struje primara transformatora.

Međutim, ova metoda ima i nedostatak u smislu potrebe za testiranjem transformatora prije primjene metode. Naime, kako bi remanentni tok bio određen, potrebno je uspostaviti funkciju ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q koji će detaljnije biti opisan u nastavku ovoga poglavlja. Doduše, u elektroenergetskom sustavu postoji značajan broj energetske transformatora istoga tipa (ista konstrukcija i nazivna snaga) pa testiranje, odnosno uspostavljena funkcija za jedan transformator može biti primijenjena na sve transformatore istoga tipa.

4.1. Teorijska podloga

Osnovna ideja ove metode je odrediti remanentni tok analiziranjem napona sekundara i struje primara transformatora nakon primjene testnog signala. Naime, ako je isti testni signal narinut na primar neopterećenog transformatora, valni oblici napona sekundara i struje primara bit će različiti u ovisnosti o iznosu remanentnog toka u jezgri transformatora. Dokaz tome su prikazane krivulje magnetiziranja, odnosno putanje radnih točaka u φ - i ravnini na slici 3.26. za isti testni napon (u tom slučaju istosmjerni napon) i različite početne vrijednosti remanentnog toka.

Međutim, cilj je očuvati remanentni tok u jezgri pa primjena istosmjernog napona kao testnog signala nije prihvatljiva jer bi u tom slučaju nakon provedenih mjerenja remanentni tok poprimio maksimalnu vrijednost. Prema tome, testni signal mora biti izmjenični (bez istosmjerne komponente), što će osigurati da nakon provedenih mjerenja tok u jezgri ne bude promijenjen. Drugim riječima, magnetski tok doveden u jezgru tijekom mjerenja, mora biti jednak odvedenom. Nadalje, testni signal treba biti što kraći, odnosno vrijeme primjene testnog signala treba biti što kraće. Naime, ako je na primar neopterećenog transformatora narinut izmjenični napon, magnetski tok u jezgri bit će također izmjenični u uspostavljenom novom ustaljenom stanju, kao što je dokazano u potpoglavlju 3.1. ovoga rada primjenom jednadžbe (3-3) i karakteristike na slici 2.3. To bi značilo da remanentni tok neće biti očuvan jer radna točka u φ - i ravnini na početku mjerenja ne bi bila ista onoj na kraju mjerenja, odnosno lagano bi se kretala po zamišljenoj spirali prema ishodištu.

Konačno, napon primara kao testni signal treba uzrokovati što manju promjenu vrijednosti magnetskog toka u jezgri tijekom postupka mjerenja. Ovo je posebno važno zbog složene φ - i karakteristike transformatora s magnetskom jezgrom. Primjerice, ako je kao testni signal primijenjen nazivni napon primara transformatora u trajanju jedne periode, jezgra će vrlo vjerojatno otići u zasićenje tijekom mjerenja (ovisno o faznom kutu napona pri uklopu i iznosu remanentnog toka u jezgri). U tom slučaju, koristeći model prikazan na slici 3.1., struja magnetiziranja (i) imat će asimetričan oblik tijekom te jedne periode, odnosno njezina istosmjerna komponenta neće biti jednaka nuli. Nadalje, ako se jednadžba (3-2) integrira po vremenu od trenutka $t = 0$ do $t = T$, pri čemu je T period nazivnog napona primara transformatora, odnosno testnog signala:

$$R \int_0^T i dt + N \int_0^T \frac{d\varphi}{dt} dt = \int_0^T \hat{U} \sin \omega t dt, \quad (4-1)$$

integral napona primara bit će jednak nuli s obzirom da je njegova istosmjerna komponenta jednaka nuli, odnosno desna strana jednadžbe bit će jednaka nuli. Prema tome, jednadžba (4-1) može se zapisati kao:

$$R \int_0^T i dt = -N \int_{\varphi(0)}^{\varphi(T)} d\varphi = -N [\varphi(T) - \varphi(0)]. \quad (4-2)$$

Slijedom toga, magnetski tok u jezgri u trenutku $t = T$ bit će jednak:

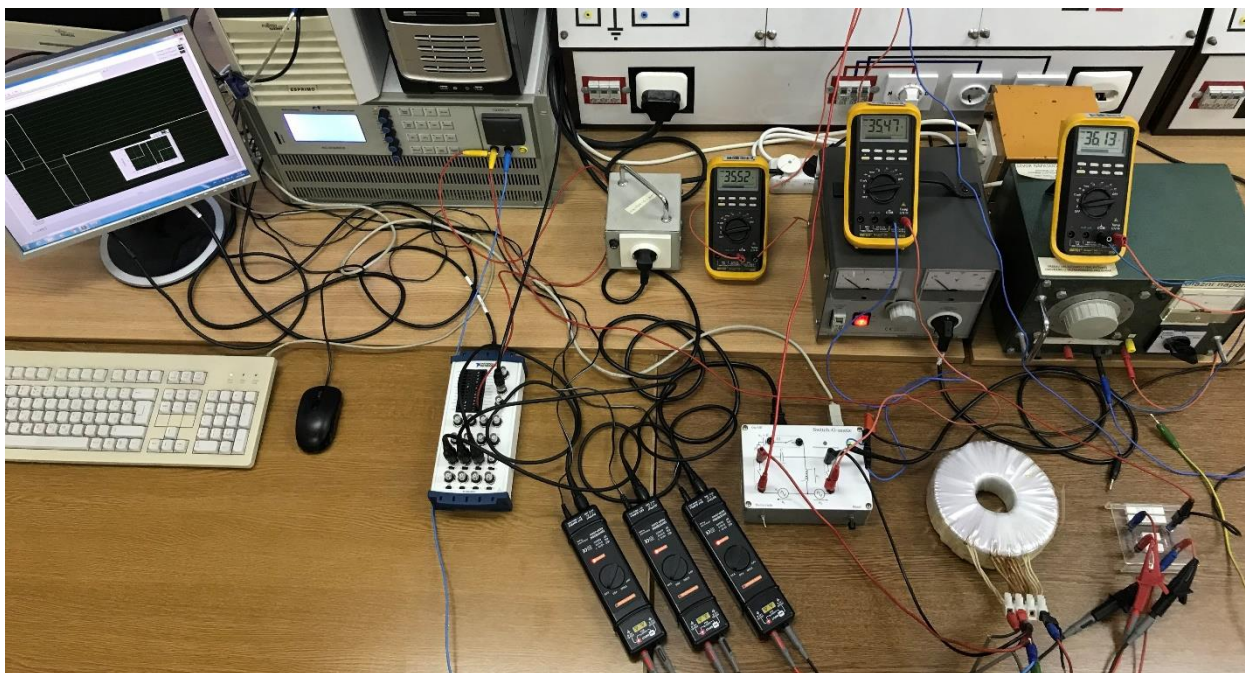
$$\varphi(T) = \varphi(0) - \frac{R}{N} \int_0^T i dt, \quad (4-3)$$

što znači da remanentni tok u jezgri neće biti očuvan, odnosno neće biti isti na početku i na kraju mjernog postupka ako istosmjerna komponenta struje magnetiziranja (i) ne bude jednaka nuli tijekom mjernog postupka. Drugim riječima, ako istosmjerna komponenta napona induktiviteta (u_L), koji je proporcionalan naponu sekundara (u_S), ne bude jednaka nuli tijekom mjernog postupka, ukupna suma promjene magnetskog toka u jezgri neće biti jednaka nuli, odnosno dovedeni i odvedeni tok u jezgri tijekom mjernog postupka neće biti jednaki. Prema tome, testni napon primara ne smije uzrokovati zasićenje jezgre jer će to dovesti do asimetričnog valnog oblika struje, a što će za posljedicu imati različit remanentni tok u jezgri na početku i na kraju mjernog postupka. Stoga, promjena magnetskog toka u jezgri tijekom mjernog postupka treba biti što manja.

Uzimajući u obzir sve prethodno navedene uvjete, testni signal narinut na primar transformatora trebao bi biti izmjenični (bez istosmjerne komponente) i što kraćeg trajanja, te uzrokovati što manju promjenu magnetskog toka u jezgri.

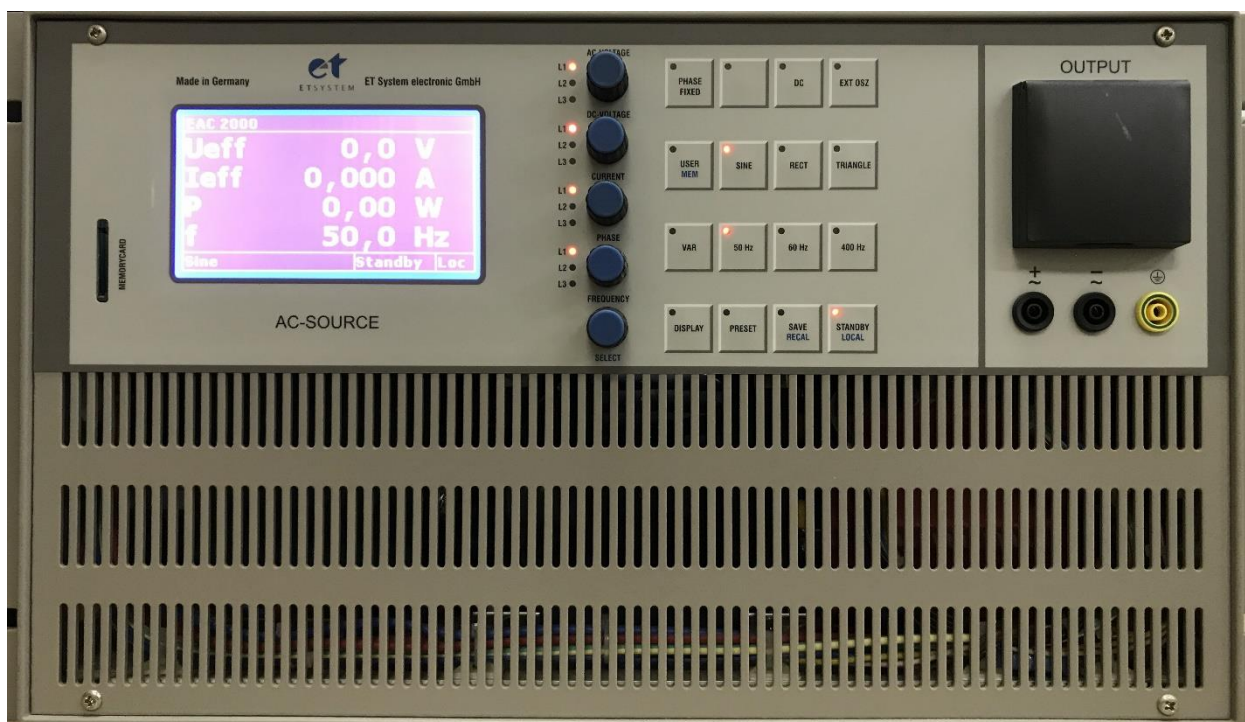
4.2. Rezultati mjerenja

Laboratorijski sustav za provedbu metode određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1. Laboratorijski sustav.

Kao izvor testnog naponskog signala (modeliran izvorom u_3 na slici 2.1.) koristi se programabilni izmjenični laboratorijski izvor ET System EAC-S2000 nazivne snage 2000 VA prikazan na slici 4.2.

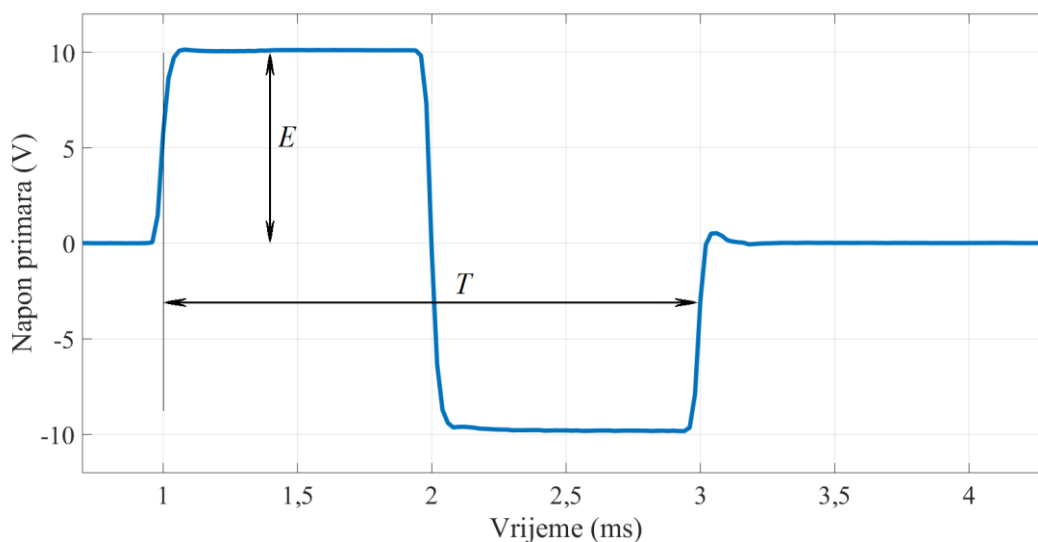


Slika 4.2. Programabilni izmjenični laboratorijski izvor ET System EAC-S2000.

Transformator je na izvor spojen preko mehaničke sklopke (modelirane sklopkom S_3 na slici 2.1.). Prilikom izvođenja ovoga dijela mjernog postupka, sklopke S_1 i S_2 prikazane na slici 2.1. su isključene. Tijekom mjernog postupka, naponi primara (u_P) i sekundara (u_S), te napon dodatnog otpornika za potrebe izračuna struje magnetiziranja (i), snimani su korištenjem aktivne diferencijalne sonde GW Instek GDP-025 koja je prikazana na slici 2.7. U potencijalnoj primjeni ove metode, izvodi se jedino ovaj korak mjernog postupka, opisan u ovom potpoglavlju, bez prethodnog postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka.

U ovom radu će kao testni signal biti primijenjena jedna perioda izmjeničnog napona pravokutnog valnog oblika, odnosno kombinacija pozitivne i negativne funkcije skoka (Heavisideova step funkcija). Naime, funkcija skoka često je upotrebljavana za dobivanje odziva u vremenskoj domeni, odnosno skokovnog odziva, te relativno jednostavno može biti realizirana s pomoću istosmjernog izvora s promjenjivim polaritetom stezaljki.

Neposredno nakon postavljanja početne vrijednosti remanentnog toka opisanog u drugom poglavlju ovoga rada, na primar transformatora bit će narinut testni naponski signal prikazan na slici 4.3.



Slika 4.3. Testni naponski signal narinut na primar transformatora.

Na slici 4.3., parametar E je amplituda testnog naponskog signala, a parametar T trajanje periode. Postoje odstupanja testnog signala prikazanog na slici 4.3. od idealne funkcije skoka kao posljedica parazitnih elemenata u mjernom krugu. Međutim, ta odstupanja neće utjecati na

rezultat mjerenja, prvenstveno iz razloga što i ovakav valni oblik udovoljava svim prethodno navedenim uvjetima. Dodatno, stvarni snimljeni valni oblici napona sekundara bit će integrirani za dobivanje valnih oblika magnetskog toka u jezgri, a ne pretpostavljeni idealni. Pravokutni izmjenični signal jedini je koji se koristi kao testni signal u ovom radu, ali u budućim istraživanjima metoda će biti provjerena i s drugim valnim oblicima koji zadovoljavaju uvjete navedene u potpoglavlju 4.1. (sinusni, trokutasti, pilasti, itd.). Kako bi bila dokazana valjanost novorazvijene metode neovisno o izboru parametara E i T testnog signala, dok god njihova kombinacija uzrokuje relativno malu promjenu magnetskog toka u jezgri, mjerenja su provedena uz tri para parametara E i T :

- 1 V, 20 ms;
- 4 V, 5 ms;
- 10 V, 2 ms.

Dakle, uz postavljenih 25 različitih početnih vrijednosti remenantnog toka koje odgovaraju parametru efektivne vrijednosti napona promjenjivog izmjeničnog izvora (u_2) i trenutka isklopa sklopke S_2 (prikazanog na slici 2.8.): 36 V (–), 33 V (–), ..., 0 V, ..., 33 V (+) i 36 V (+); bit će ukupno 75 mjerenja.

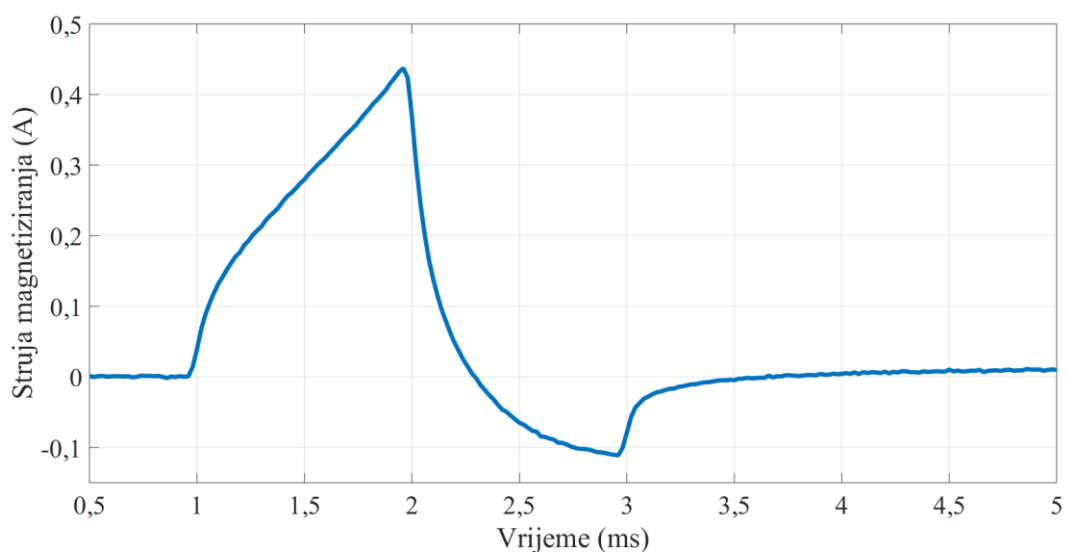
Magnetski tok doveden u jezgru tijekom prve poluperiode testnog signala:

$$\Phi\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{1}{N_2} \int_0^{T/2} u_s(t) dt, \quad (4-4)$$

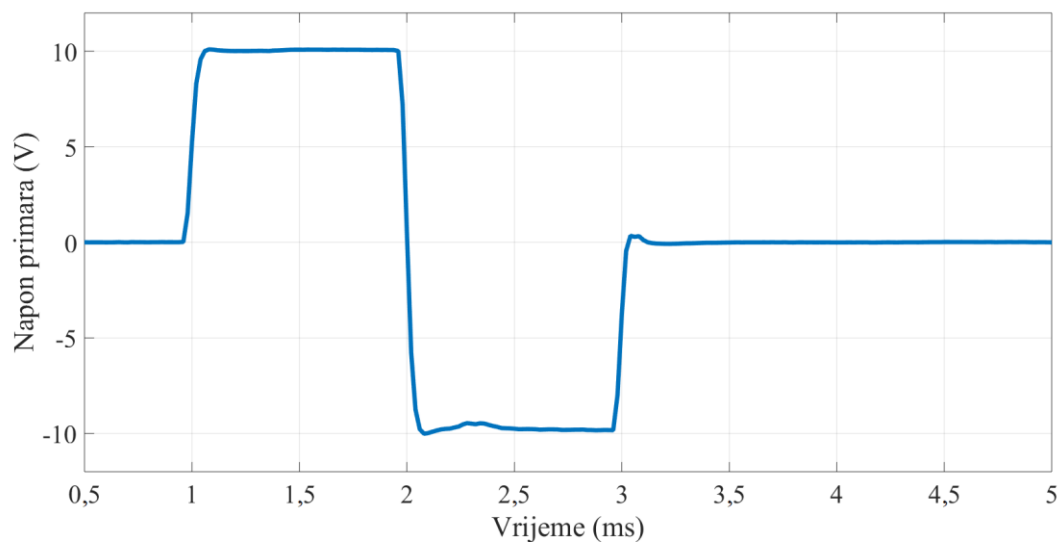
gdje je N_2 broj zavoja sekundarnog namota, bit će jednak za sve parove parametara E i T , te iznositi 0,21 mVs, što je oko 7 % od maksimalne vrijednosti remanentnog toka u jezgri (3 mVs). Prema tome, testni naponski signal udovoljava svim postavljenim uvjetima – izmjeničan je, ograničenoga trajanja te ne mijenja magnetski tok u jezgri značajno tijekom mjernoga postupka. Naravno, cilj je što manje mijenjati magnetski tok u jezgri prilikom mjernog postupka, pa i manje od 7 %. Međutim, u ovom radu, s obzirom na karakteristike korištenog transformatora, pripadajućih izvora i mjerne opreme, iznos od 7 % je najmanji moguć. Naime, u slučaju korištenja nižih napona od 1 V, utjecaj parazitnih elemenata, prvenstveno otpora, bio bi prevelik. Nadalje, u slučaju korištenja viših frekvencija od 500 Hz ($T = 2$ ms), broj uzoraka unutar jedne periode testnog signala bio bi manji od 100, zbog maksimalne frekvencije uzorkovanja korištene

multifunkcijske akvizicijske (DAQ) kartice (prikazane na slici 2.6.) od 50 kHz (koja je i korištena pri mjerenju). Međutim, primjenom ove metode na transformatorima veće snage, iznos od 7 % moći će biti značajno manji s obzirom na veće vrijednosti maksimalnog remanentnog toka u jezgri tih transformatora, što će biti i učinjeno u budućim istraživanjima. Također, u budućim istraživanjima bit će ispitana i kombinacija parametara $E = 1 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$ ($f = 500 \text{ Hz}$) koja ovdje nije ispitana jer je cilj bio ispitati nekoliko kombinacija parametara E i T , ali uz isti iznos promjene magnetskog toka u jezgri tijekom mjernog postupka.

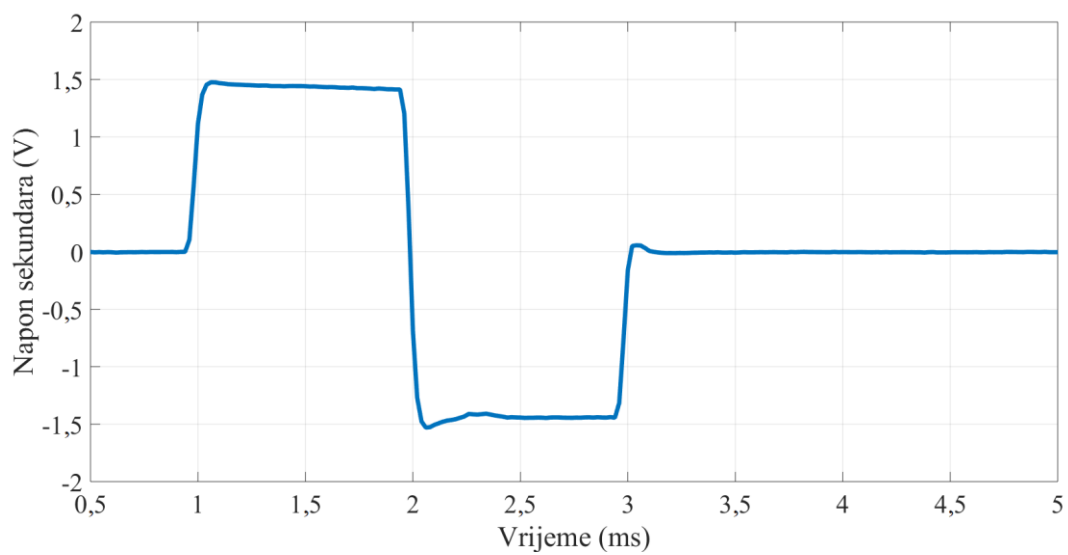
Rezultati za svako pojedino mjerenje uključuju snimljene valne oblike, nakon uklopa sklopke S_3 i primjene testnog signala, struje magnetiziranja (i), napona primara (u_p), napona sekundara (u_s) te izračunati valni oblik magnetskog toka u jezgri transformatora (ϕ_{VO}) s pomoću programskog paketa MATLAB. Programski kod te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada. Primjeri snimljenih i izračunatih valnih oblika prikazani su na slikama 4.4., 4.5., 4.6. i 4.7. za parametre $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.



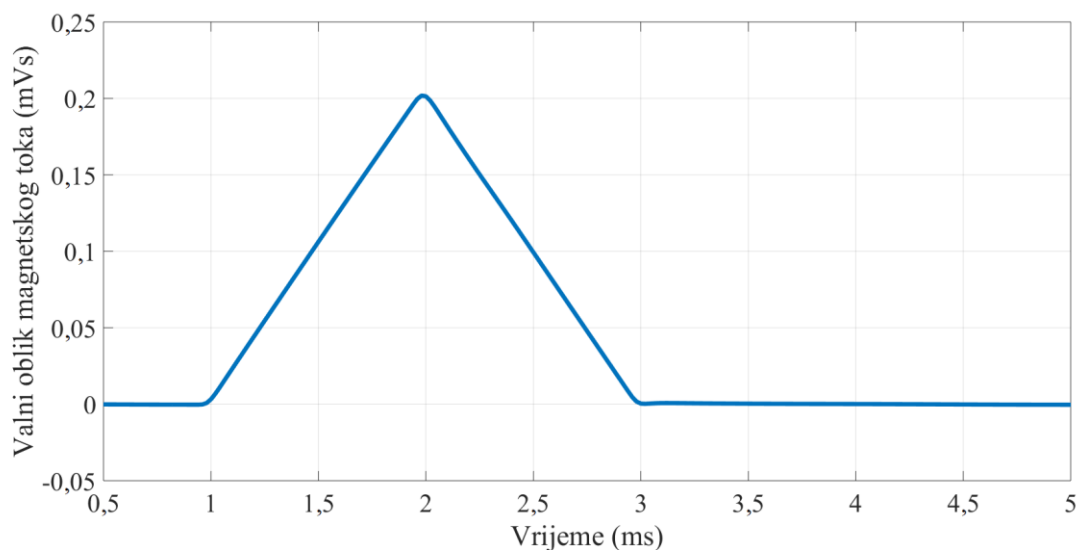
Slika 4.4. Struja magnetiziranja za parametre $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.



Slika 4.5. Napon primara transformatora za parametre $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.



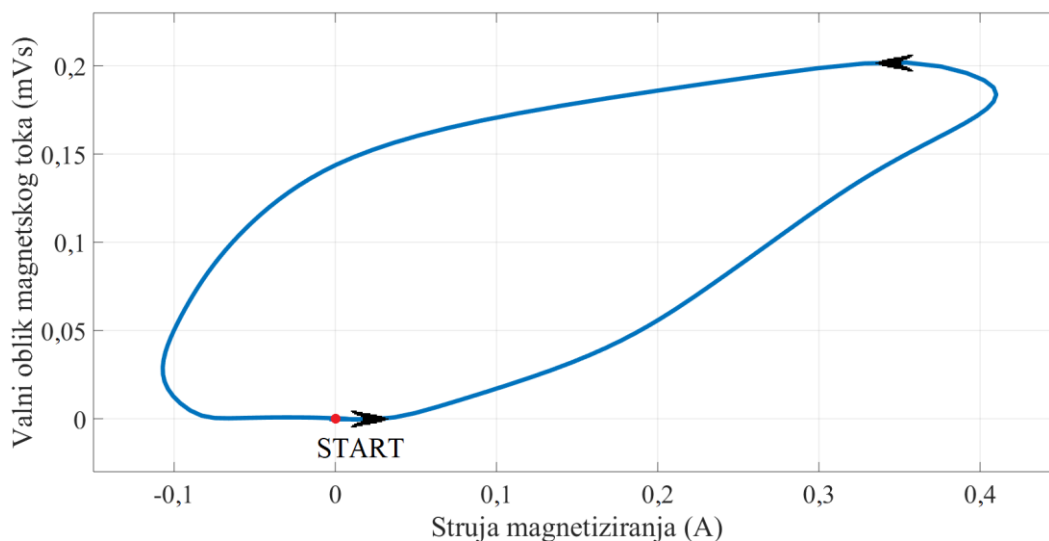
Slika 4.6. Napon sekundara transformatora za parametre $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.



Slika 4.7. Valni oblik magnetskog toka (ϕ_{vo}) za parametre $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.

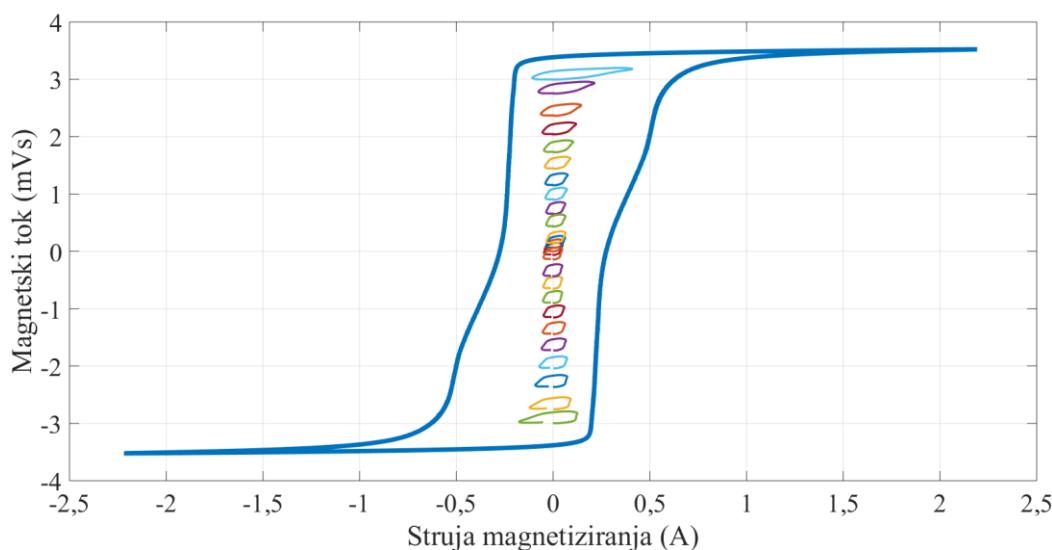
Struja magnetiziranja (i) prikazana na slici 4.4. nije simetričnog valnog oblika, ali njezina maksimalna pozitivna vrijednost nije značajno veća od maksimalne negativne vrijednosti. Naime, razlika te dvije vrijednosti u slučaju zasićenja jezgre može biti puno veća, što se vidi na slikama 3.7. i 3.10. To znači da napon primara (u_P) i napon sekundara (u_S), prikazani na slikama 4.5. i 4.6., neće biti značajno izobličeni. Dakle, srednja vrijednost napona sekundara približno je jednaka nuli, što se može vidjeti i iz valnog oblika magnetskog toka (ϕ_{vo}) prikazanog na slici 4.7., jer je njegova početna vrijednost jednaka krajnjoj. Ujedno, valni oblik magnetskog toka u jezgri dokaz je kako se primjenom ove metode vrijednost remanentnog toka neće promijeniti, odnosno bit će očuvana, što je ključna prednost ove metode u odnosu na prve tri predstavljene u trećem poglavlju ovoga rada.

Za određivanje remanentnog toka, ključni su snimljeni valni oblici struje magnetiziranja (i) i napona sekundara (u_S) iz kojega se računa valni oblik magnetskog toka u programskom paketu MATLAB primjenom jednadžbe (3-7), gdje je $u_L = u_S$ i $N = N_2$. Iz tih valnih oblika dobije se mala petlja histereze u ϕ - i ravlini, čiji je primjer za parametre $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$ prikazan na slici 4.8.



Slika 4.8. Mala petlja histereze za parametre $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.

Mala petlja histereze prikazana na slici 4.8. na vertikalnoj koordinatnoj osi ima valni oblik magnetskog toka (ϕ_{VO}) jer u trenutku neposredno nakon mjerenja remanentni tok nije poznat, a samim time nije poznata ni stvarna vrijednost magnetskog toka u jezgri, samo njezin valni oblik. Dakle, za svih 75 mjerenja dobivene su ovakve male petlje histereze na temelju kojih se treba odrediti vrijednost remanentnog toka u jezgri. Nadalje, ako se za vrijednost remanentnog toka uzme postavljena početna vrijednost iz tablice 2.1., dobivene male petlje histereze za svih 25 postavljenih početnih vrijednosti remanentnog toka za parametre $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$, prikazane su unutar glavne petlje histereze na slici 4.9.



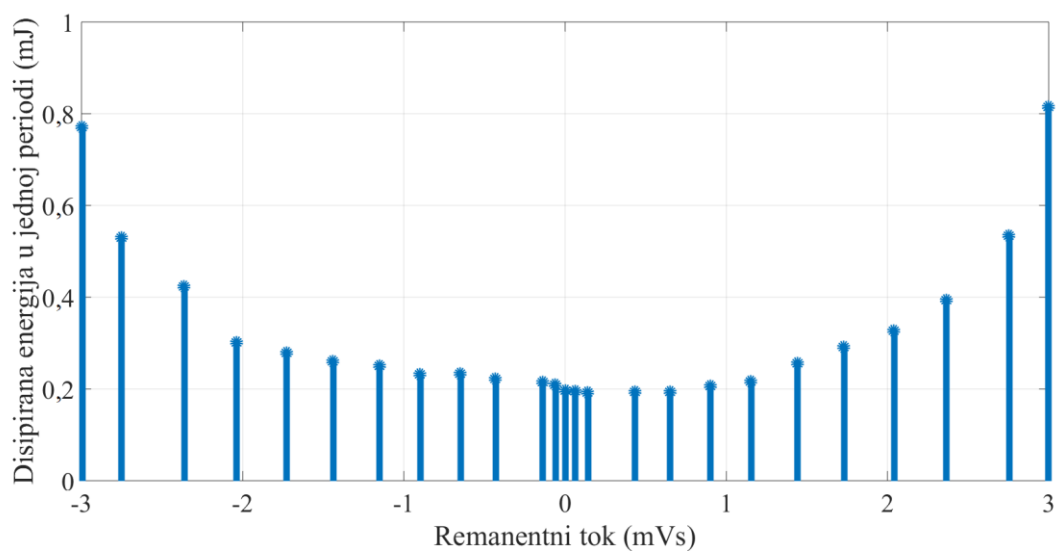
Slika 4.9. Svih 25 malih petlji histereze za parametre $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$ unutar glavne petlje histereze transformatora.

Male petlje histereze za parametre $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$, za svih 25 postavljenih početnih vrijednosti remanentnog toka prikazane su na slici 4.9. kako bi se vidio omjer glavne petlje histereze i dobivenih malih petlji, odnosno promjena magnetskog toka u jezgri tijekom mjernog postupka u odnosu na maksimalnu vrijednost remanentnog toka.

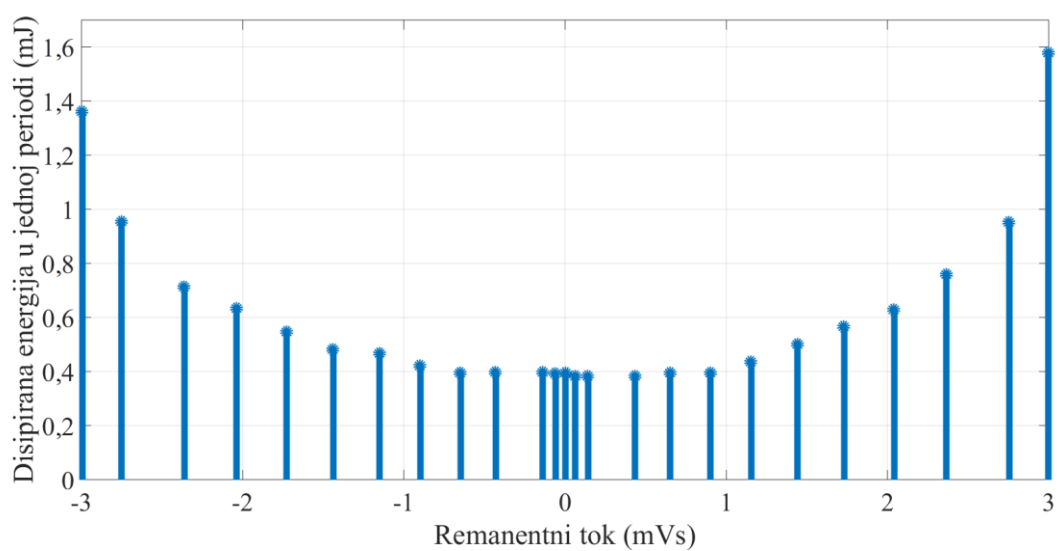
Sljedeći korak je uspostavljanje funkcije ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru izvedenom iz snimljenih valnih oblika. Stoga, ključno je pronaći razlike u snimljenim valnim oblicima struje magnetiziranja i napona sekundara za različite postavljene početne vrijednosti remanentnog toka. Prvi parametar bit će površina male petlje histereze u φ - i ravnini pomnožena s brojem zavoja primarnog namota, što odgovara električnoj energiji pretvorenoj u toplinsku energiju (W) u jednoj periodi (T) testnog signala:

$$W = \int_0^T \frac{N_1}{N_2} u_s(t) i(t) dt = \int_0^T u_L(t) i(t) dt = \int_0^T N_1 \frac{d\varphi}{dt} i(t) dt = N_1 \int_{\varphi(0)}^{\varphi(T)} i(\varphi) d\varphi. \quad (4-5)$$

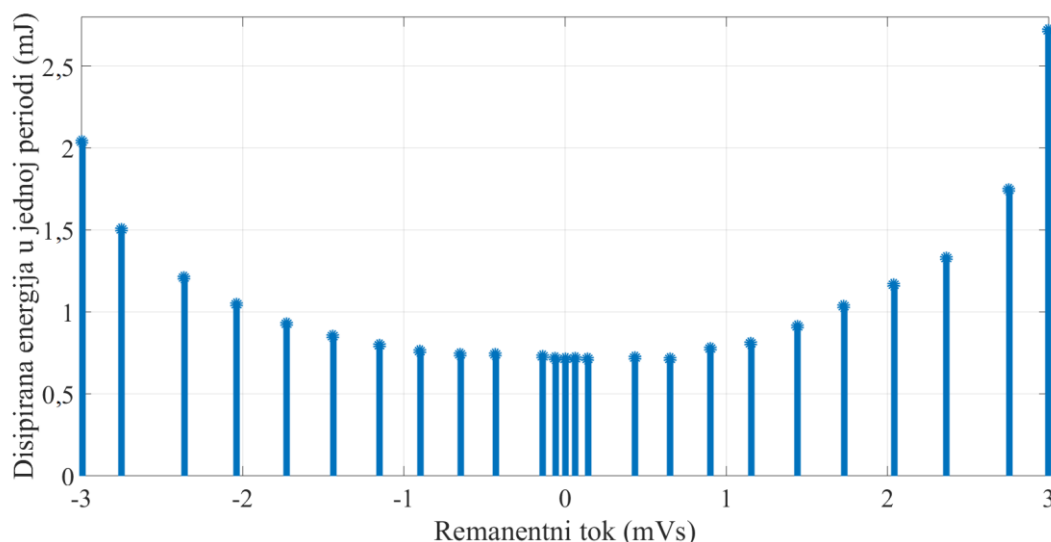
Disipirana energija u jednoj periodi (W) za sve postavljene početne vrijednosti remanentnog toka i za sve parove parametara E i T prikazana je na slikama 4.10., 4.11. i 4.12.



Slika 4.10. Disipirana energija u jednoj periodi (W) za parametre $E = 1$ V i $T = 20$ ms.



Slika 4.11. Disipirana energija u jednoj periodi (W) za parametre $E = 4$ V i $T = 5$ ms.



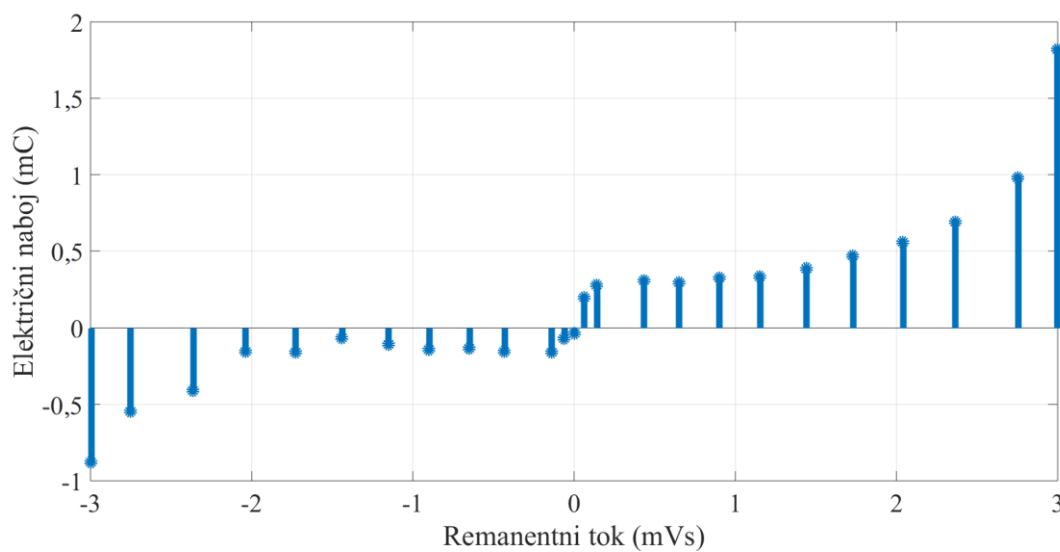
Slika 4.12. Disipirana energija u jednoj periodi (W) za parametre $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.

Površina male petlje histereze mijenja se u ovisnosti o remanentnom toku u jezgri, kao što se može vidjeti na slikama 4.10, 4.11. i 4.12. Općenito, površina petlje povećava se s povećanjem parametra E , odnosno smanjenjem parametra T . Međutim, parametar disipirane energije u jednoj periodu (W) ne može samostalno biti korišten s obzirom da ne daje informaciju o predznaku remanentnog toka. Dakle, kao što se može vidjeti na slikama 4.10, 4.11. i 4.12., za istu vrijednost parametra W , remanentni tok može imati dvije vrijednosti, jednu negativnu i jednu pozitivnu. Stoga, morat će biti korišten dodatni parametar koji će dati informaciju o predznaku.

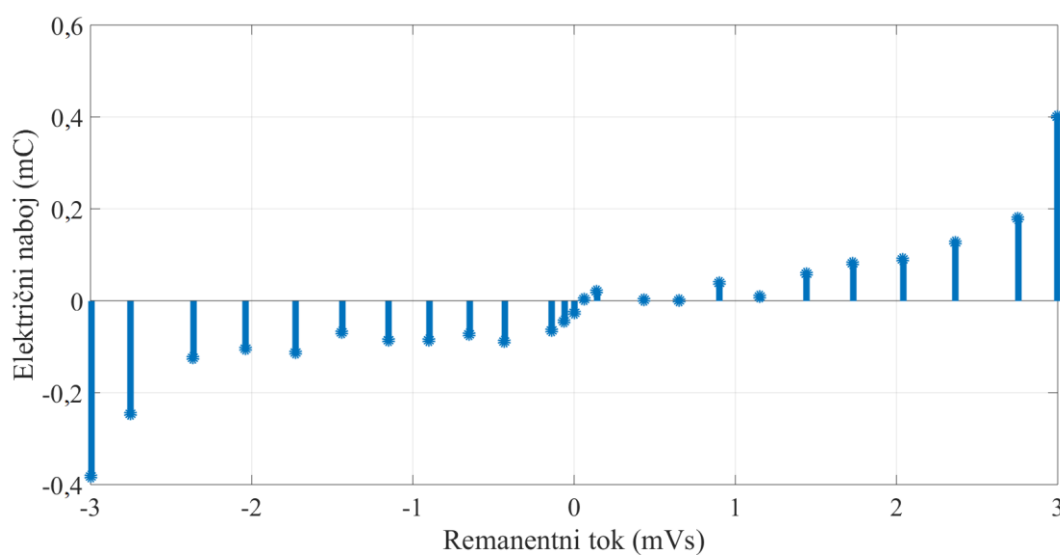
Drugi parametar bit će površina ispod valnog oblika struje magnetiziranja, što odgovara električnom naboju (Q) prenesenom kroz primarni namot transformatora od trenutka primjene testnog signala do nekog trenutka $t_1 > T$:

$$Q = \int_0^{t_1} i(t) dt . \quad (4-6)$$

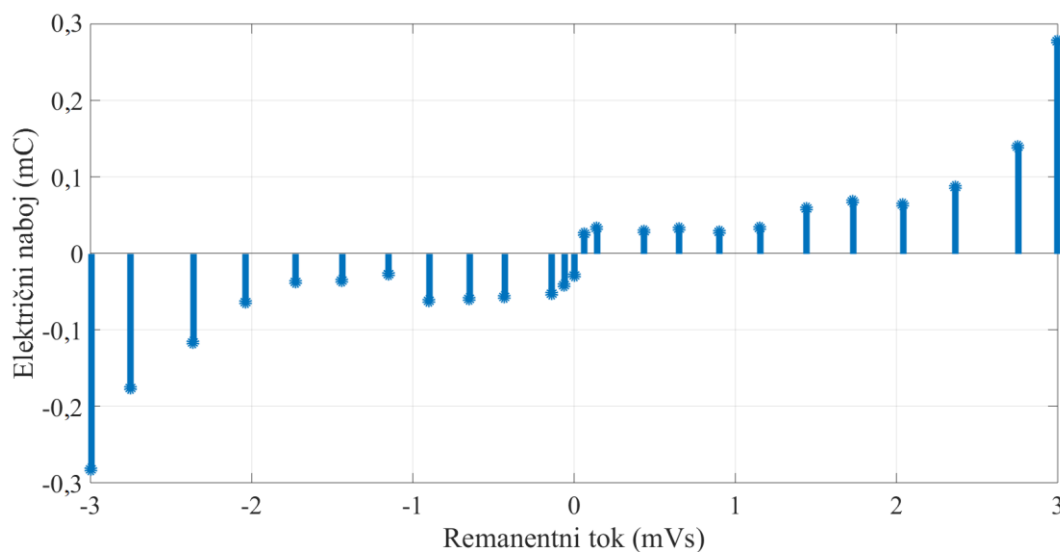
Vrijednost električnog naboja (Q) za sve postavljene početne vrijednosti remanentnog toka i za sve parove parametara E i T prikazana je na slikama 4.13., 4.14. i 4.15.



Slika 4.13. Vrijednosti električnog naboja (Q) za parametre $E = 1$ V, $T = 20$ ms i $t_1 = 2T$.

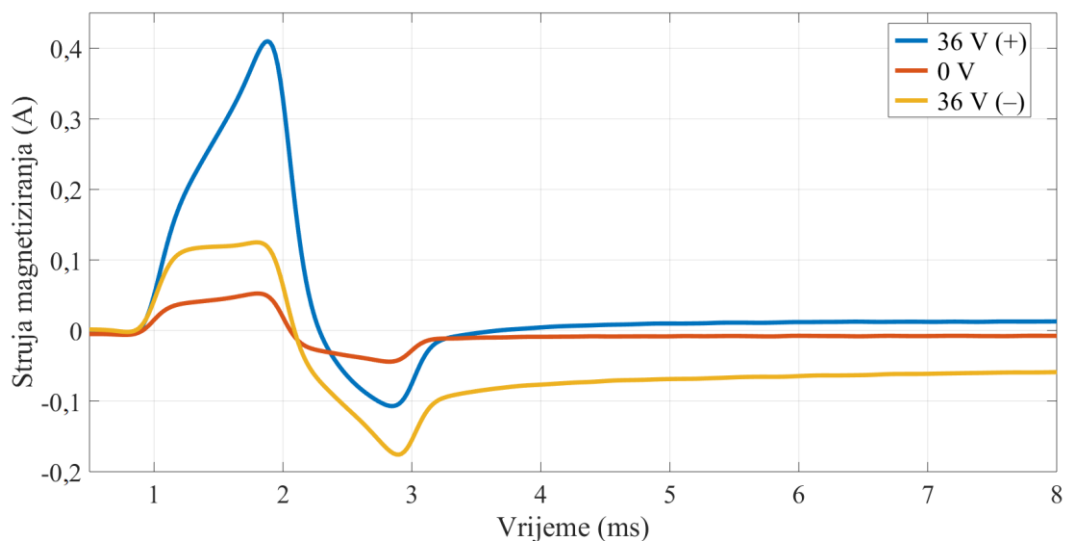


Slika 4.14. Vrijednosti električnog naboja (Q) za parametre $E = 4$ V, $T = 5$ ms i $t_1 = 2T$.



Slika 4.15. Vrijednosti električnog naboja (Q) za parametre $E = 10 \text{ V}$, $T = 2 \text{ ms}$ i $t_1 = 3T$.

Električni naboj (Q) mijenja se u ovisnosti o remanentnom toku u jezgri, kao što se može vidjeti na slikama 4.13, 4.14. i 4.15. Međutim, ono što je najvažnije, parametar naboja (Q) daje točnu informaciju o predznaku remanentnog toka u jezgri. Naime, struja magnetiziranja (i) nastavlja teći i nakon trenutka T u kojemu testni signal, odnosno napon primara poprimi nultu vrijednost. Sklopka S_3 preko koje je izvor u_3 (u modelu na slici 2.1.) spojen na primar transformatora ne isklopi u trenutku T u kojemu napon izvora poprimi nultu vrijednost, što znači da nakon trenutka T izvor u_3 predstavlja kratki spoj. Struje magnetiziranja za parametre $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$, te karakteristične vrijednosti parametra $U_2 = 36 \text{ V (+)}$, $U_2 = 0 \text{ V}$ i $U_2 = 36 \text{ V (-)}$, prikazane su na slici 4.16.



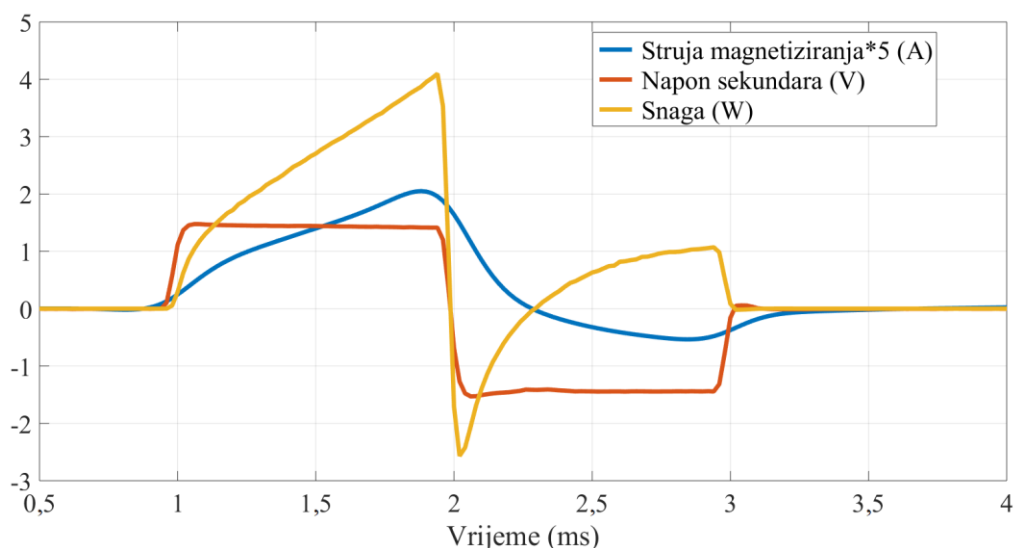
Slika 4.16. Struje magnetiziranja (i) za parametre $E = 10$ V i $T = 2$ ms, te karakteristične vrijednosti parametra $U_2 = 36$ V (+), $U_2 = 0$ V i $U_2 = 36$ V (-).

Struje magnetiziranja (i) prikazane na slici 4.16. ne padnu na nulu u trenutku u kojemu testni signal poprimi nultu vrijednost (na slici 4.16. to je trenutak $t = 3$ ms), nego nakon tog trenutka, a posebno je to izraženo za parametar $U_2 = 36$ V (-). Na razini modela, posljedica je to pohranjene energije u induktivitetu L prikazanom na slici 2.1. Općenito, induktivitet prima više energije za istu promjenu magnetskog toka kada je jezgra u području zasićenja zbog većeg iznosa struje magnetiziranja (i), u odnosu na slučaj kada jezgra nije u području zasićenja, prema izrazu:

$$\varepsilon = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} i(\varphi) d\varphi, \quad (4-7)$$

gdje je ε energija induktiviteta. Primjerice, kada remanentni tok ima pozitivnu vrijednost blisku maksimalnoj, jezgra ode u zasićenje u prvoj polovici periode testnog signala (narinut je pozitivan napon u prvoj poluperiodi) te induktivitetu bude predana veća količina energije (struja i napon induktiviteta istog su predznaka), u odnosu na slučaj u kojemu jezgra nije u području zasićenja. Predana energija dijelom se utroši na skladištenje, a dijelom na disipaciju u induktivitetu koji, kako je opisano u potpoglavlju 2.1. ovoga rada, ima i disipativni karakter, ali za to vrijeme postoji i disipacija energije na serijskim otporima R_T i R_R prikazanim na slici 2.1. Na početku druge poluperiode (narinut je negativan napon u drugoj poluperiodi), pohranjena energija u induktivitetu iz prve poluperiode vraća se u ostatak mreže (struja i napon induktiviteta suprotnog su predznaka). Nakon toga, induktivitetu opet bude predavana energija (struja i napon

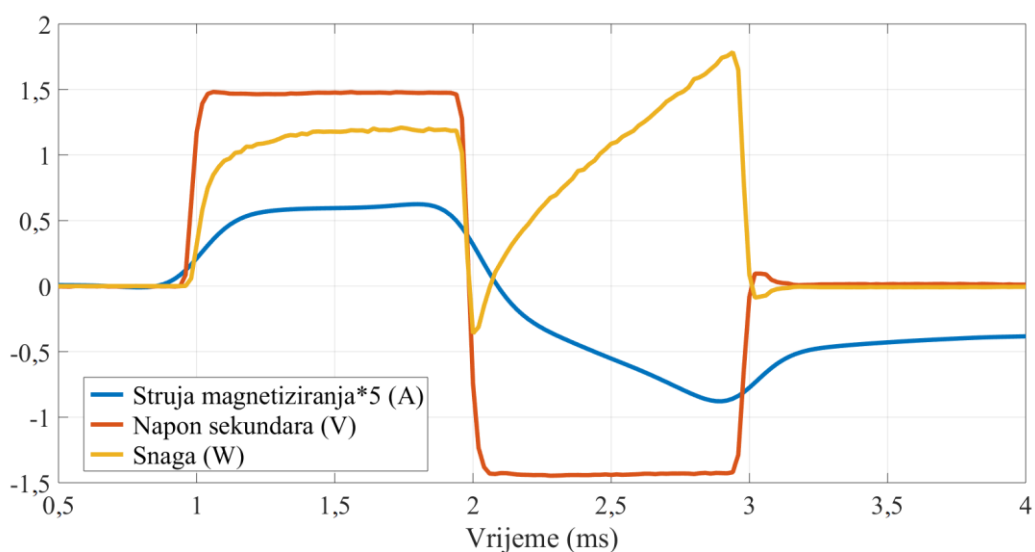
induktiviteta istog su predznaka, ali ovoga puta sa suprotnim predznacima u odnosu na prvu poluperiodu), naravno, ponovno uz istovremeno pohranjivanje i disipaciju energije na induktivitetu, te disipaciju energije izvora na serijskim otporima R_T i R_R . Tada radna točka u φ - i ravlini odlazi ulijevo, što znači da odlazi dalje od područja zasićenja, odnosno odlazi u područje u kojemu induktivitet prima manje energije za istu promjenu magnetskog toka, prema jednadžbi (4-7), u odnosu na područje zasićenja. Posljedica toga je relativno mali iznos pohranjene energije u induktivitetu u trenutku $t = 3$ ms u kojemu testni signal, odnosno napon primara poprimi nultu vrijednost, što znači da će se ta energija relativno brzo disipirati, tj. struja magnetiziranja će poprimiti nultu vrijednost vrlo brzo nakon trenutka $t = 3$ ms, kao što je prikazano na slici 4.17. za parametre $E = 10$ V, $T = 2$ ms i $U_2 = 36$ V (+).



Slika 4.17. Struja magnetiziranja (i) pomnožena s pet, napon sekundara (u_s) i trenutna snaga (p) za parametre $E = 10$ V, $T = 2$ ms i $U_2 = 36$ V (+).

Valni oblici struje magnetiziranja (pomnožene s pet radi preglednijeg prikaza), napona sekundara i trenutne snage (p) za parametre $E = 10$ V, $T = 2$ ms i $U_2 = 36$ V (+), prikazani na slici 4.17., pokazuju kako je značajno veća količina energije (površina ispod valnog oblika trenutne snage) primljena od strane induktiviteta u prvoj poluperiodi testnog signala u odnosu na drugu poluperiodu (otprilike nakon trenutka $t = 2,3$ ms pa do trenutka $t = 3$ ms na slici 4.17.). Struja magnetiziranja nakon trenutka $t = 3$ ms relativno brzo poprimi nultu vrijednost, te je u tom trenutku sva energija pohranjena u induktivitetu u cijelosti disipirana.

S druge strane, kada remanentni tok ima negativnu vrijednost blisku maksimalnoj, jezgra ne ode u zasićenje u prvoj polovici periode testnog signala (narinut je pozitivan napon u prvoj poluperiodi) te induktivitetu bude predana manja količina energije u odnosu na slučaj u kojemu je jezgra u području zasićenja. Ponovno, na početku druge poluperiode (narinut je negativan napon u drugoj poluperiodi), pohranjena energija iz prve poluperiode vraća se u ostatak mreže, te nakon toga induktivitetu opet bude predavana energija, ali ovoga puta sa suprotnim predznacima napona i struje u odnosu na prvu poluperiodu. Međutim, sada radna točka u φ - i ravlini odlazi prema području zasićenja (ulijevo) u kojemu pohranjuje više energije za istu promjenu magnetskog toka, prema jednadžbi (4-7), u odnosu na područje u kojemu jezgra nije u zasićenju. Posljedica toga je relativno velik iznos pohranjene energije u trenutku $t = 3$ ms u kojemu testni signal, odnosno napon primara poprimi nultu vrijednost, što znači da će se ta energija relativno sporo disipirati u odnosu na prethodno opisani slučaj koji je prikazan na slici 4.17., te struja magnetiziranja neće poprimiti nultu vrijednost do kraja snimanja mjerenih veličina, kao što je prikazano na slici 4.18. za parametre $E = 10$ V, $T = 2$ ms i $U_2 = 36$ V (–).



Slika 4.18. Struja magnetiziranja (i) pomnožena s pet, napon sekundara (u_s) i trenutna snaga (p) za parametre $E = 10$ V, $T = 2$ ms i $U_2 = 36$ V (–).

Valni oblici struje magnetiziranja (pomnožene s pet radi preglednijeg prikaza), napona sekundara i trenutne snage (p) za parametre $E = 10$ V, $T = 2$ ms i $U_2 = 36$ V (+), prikazani na slici 4.18., pokazuju kako je značajno veća količina energije (površina ispod valnog oblika trenutne snage) primljena od strane induktiviteta u drugoj poluperiodi u odnosu na slučaj prikazan na slici 4.17. Posljedica toga je relativno sporo približavanje nultoj vrijednosti struje

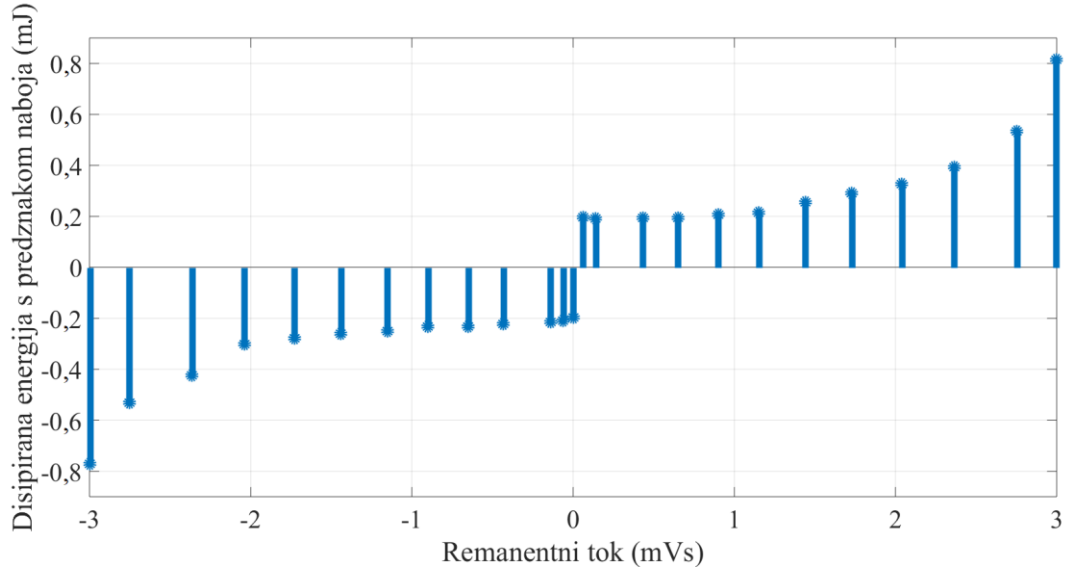
magnetiziranja nakon trenutka $t = 3$ ms. Također, energija pohranjena u induktivitetu tijekom prve poluperiode značajno je manja u odnosu na prethodni slučaj, što se vidi po iznosu energije koja je vraćena u ostatak mreže na početku druge poluperiode (površina koju zatvara s gornje strane horizontalna koordinatna os te krivulja trenutne snage dok ima negativnu vrijednost s donje strane). Za razliku od prethodnog slučaja u kojemu je to trajalo oko 0,3 ms, u ovom slučaju se pohranjena energija iz prve poluperiode vrati u ostatak mreže za svega 0,08 ms.

Sljedeći izazov je optimalan izbor trenutka t_1 za izračun naboja u jednadžbi (4-6). Prilikom uspostavljanja funkcije ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru izvedenom iz izmjerenih veličina, struju magnetiziranja i napon sekundara trebalo bi snimati sve dok struja ne poprimi nultu vrijednost, odnosno dok induktivitet ne disipira svu pohranjenu energiju. Nakon toga, u potencijalnoj primjeni metode kad je funkcija ovisnosti uspostavljena, struju magnetiziranja i napon sekundara može se snimati samo do izabranog trenutka t_1 jer dalje nije nužno. Osnovni uvjet izbora trenutka t_1 je da za postavljene negativne početne vrijednosti remanentnog toka, naboj (Q) ima negativnu vrijednost, a za postavljene pozitivne početne vrijednosti remanentnog toka pozitivnu. Uvjet za optimalan izbor trenutka t_1 je da funkcija ovisnosti naboja o remanentnom toku bude simetrična s obzirom na ishodište koordinatnog sustava. Primjerice, izbor trenutka $t_1 = 2T$ za funkciju ovisnosti naboja o remanentnom toku za parametre $E = 1$ V i $T = 20$ ms prikazanu na slici 4.13. ispunjava osnovni uvjet, ali nije optimalan. Naime, za neke negativne vrijednosti remanentnog toka, vrijednost naboja vrlo je bliska nuli. Ako snimanje prestane malo prije trenutka t_1 , moglo bi se dogoditi da za negativnu vrijednost remanentnog toka naboj bude pozitivan. S druge strane, izbor trenutka $t_1 = 2T$ za funkciju ovisnosti naboja o remanentnom toku za parametre $E = 4$ V i $T = 5$ ms, prikazanu na slici 4.14., također ispunjava osnovni uvjet, ali ponovno nije optimalan. U tom slučaju, za neke pozitivne vrijednosti remanentnog toka, vrijednost naboja vrlo je bliska nuli. Ako snimanje prestane malo poslije trenutka t_1 , moglo bi se dogoditi da za pozitivnu vrijednost remanentnog toka naboj bude negativan. U dva prethodno navedena slučaja, trenutak t_1 namjerno nije optimalno izabran kako bi se pokazalo koje su moguće posljedice. S druge strane, trenutak $t_1 = 3T$ za funkciju ovisnosti naboja o remanentnom toku za parametre $E = 10$ V i $T = 2$ ms prikazanu na slici 4.15., optimalno je izabran. Funkcija ovisnosti gotovo je simetrična s obzirom na ishodište koordinatnog sustava.

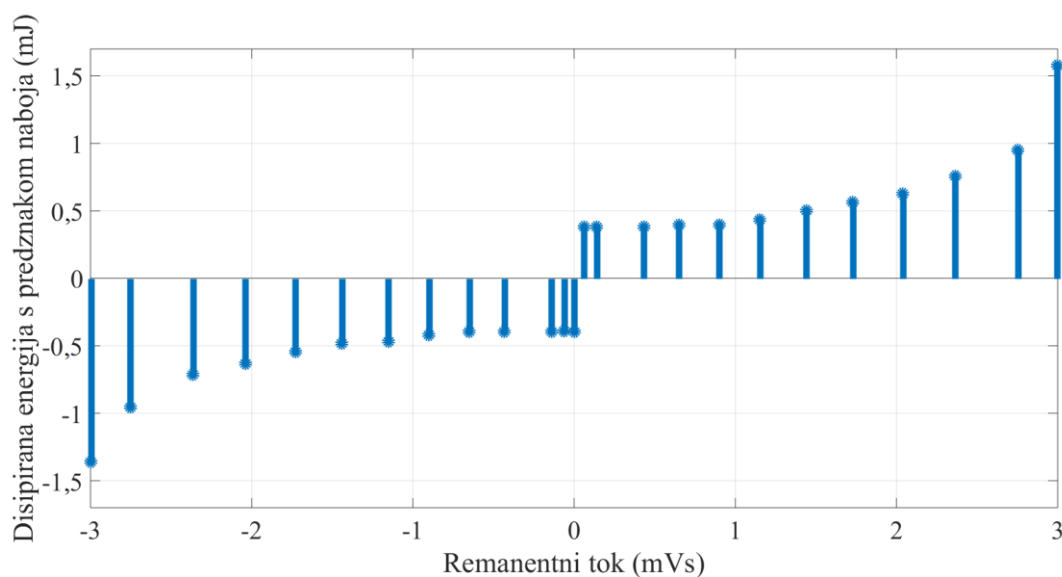
Konačno, parametar korišten za određivanje remanentnog toka (W_Q) kombinacija je dva prethodno navedena parametra – površina male petlje histereze pomnožena s brojem zavoja primarnog namota (W) s predznakom električnog naboja (Q):

$$W_Q = \frac{Q}{|Q|} \cdot W = \frac{\int_0^{t_1} i(t) dt}{\left| \int_0^{t_1} i(t) dt \right|} \cdot \int_0^T \frac{N_1}{N_2} u_s(t) i(t) dt = \frac{\int_0^{t_1} i(t) dt}{\left| \int_0^{t_1} i(t) dt \right|} \cdot N_1 \int_{\varphi(0)}^{\varphi(T)} i(\varphi) d\varphi. \quad (4-8)$$

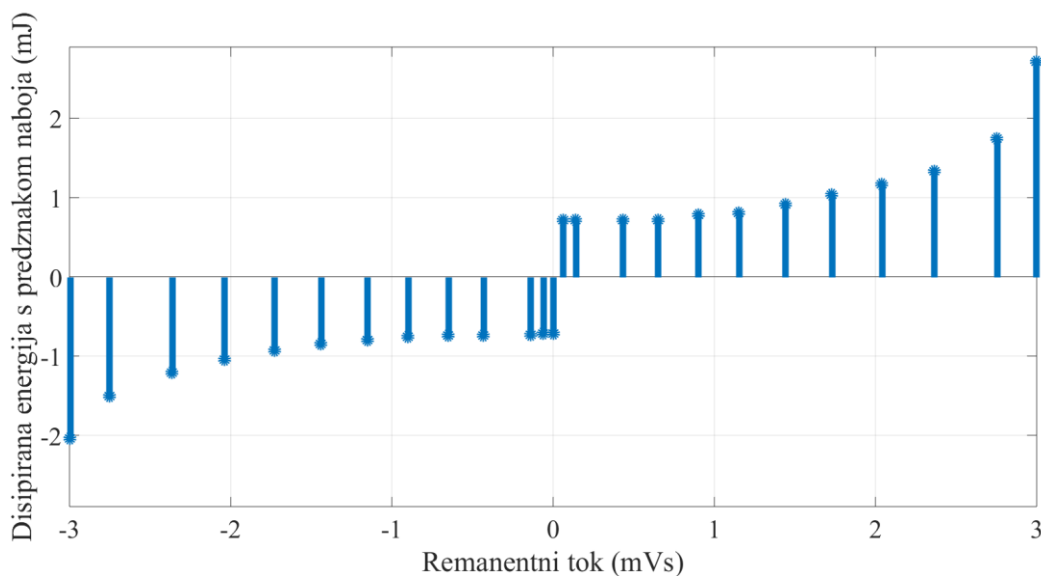
Vrijednost parametra W_Q za sve postavljene početne vrijednosti remanentnog toka i za sve parove parametara E i T prikazana je na slikama 4.19., 4.20. i 4.21.



Slika 4.19. Vrijednosti parametra W_Q za parametre $E = 1$ V, $T = 20$ ms i $t_1 = 2T$.



Slika 4.20. Vrijednosti parametra W_Q za parametre $E = 4 \text{ V}$, $T = 5 \text{ ms}$ i $t_1 = 2T$.



Slika 4.21. Vrijednosti parametra W_Q za parametre $E = 10 \text{ V}$, $T = 2 \text{ ms}$ i $t_1 = 3T$.

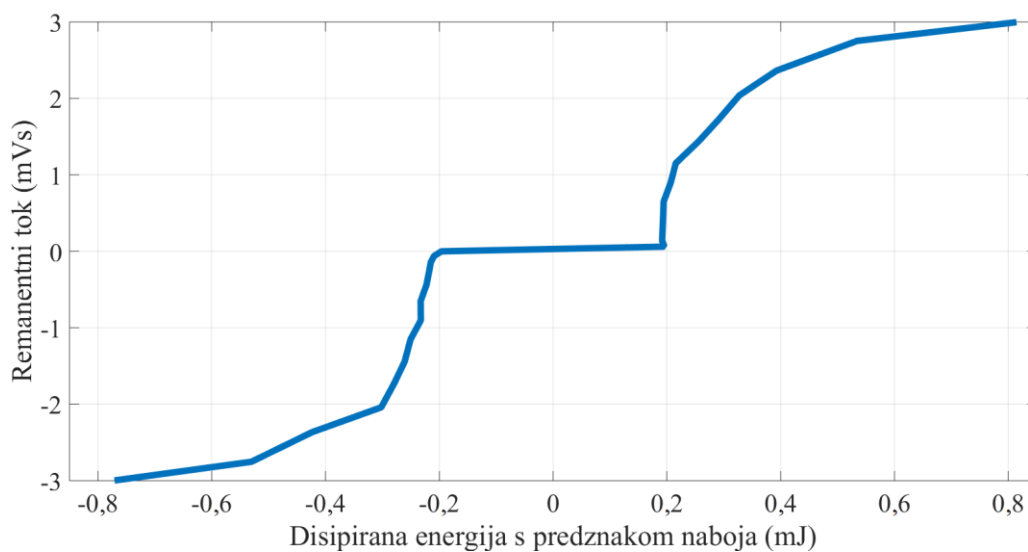
Dakle, parametar W_Q daje zadovoljavajuće rezultate, kao što se može vidjeti na slikama 4.19., 4.20. i 4.21., jer je na temelju njega moguće odrediti iznos i predznak remanentnog toka. Doduše, razlučivost je relativno niska pri nižim vrijednostima remanentnog toka, za vrijednosti remanentnog toka do otprilike jedne trećine vrijednosti toka zasićenja (u promatranom slučaju je to do 1 mVs), što je nedostatak ove metode. Međutim, razlučivost je značajno bolja pri višim vrijednostima remanentnog toka, a što je važno u potencijalnoj primjeni za smanjenje udarne struje magnetiziranja. Naime, u toj primjeni, često je dovoljno znati samo interval vrijednosti u kojemu se nalazi remanentni tok kako bi smanjenje udarne struje bilo učinkovito.

Izračunate vrijednosti parametra W_Q prikazane su za sve parove parametara E i T i u tablici 4.1.

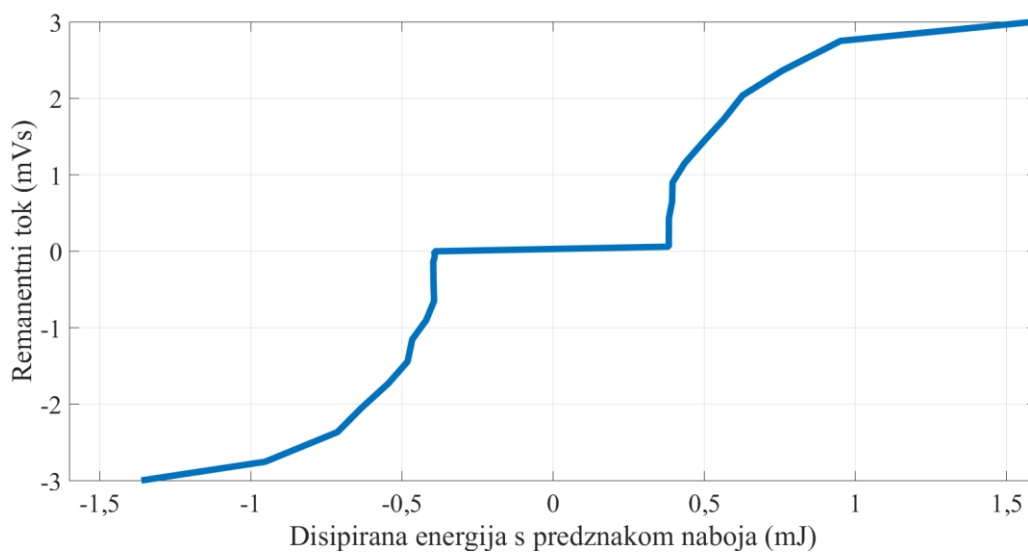
Tablica 4.1. Izračunate vrijednosti parametra W_Q za sve parove parametara E i T .

U_2 (V)	Parametar W_Q (μ J) za $E = 1$ V, $T = 20$ ms	Parametar W_Q (μ J) za $E = 4$ V, $T = 5$ ms	Parametar W_Q (μ J) za $E = 10$ V, $T = 2$ ms
36 (+)	814,5	1577,4	2718,1
33 (+)	534,3	951,3	1743,6
30 (+)	393,0	758,7	1329,5
27 (+)	327,5	627,2	1165,5
24 (+)	291,5	564,8	1033,9
21 (+)	256,2	499,1	913,2
18 (+)	215,7	435,1	806,4
15 (+)	206,9	395,3	778,4
12 (+)	194,2	393,7	712,0
9 (+)	193,2	383,2	719,1
6 (+)	191,6	382,8	712,9
3 (+)	195,6	383,2	716,5
0	-196,2	-393,2	-712,3
3 (-)	-209,2	-391,4	-718,6
6 (-)	-214,8	-396,5	-730,1
9 (-)	-222,4	-395,5	-742,6
12 (-)	-232,7	-393,7	-739,4
15 (-)	-232,5	-420,0	-759,9
18 (-)	-250,6	-466,1	-794,8
21 (-)	-260,9	-481,4	-850,3
24 (-)	-279,4	-545,2	-928,3
27 (-)	-302,1	-631,9	-1047,8
30 (-)	-423,3	-713,6	-1209,6
33 (-)	-530,2	-952,9	-1501,7
36 (-)	-770,9	-1362,3	-2038,1

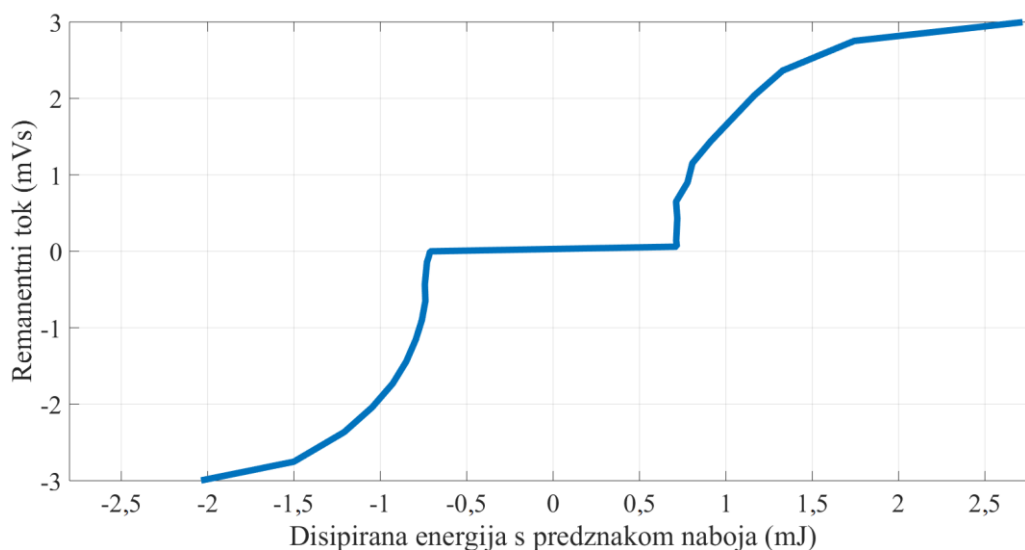
Na kraju, funkcija ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q prikazana je na slikama 4.22., 4.23. i 4.24. na način da je na vertikalnoj koordinatnoj osi remanentni tok, a na horizontalnoj parametar W_Q .



Slika 4.22. Funkcija ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q za parametre $E = 1$ V, $T = 20$ ms i $t_1 = 2T$.



Slika 4.23. Funkcija ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q za parametre $E = 4$ V, $T = 5$ ms i $t_1 = 2T$.



Slika 4.24. Funkcija ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q za parametre $E = 10$ V, $T = 2$ ms i $t_1 = 3T$.

Funkcije ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q , prikazane na slikama 4.22., 4.23. i 4.24., dobivene su interpolacijom između izmjerenih vrijednosti jer je cilj dobiti kontinuirane funkcije koje za bilo koju izmjerenu vrijednost parametra W_Q mogu jednoznačno odrediti remanentni tok u jezgri. U ovom radu je za sve parove parametara E i T izmjereno 25 vrijednosti parametra W_Q , što odgovara postavljenih 25 početnih vrijednosti remanentnog toka (opisano u drugom poglavlju). Naravno, prilikom uspostavljanja funkcije ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q prije potencijalne primjene ove metode, čim više izmjerenih vrijednosti parametra W_Q , tim bolje jer će funkcija biti točnija.

U potencijalnoj primjeni ove metode, nakon što se jednom uspostavi funkcija ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q za pojedini transformator ili pojedini tip transformatora, za određivanje remanentnog toka potrebno je na primar neopterećenog transformatora narinuti testni signal i snimiti valne oblike struje primara i napona sekundara, te iz tih valnih oblika izračunati parametar W_Q . Nakon toga, potrebno je samo iz uspostavljene funkcije ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q odrediti remanentni tok.

U ovom radu uspostavljene su tri funkcije, po jedna za svaki par parametara E i T , kako bi bila dokazana valjanost metode neovisno o izboru parametara E i T dok god njihova kombinacija uzrokuje relativno malu promjenu magnetskog toka u jezgri. Međutim, u potencijalnoj primjeni ove metode, dovoljno je uspostaviti samo jednu funkciju za jedan par parametara E i T . Sve tri

uspostavljene funkcije u ovom radu jednako su učinkovite u određivanju remanentnog toka te se mogu upotrijebiti na isti način. Jedina razlika je povećanje iznosa parametra W_Q , odnosno električne energije pretvorene u toplinsku pri povećanju parametra E i smanjenju parametra T . Međutim, ta razlika ne utječe ni na koji način na određivanje remanentnog toka. Doduše, iz praktičnih razloga smanjenja utjecaja parazitnih elemenata, prvenstveno otpora, te smanjenja šuma u snimljenim signalima, preporuka je koristiti kombinaciju parametara 10 V i 2 ms.

U budućim istraživanjima, ova metoda bit će implementirana uz različite valne oblike testnog signala (sinusni, trokutasti, pilasti) te različite kombinacije parametara E i T za pravokutni signal, kao i različite iznose promjene magnetskog toka u jezgri tijekom mjernog postupka. Nadalje, ova metoda primijenit će se na energetske transformatorima veće snage od transformatora korištenog u ovom istraživanju. Također, metoda će biti prilagođena trofaznim transformatorima, što će uvelike proširiti područje primjene.

5. PROCJENA PROPAGACIJE MJERNE NESIGURNOSTI MJERENIH VELIČINA ZA METODE ODREĐIVANJA REMANENTNOG TOKA PRIMJENOM ADAPTIVNE MONTE CARLO METODE

Monte Carlo metoda matematički je algoritam koji provodi slučajno uzorkovanje iz funkcije gustoće vjerojatnosti ulazne varijable te korištenjem modela promatranog sustava određuje razdiobu vjerojatnosti izlazne varijable, odnosno rezultata. Način primjene ove metode u mjerenju detaljno je opisan u dokumentu „Procjena mjernih podataka – Prvi dodatak Vodiču za izražavanje nesigurnosti mjerenja – Propagacija razdioba primjenom Monte Carlo metode“ (engl. *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*) [70]. Ovaj dodatak „Vodiču za izražavanje nesigurnosti mjerenja“ (engl. *Guide to the expression of uncertainty in measurement – GUM*) [71] obrađuje propagaciju razdiobe vjerojatnosti kroz matematički model mjerenja primjenom Monte Carlo metode kao osnovu za procjenu mjerne nesigurnosti. Dakle, Monte Carlo metoda zapravo je alternativa uobičajenoj procjeni mjerne nesigurnosti temeljenoj na GUM-u [72 – 74]. Značajnu prednost ima u slučaju kada linearizacija modela ne daje zadovoljavajuće rezultate, odnosno kada linearizirani model ne predstavlja original na zadovoljavajući način, te kada funkcija razdiobe vjerojatnosti izlazne veličine značajno odstupa od normalne razdiobe ili skalirane i pomaknute t-razdiobe. Također, može se koristiti i kada je teško primijeniti uobičajenu procjenu zbog složenosti modela [70]. Glavna razlika između Monte Carlo metode i uobičajene procjene temeljene na GUM-u je u tome što je potonja deterministička metoda temeljena na matematičkom izračunu distribucije vjerojatnosti, dok je Monte Carlo metoda koja se temelji na određivanju distribucije vjerojatnosti numeričkom simulacijom i generiranju slučajnih brojeva [75].

Osnovne faze procjene nesigurnosti primjenom Monte Carlo metode su [70]:

a) Formulacija:

1. definiranje izlazne veličine Y ;
2. određivanje ulaznih varijabli $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ o kojima Y ovisi;
3. razvijanje modela, odnosno određivanje funkcijske ovisnosti Y o X ;
4. dodjeljivanje razdiobe vjerojatnosti (normalna, pravokutna, itd.) ulaznim varijablama X_i na temelju dostupnih informacija;

- b) Propagacija razdiobe vjerojatnosti ulaznih varijabli X_i kroz model kako bi se odredila razdioba vjerojatnosti izlazne veličine Y ;
- c) Finalizacija:
 1. određivanje procjene y korištenjem razdiobe vjerojatnosti od Y ;
 2. određivanje standardne devijacije od Y kao standardne nesigurnosti $u(y)$ korištenjem razdiobe vjerojatnosti od Y ;
 3. određivanje intervala pouzdanosti uz naznačenu vjerojatnost.

Osnovni parametar Monte Carlo metode je broj iteracija M . Ako je parametar M izabran unaprijed, neće biti moguće kontrolirati konvergenciju rezultata, što znači da metoda neće biti adaptivna. Drugim riječima, adaptivna Monte Carlo metoda je algoritam koji izvodi osnovnu Monte Carlo metodu povećavajući broj iteracija sve dok se rezultati ne stabiliziraju u statističkom smislu. Stabilizacijski kriterij određen je numeričkom tolerancijom δ koja je definirana kao polovica zadnje značajne znamenke mjerne nesigurnosti [75]. Prema [70], rezultat je numerički stabiliziran kada je pripadajuća dvostruka standardna devijacija manja od tolerancije δ . Cilj adaptivne Monte Carlo metode je izračunati:

- a) procjenu y od Y ,
 - b) pripadajuću standardnu nesigurnost $u(y)$ te
 - c) granične vrijednosti y_{low} i y_{high} intervala pouzdanosti od Y za pripadajuću vjerojatnost,
- na način da dvostruke standardne devijacije svih prethodno navedenih vrijednosti budu unutar zadane numeričke tolerancije. Pri tome, najbolja procjena y i standardna nesigurnost $u(y)$ će značajno brže konvergirati od graničnih vrijednosti y_{low} i y_{high} s povećanjem broja Monte Carlo iteracija (M). Također, što je veća vjerojatnost intervala pouzdanosti, bit će potreban veći broj iteracija za određivanje y_{low} i y_{high} za zadanu toleranciju.

Algoritam adaptivne Monte Carlo metode korišten u ovom radu implementiran je u programskom paketu MATLAB prema [75]:

- a) izabrana je vjerojatnost $p = 0,95$ koja određuje interval pouzdanosti;
- b) izabran je broj značajnih znamenki mjerne nesigurnosti $n_{dig} = 2$;
- c) izabran je broj iteracija $M = 10000$ u svakom slijedu;
- d) postavljena je varijabla $h = 1$ koja broji sljedove Monte Carlo simulacije (nakon svakog slijeda povećava se za jedan);
- e) za svaki slijed h , M iteracija je provedeno što rezultira vrijednostima $y_{(h)r}$ ($r = 1, 2, \dots, M$) te procijenjenim parametrima:

- srednje vrijednosti:

$$y_{(h)} = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M y_{(h)r}, \quad (5-1)$$

- standardne devijacije kao standardne nesigurnosti:

$$u(y_{(h)}) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_{(h)r} - y_{(h)})^2}, \quad (5-2)$$

- graničnih vrijednosti $y_{(h)low}$ i $y_{(h)high}$ najkraćeg intervala za zadanu pouzdanost nakon sortiranja vrijednosti $y_{(h)r}$ u rastućem nizu;
- f) kako bi se analizirala varijabilnost parametara, više sljedova treba biti provedeno; stoga, ako je $h = 1$, treba ga povećati za jedan i postupak vratiti na korak e);
- g) nakon svakog slijeda (pri čemu je H broj aktualnog slijeda, odnosno $H = h$ u tom trenutku), potrebno je izračunati parametre:

- srednje vrijednosti procjene rezultata:

$$y_{(H)} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H y_{(h)}, \quad (5-3)$$

- standardne devijacije procjene rezultata:

$$\sigma_{y_{(H)}} = \sqrt{\frac{1}{H(H-1)} \sum_{h=1}^H (y_{(h)} - y_{(H)})^2}, \quad (5-4)$$

- srednje vrijednosti standardne nesigurnosti:

$$u(y_{(H)}) = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H u(y_{(h)}), \quad (5-5)$$

- standardne devijacije standardne nesigurnosti:

$$\sigma_{u(y_{(H)})} = \sqrt{\frac{1}{H(H-1)} \sum_{h=1}^H \left(u(y_{(h)}) - u(y_{(H)}) \right)^2}, \quad (5-6)$$

- srednje vrijednosti niže granične vrijednosti najkraćeg intervala:

$$y_{(H)low} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H y_{(h)low}, \quad (5-7)$$

- standardne devijacije niže granične vrijednosti najkraćeg intervala:

$$\sigma_{y_{(H)low}} = \sqrt{\frac{1}{H(H-1)} \sum_{h=1}^H \left(y_{(h)low} - y_{(H)low} \right)^2}, \quad (5-8)$$

- srednje vrijednosti više granične vrijednosti najkraćeg intervala:

$$y_{(H)high} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H y_{(h)high}, \quad (5-9)$$

- standardne devijacije više granične vrijednosti najkraćeg intervala:

$$\sigma_{y_{(H)high}} = \sqrt{\frac{1}{H(H-1)} \sum_{h=1}^H \left(y_{(h)high} - y_{(H)high} \right)^2}; \quad (5-10)$$

h) kako bi se utvrdilo zadovoljavaju li rezultati stabilizacijski kriterij, potrebno je izračunati numeričku toleranciju δ povezanu sa standardnom nesigurnošću koja se računa kao u koraku e), ali uzimajući u obzir sve vrijednosti modela (umnožak h i M). Tolerancija δ polovica je zadnje značajne znamenke mjerne nesigurnosti. Prilikom izračuna, nesigurnost mora biti izražena u obliku $u(y) = c \cdot 10^d$, gdje je c broj s n_{dig} znamenki ispred decimalnog zareza, a d je cijeli broj. Prema tome, pripadajuća numerička tolerancija δ iznosi:

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot 10^d; \quad (5-11)$$

- i) stabilizacijski kriterij zadovoljen je kada su vrijednosti $2\sigma_{y(H)}$, $2\sigma_{u(y(H))}$, $2\sigma_{y(H)low}$ i $2\sigma_{y(H)high}$, manje od tolerancije δ ; ako pak nije tako, h treba povećati za jedan i postupak vratiti na korak e);
- j) nakon što je stabilizacijski kriterij zadovoljen, treba izračunati sve parametre modela kao u koraku e), ali uzimajući u obzir sve vrijednosti modela (umnožak h i M).

Prethodno navedeni algoritam adaptivne Monte Carlo metode implementiran u programskom paketu MATLAB korišten je za izračun parametara za sve četiri razvijene metode u ovom radu, pri čemu je u prve tri metode (opisane u trećem poglavlju ovoga rada) parametar y zapravo remanentni tok Φ_R , a u četvrtoj metodi (opisanoj u četvrtom poglavlju ovoga rada) parametar W_Q .

Ulaznim varijablama dodijeljena je normalna (Gaussova) razdioba vjerojatnosti:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (5-12)$$

gdje je μ aritmetička sredina, a σ standardna devijacija. Pri tome, implementacijom u programskom paketu MATLAB, koristeću funkciju „randn“, ulaznim varijablama dodijeljena je standardizirana (jedinčna) normalna razdioba u kojoj je aritmetička sredina (μ) jednaka nuli, a standardna devijacija (σ) jedinici:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}. \quad (5-13)$$

Za sve četiri metode, ulazne veličine definirane su kao:

$$x_i = x_{IZMi} + \frac{u_{\%}(X)}{100 \%} \cdot \max(X) \cdot n_{RND}, \quad (5-14)$$

gdje je $X = [x_{IZM1}, x_{IZM2}, \dots]$ vektor izmjerenih ulaznih veličina x_{IZMi} , $u_{\%}(X)$ je relativna mjerna nesigurnost ulaznih veličina izražena u postotcima, a n_{RND} je slučajni broj generiran na temelju standardizirane (jedinčne) normalne razdiobe prema jednadžbi (5-13). Kako bi bio određen

trend propagacije mjerne nesigurnosti u ovisnosti o relativnoj mjernoj nesigurnosti ulaznih veličina $u_{\%}(X)$, u ovom radu bit će korištene tri vrijednosti:

- $u_{1\%}(X) = 1 \%$,
- $u_{2\%}(X) = 2 \%$,
- $u_{3\%}(X) = 3 \%$.

Naime, ukupna relativna mjerna nesigurnost instrumenata korištenih za mjerenje ulaznih veličina je 2 %. Pri tome, relativna mjerna nesigurnost aktivne diferencijalne sonde GW Instek GDP-025 iznosi 2 %, a mjerna nesigurnost multifunkcijske akvizicijske (DAQ) kartice National Instruments NI-USB 6212 je 90 μV na mjernom dometu od 10 V, što je 0,0009 %, odnosno u ovom slučaju zanemarivo. U prve tri metode, jedna je mjerena ulazna veličina, i to napon sekundara, dok su u četvrtoj metodi ulazne veličine napon sekundara i struja primara transformatora. Doduše, za najbolju procjenu mjerne nesigurnosti izlazne veličine, odnosno remanentnog toka u prve tri metode i parametra W_Q u četvrtoj metodi, trebalo bi uz prethodno spomenute mjerne nesigurnosti napona i struje, uzeti u obzir i mjerne nesigurnosti izabranih vrijednosti struje zasićenja (I_Z) i pripadajućeg toka zasićenja (Φ_Z) u drugoj i trećoj metodi, te iznosa otpora dodatnog otpornika (R_R) na kojemu je mjeren napon za potrebe izračuna struje primara u četvrtoj metodi. Prilikom primjene Monte Carlo metode, trebalo bi prethodno spomenutim veličinama dodijeliti razdiobu nesigurnosti, što je ekvivalentno koeficijentima osjetljivosti i utjecaju pojedinih ulaznih veličina (engl. *uncertainty budget*) kod standardne GUM metode [70]. Međutim, u ovom radu cilj nije procijeniti mjernu nesigurnost konkretnih mjerenja budući da mjerni postavi i pripadajući parametri nisu jednaki za sve promatrane metode, već je cilj procijeniti propagaciju mjerne nesigurnosti samo s obzirom na mjerene ulazne veličine. Dakle, cilj je usporediti metode na temelju propagacije mjerne nesigurnosti ulazne veličine jer bi to mogao biti jedan od kriterija prilikom izbora metode u određenoj primjeni. Stoga, za prve tri metode bit će procijenjena mjerna nesigurnost remanentnog toka za tri različite vrijednosti mjerne nesigurnosti napona sekundara. Nadalje, u četvrtoj metodi bit će procijenjena mjerna nesigurnost parametra W_Q za tri para istih mjernih nesigurnosti napona sekundara i struje primara (1 %, 2 % i 3 %).

5.1. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon

Prilikom testiranja metode određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon opisane u potpoglavlju 3.1. ovoga rada, provedeno je ukupno 175 mjerenja. Za potrebe procjene mjerne nesigurnosti, bit će korištene izmjerene ulazne veličine, odnosno napon sekundara u ovom slučaju, za svih 175 mjerenja. Za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, bit će korištene vrijednosti relativne nesigurnosti napona sekundara od 1 %, 2 % i 3 %, što će rezultirati s ukupno 525 provedenih Monte Carlo simulacija. Programski kod u programskom paketu MATLAB te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada.

Srednje vrijednosti remanentnog toka dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Srednje vrijednosti remanentnog toka u mVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,083	3,085	3,080	3,078	3,078	3,077
33 (+)	2,752	2,788	2,757	2,747	2,748	2,751	2,766
30 (+)	2,123	2,179	2,164	2,369	2,330	2,178	2,337
27 (+)	1,805	1,882	2,104	2,078	1,872	1,864	2,055
24 (+)	1,605	1,721	1,557	1,705	1,664	1,750	1,609
21 (+)	1,324	1,455	1,378	1,344	1,536	1,309	1,242
18 (+)	1,160	1,326	1,041	1,018	1,253	1,189	1,280
15 (+)	1,004	1,072	0,868	1,026	0,913	0,864	0,892
12 (+)	0,584	0,508	0,606	0,687	0,544	0,645	0,650
9 (+)	0,377	0,378	0,445	0,370	0,454	0,353	0,429
6 (+)	0,273	0,331	0,339	0,310	0,340	0,312	0,267
3 (+)	0,167	0,163	0,186	0,151	0,181	0,143	0,148
0	-0,049	0,003	0,002	0,013	0,052	-0,037	-0,023
3 (-)	-0,155	-0,129	-0,130	-0,139	-0,140	-0,156	-0,151
6 (-)	-0,308	-0,263	-0,278	-0,270	-0,307	-0,342	-0,335
9 (-)	-0,443	-0,386	-0,339	-0,457	-0,381	-0,438	-0,429
12 (-)	-0,714	-0,738	-0,713	-0,692	-0,644	-0,801	-0,614
15 (-)	-0,992	-0,756	-0,802	-0,974	-0,879	-0,887	-0,988
18 (-)	-1,065	-1,127	-1,087	-0,917	-1,006	-1,099	-1,239
21 (-)	-1,458	-1,261	-1,195	-1,447	-1,361	-1,360	-1,208
24 (-)	-1,543	-1,660	-1,771	-1,731	-1,502	-1,591	-1,847
27 (-)	-1,848	-1,825	-1,837	-2,067	-1,850	-2,054	-1,916
30 (-)	-2,159	-2,243	-2,294	-2,180	-2,238	-2,115	-2,291
33 (-)	-2,725	-2,736	-2,727	-2,702	-2,690	-2,749	-2,731
36 (-)	-3,051	-3,049	-3,028	-3,043	-3,048	-3,055	-3,057

Mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazane su u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Mjerne nesigurnosti u μVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	29,827	29,736	29,893	29,937	29,899	30,089	29,835
33 (+)	29,886	29,967	29,635	29,682	29,833	29,734	29,831
30 (+)	29,512	29,777	29,624	29,840	29,755	29,846	29,310
27 (+)	29,336	29,692	29,847	29,656	29,716	29,662	29,247
24 (+)	29,760	29,966	29,880	29,910	29,626	29,385	29,928
21 (+)	29,572	29,877	29,610	29,804	29,942	29,798	29,039
18 (+)	29,774	29,933	30,060	29,983	29,308	29,700	29,815
15 (+)	29,650	29,960	30,024	30,259	30,076	30,075	29,900
12 (+)	30,318	30,150	29,958	30,040	30,181	29,376	29,439
9 (+)	29,084	29,515	30,051	28,944	30,129	30,136	29,647
6 (+)	29,695	29,785	29,830	29,658	29,013	29,412	29,466
3 (+)	30,202	30,143	30,231	30,373	30,146	29,358	29,628
0	30,031	29,148	28,979	29,568	29,071	29,484	29,400
3 (–)	30,329	29,553	29,621	29,665	30,324	29,313	29,119
6 (–)	29,663	29,657	29,527	29,339	30,208	29,317	29,694
9 (–)	29,516	29,462	29,375	29,651	29,053	29,708	29,141
12 (–)	29,772	29,940	30,207	29,989	29,335	29,924	29,552
15 (–)	29,589	30,378	29,236	30,185	29,634	29,924	30,104
18 (–)	29,914	29,972	29,899	29,489	29,812	29,866	29,826
21 (–)	29,865	29,267	29,960	30,026	29,698	29,626	29,792
24 (–)	29,775	29,838	29,885	30,078	29,267	29,838	30,035
27 (–)	29,809	29,945	30,022	30,108	29,943	30,142	30,027
30 (–)	30,028	29,961	29,905	29,957	29,819	29,383	29,883
33 (–)	29,744	29,989	29,574	29,626	29,752	29,703	29,735
36 (–)	29,918	29,776	29,267	29,332	29,564	29,632	29,597

Relativne mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazane su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Relativne mjerne nesigurnosti za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	0,968 %	0,965 %	0,969 %	0,972 %	0,971 %	0,977 %	0,970 %
33 (+)	1,086 %	1,075 %	1,075 %	1,081 %	1,086 %	1,081 %	1,078 %
30 (+)	1,390 %	1,367 %	1,369 %	1,260 %	1,277 %	1,370 %	1,254 %
27 (+)	1,625 %	1,578 %	1,419 %	1,427 %	1,587 %	1,592 %	1,423 %
24 (+)	1,854 %	1,741 %	1,919 %	1,754 %	1,780 %	1,679 %	1,859 %
21 (+)	2,234 %	2,054 %	2,149 %	2,218 %	1,949 %	2,277 %	2,337 %
18 (+)	2,567 %	2,258 %	2,886 %	2,946 %	2,340 %	2,498 %	2,329 %
15 (+)	2,953 %	2,794 %	3,458 %	2,949 %	3,295 %	3,481 %	3,351 %
12 (+)	5,188 %	5,936 %	4,942 %	4,373 %	5,551 %	4,555 %	4,531 %
9 (+)	7,724 %	7,806 %	6,758 %	7,828 %	6,641 %	8,532 %	6,918 %
6 (+)	10,89 %	8,995 %	8,807 %	9,556 %	8,522 %	9,435 %	11,04 %
3 (+)	18,11 %	18,54 %	16,24 %	20,14 %	16,68 %	20,53 %	20,06 %
0	61,81 %	1163 %	1559 %	230,8 %	56,36 %	79,02 %	125,7 %
3 (-)	19,63 %	22,99 %	22,85 %	21,35 %	21,74 %	18,76 %	19,33 %
6 (-)	9,627 %	11,30 %	10,60 %	10,88 %	9,839 %	8,579 %	8,864 %
9 (-)	6,668 %	7,638 %	8,662 %	6,493 %	7,624 %	6,786 %	6,785 %
12 (-)	4,170 %	4,059 %	4,236 %	4,335 %	4,556 %	3,737 %	4,810 %
15 (-)	2,982 %	4,021 %	3,645 %	3,098 %	3,373 %	3,375 %	3,045 %
18 (-)	2,808 %	2,661 %	2,751 %	3,215 %	2,963 %	2,719 %	2,408 %
21 (-)	2,049 %	2,320 %	2,508 %	2,076 %	2,183 %	2,178 %	2,465 %
24 (-)	1,930 %	1,797 %	1,687 %	1,737 %	1,949 %	1,875 %	1,626 %
27 (-)	1,613 %	1,641 %	1,634 %	1,456 %	1,619 %	1,467 %	1,568 %
30 (-)	1,391 %	1,336 %	1,303 %	1,374 %	1,332 %	1,389 %	1,304 %
33 (-)	1,092 %	1,096 %	1,084 %	1,097 %	1,106 %	1,080 %	1,089 %
36 (-)	0,981 %	0,977 %	0,967 %	0,964 %	0,970 %	0,970 %	0,968 %

Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazan je u tablici 5.4.

Tablica 5.4. Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	47	38	38	38	37	2	41
33 (+)	51	50	34	31	42	49	39
30 (+)	28	45	2	45	48	37	34
27 (+)	44	2	36	42	42	51	39
24 (+)	49	36	30	49	59	43	25
21 (+)	2	48	56	47	27	40	55
18 (+)	36	2	53	58	39	46	53
15 (+)	48	45	49	43	17	45	49
12 (+)	45	53	50	54	31	50	2
9 (+)	26	44	48	4	48	51	44
6 (+)	51	49	49	32	44	48	50
3 (+)	50	49	40	2	49	41	35
0	53	43	34	54	2	45	49
3 (–)	46	44	46	46	57	48	32
6 (–)	53	48	42	35	54	46	43
9 (–)	44	52	40	39	48	58	34
12 (–)	47	47	49	52	43	46	28
15 (–)	50	53	3	30	34	47	4
18 (–)	39	38	35	36	38	52	43
21 (–)	44	42	42	38	45	37	43
24 (–)	39	39	33	29	3	44	37
27 (–)	50	50	38	3	38	40	43
30 (–)	53	53	31	42	42	44	36
33 (–)	57	2	44	52	53	47	53
36 (–)	48	57	41	42	45	59	40

Mjerna nesigurnost u tablici 5.2. približno je jednaka za sve parametre U_2 i α . Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.3. poprima značajno veće iznose za parametar $U_2 = 0$ V jer je apsolutna vrijednost srednje vrijednosti remanentnog toka, koja je u nazivniku pri računanju relativne mjerne nesigurnosti, vrlo bliska nuli. Također, relativna mjerna nesigurnost smanjuje se povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka, što je očekivano. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega dva do 59.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}):

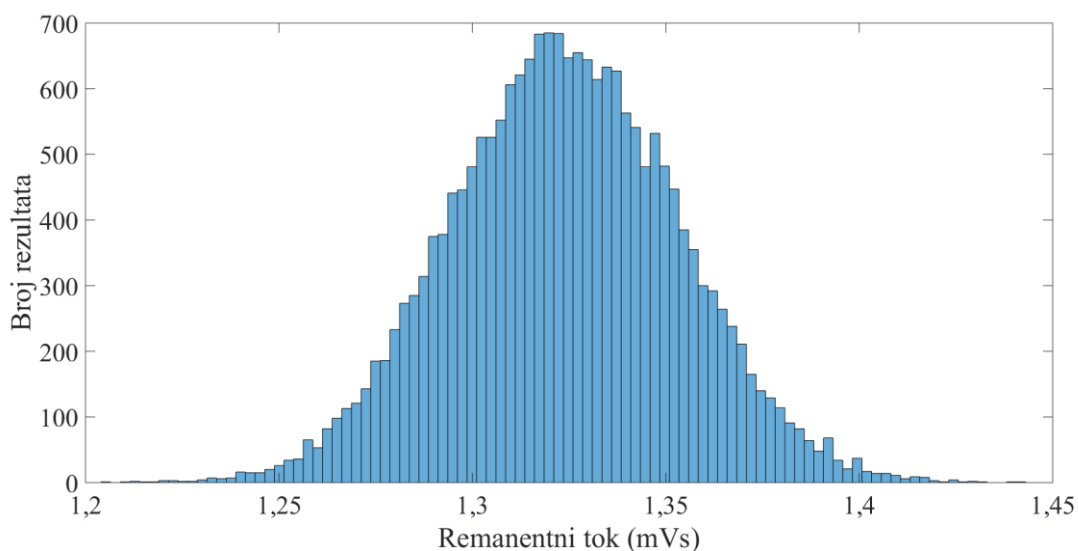
$$u_{SR} = \frac{1}{175} \sum_{i=1}^{175} u_{\Phi Ri} , \quad (5-15)$$

te ista iznosi 29,747 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%s}$):

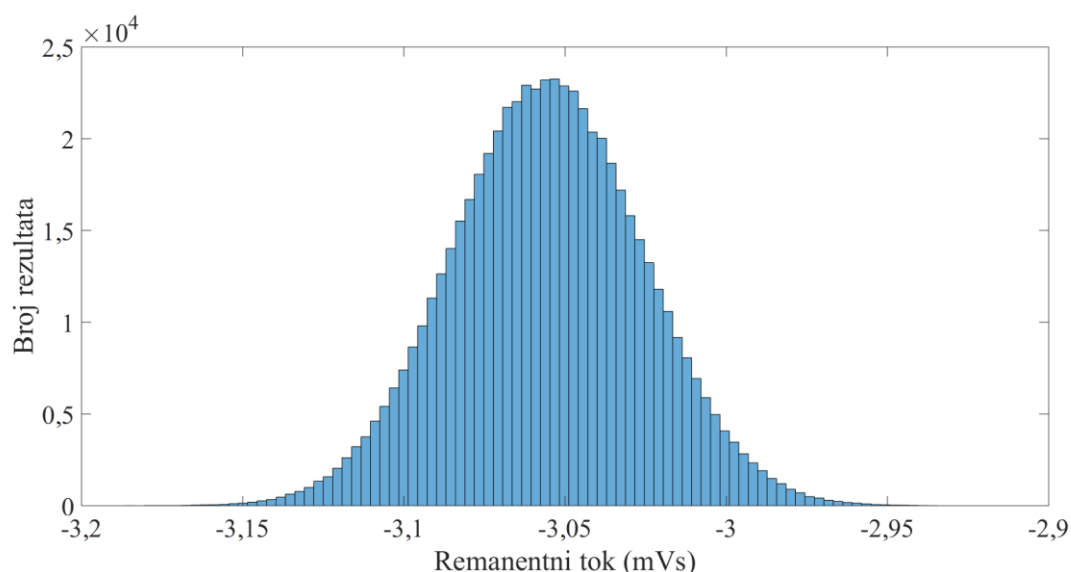
$$u_{\%SR} = \frac{1}{168} \sum_{i=1}^{168} u_{\%i} , \quad (5-16)$$

te ista iznosi 4,704 %. Pri tome nisu uzete u obzir relativne mjerne nesigurnosti za parametar $U_2 = 0$ V, s obzirom da je nazivnik u tom slučaju vrlo blizak nuli pa ta vrijednost može značajno utjecati na srednju vrijednost, ali ne zbog iznosa mjerne nesigurnosti, već zbog srednje vrijednosti remanentnog toka koja je vrlo bliska nuli. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 7.087, što znači da je provedeno ukupno 70.870.000 iteracija, odnosno prosječno 40,50 sljedova za jedno mjerenje.

Naponu sekundara kao ulaznoj veličini dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a karakteristične razdiobe remanentnog toka prikazane su na slikama 5.1. i 5.2.



Slika 5.1. Razdioba remanentnog toka za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametre $U_2 = 21$ V (+) i $\alpha = 0^\circ$.



Slika 5.2. Razdioba remanentnog toka za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametre $U_2 = 36 \text{ V } (-)$ i $\alpha = 150^\circ$.

Razdioba rezultata, odnosno remanentnog toka za parametre $U_2 = 21 \text{ V } (+)$ i $\alpha = 0^\circ$ na slici 5.1. ima oblik normalne razdiobe, ali uz veća odstupanja u odnosu na razdiobu za $U_2 = 36 \text{ V } (-)$ i $\alpha = 150^\circ$ na slici 5.2. Naime, ova dva slučaja karakteristična su po tome što je za parametre $U_2 = 21 \text{ V } (+)$ i $\alpha = 0^\circ$ provedeno dva slijeda Monte Carlo simulacija, odnosno 20.000 iteracija, a za $U_2 = 36 \text{ V } (-)$ i $\alpha = 150^\circ$ 59 sljedova, odnosno 590.000 iteracija. Naravno, za oba slučaja, kao i za sve ostale, zadovoljen je stabilizacijski kriterij prema [70]. Dakle, što je više provedenih iteracija, razdioba rezultata približava se normalnoj, odnosno u ovom slučaju onoj koja je zadana za ulaznu veličinu.

Srednje vrijednosti remanentnog toka dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazane su u tablici 5.5.

Tablica 5.5. Srednje vrijednosti remanentnog toka u mVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,083	3,085	3,080	3,078	3,078	3,077
33 (+)	2,752	2,788	2,758	2,747	2,748	2,751	2,766
30 (+)	2,123	2,179	2,164	2,369	2,330	2,178	2,337
27 (+)	1,805	1,881	2,104	2,078	1,872	1,864	2,055
24 (+)	1,605	1,721	1,557	1,705	1,664	1,750	1,610
21 (+)	1,323	1,455	1,378	1,344	1,536	1,309	1,242
18 (+)	1,160	1,326	1,041	1,018	1,253	1,189	1,280
15 (+)	1,004	1,072	0,868	1,026	0,913	0,864	0,892
12 (+)	0,584	0,508	0,606	0,687	0,544	0,645	0,650
9 (+)	0,377	0,378	0,445	0,370	0,454	0,353	0,429
6 (+)	0,273	0,331	0,339	0,310	0,340	0,312	0,267
3 (+)	0,167	0,163	0,186	0,151	0,181	0,143	0,148
0	-0,049	0,002	0,002	0,013	0,051	-0,037	-0,023
3 (-)	-0,154	-0,128	-0,130	-0,139	-0,139	-0,156	-0,151
6 (-)	-0,308	-0,263	-0,278	-0,270	-0,307	-0,342	-0,335
9 (-)	-0,443	-0,386	-0,339	-0,457	-0,381	-0,438	-0,430
12 (-)	-0,714	-0,738	-0,713	-0,692	-0,644	-0,801	-0,614
15 (-)	-0,992	-0,756	-0,802	-0,974	-0,879	-0,887	-0,988
18 (-)	-1,066	-1,126	-1,087	-0,917	-1,006	-1,098	-1,239
21 (-)	-1,458	-1,261	-1,195	-1,447	-1,360	-1,360	-1,208
24 (-)	-1,543	-1,660	-1,771	-1,731	-1,502	-1,591	-1,847
27 (-)	-1,848	-1,825	-1,837	-2,067	-1,850	-2,054	-1,916
30 (-)	-2,160	-2,243	-2,295	-2,180	-2,238	-2,115	-2,291
33 (-)	-2,725	-2,735	-2,727	-2,702	-2,690	-2,749	-2,731
36 (-)	-3,051	-3,049	-3,028	-3,043	-3,048	-3,055	-3,058

Mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazane su u tablici 5.6.

Tablica 5.6. Mjerne nesigurnosti u μVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	59,639	59,516	59,737	59,845	59,860	59,852	59,670
33 (+)	59,806	59,914	59,298	59,354	59,679	59,543	59,594
30 (+)	59,043	59,658	59,492	59,721	59,564	59,731	58,692
27 (+)	58,808	59,952	59,645	59,387	59,411	59,417	58,490
24 (+)	59,445	59,892	59,791	59,886	59,359	58,795	59,973
21 (+)	59,694	59,754	59,244	59,614	59,855	59,630	58,174
18 (+)	59,474	60,059	60,286	59,951	58,594	59,416	59,749
15 (+)	59,338	60,005	60,015	60,568	60,270	60,107	59,729
12 (+)	60,730	60,332	60,023	60,126	60,314	58,797	59,578
9 (+)	58,304	59,015	60,268	57,683	60,308	60,124	59,211
6 (+)	59,359	59,582	59,654	59,362	57,989	58,849	59,095
3 (+)	60,302	60,247	60,337	60,568	60,340	58,677	59,163
0	60,042	58,511	57,874	59,224	57,980	59,127	58,866
3 (–)	60,594	59,039	59,238	59,268	60,496	58,650	58,241
6 (–)	59,235	59,209	59,153	58,690	60,340	58,569	59,457
9 (–)	59,230	58,840	58,880	59,348	58,110	59,321	58,239
12 (–)	59,574	59,925	60,482	59,879	58,775	59,723	59,167
15 (–)	59,245	60,785	58,705	60,406	59,238	59,925	60,447
18 (–)	59,316	59,792	59,881	58,953	59,529	59,743	59,658
21 (–)	59,679	58,538	59,859	60,059	59,405	59,168	59,475
24 (–)	59,479	59,594	59,768	60,092	58,757	59,648	60,158
27 (–)	59,654	59,938	60,114	60,181	59,939	60,242	59,989
30 (–)	60,052	59,852	59,907	59,942	59,743	58,674	59,733
33 (–)	59,561	59,282	59,186	59,395	59,452	59,415	59,510
36 (–)	59,759	59,566	58,565	58,611	59,174	59,283	59,251

Relativne mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazane su u tablici 5.7.

Tablica 5.7. Relativne mjerne nesigurnosti za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	1,935 %	1,931 %	1,937 %	1,943 %	1,945 %	1,944 %	1,939 %
33 (+)	2,173 %	2,149 %	2,150 %	2,161 %	2,172 %	2,165 %	2,154 %
30 (+)	2,781 %	2,738 %	2,749 %	2,521 %	2,557 %	2,742 %	2,512 %
27 (+)	3,258 %	3,187 %	2,835 %	2,858 %	3,173 %	3,188 %	2,846 %
24 (+)	3,704 %	3,481 %	3,840 %	3,512 %	3,566 %	3,360 %	3,726 %
21 (+)	4,510 %	4,107 %	4,300 %	4,437 %	3,897 %	4,557 %	4,682 %
18 (+)	5,127 %	4,531 %	5,789 %	5,891 %	4,678 %	4,998 %	4,668 %
15 (+)	5,911 %	5,595 %	6,912 %	5,903 %	6,603 %	6,956 %	6,694 %
12 (+)	10,39 %	11,88 %	9,901 %	8,754 %	11,09 %	9,117 %	9,165 %
9 (+)	15,48 %	15,60 %	13,56 %	15,60 %	13,30 %	17,03 %	13,82 %
6 (+)	21,78 %	18,00 %	17,61 %	19,12 %	17,04 %	18,87 %	22,16 %
3 (+)	36,18 %	37,06 %	32,42 %	40,11 %	33,38 %	41,03 %	40,07 %
0	123,6 %	2359 %	3292 %	463,7 %	112,8 %	158,3 %	252,2 %
3 (-)	39,23 %	45,95 %	45,70 %	42,67 %	43,37 %	37,52 %	38,63 %
6 (-)	19,22 %	22,55 %	21,24 %	21,75 %	19,66 %	17,14 %	17,75 %
9 (-)	13,38 %	15,26 %	17,37 %	13,00 %	15,25 %	13,55 %	13,56 %
12 (-)	8,343 %	8,123 %	8,481 %	8,657 %	9,128 %	7,459 %	9,631 %
15 (-)	5,970 %	8,044 %	7,317 %	6,199 %	6,743 %	6,759 %	6,116 %
18 (-)	5,567 %	5,308 %	5,511 %	6,428 %	5,917 %	5,439 %	4,816 %
21 (-)	4,094 %	4,641 %	5,011 %	4,152 %	4,366 %	4,350 %	4,922 %
24 (-)	3,856 %	3,590 %	3,374 %	3,471 %	3,912 %	3,748 %	3,258 %
27 (-)	3,229 %	3,284 %	3,273 %	2,911 %	3,240 %	2,933 %	3,132 %
30 (-)	2,781 %	2,669 %	2,611 %	2,750 %	2,669 %	2,774 %	2,607 %
33 (-)	2,186 %	2,167 %	2,170 %	2,199 %	2,210 %	2,161 %	2,179 %
36 (-)	1,959 %	1,954 %	1,934 %	1,926 %	1,942 %	1,940 %	1,938 %

Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazan je u tablici 5.8.

Tablica 5.8. Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	125	144	183	192	133	146	147
33 (+)	190	154	147	155	147	150	164
30 (+)	177	146	158	169	176	208	175
27 (+)	153	165	185	161	146	181	191
24 (+)	158	181	174	179	167	137	169
21 (+)	173	149	132	166	151	183	166
18 (+)	163	171	164	171	166	141	151
15 (+)	135	156	157	181	173	170	154
12 (+)	173	169	193	160	164	205	161
9 (+)	140	144	147	172	167	167	161
6 (+)	175	153	165	148	151	169	183
3 (+)	141	147	129	161	150	169	144
0	164	167	155	169	135	153	146
3 (-)	174	159	158	163	180	133	157
6 (-)	158	189	147	143	202	141	180
9 (-)	182	177	172	189	170	173	178
12 (-)	160	156	180	156	169	142	150
15 (-)	161	169	136	141	164	164	168
18 (-)	3	172	185	136	160	127	167
21 (-)	167	164	159	180	161	175	139
24 (-)	146	157	172	156	136	156	153
27 (-)	147	156	173	180	168	162	148
30 (-)	178	170	147	198	146	144	149
33 (-)	181	170	167	166	163	192	182
36 (-)	189	156	158	143	145	151	153

Mjerna nesigurnost u tablici 5.6. približno je jednaka za sve parametre U_2 i α . Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.7. poprima značajno veće iznose za parametar $U_2 = 0$ V jer je apsolutna vrijednost srednje vrijednosti remanentnog toka, koja je u nazivniku pri računanju relativne mjerne nesigurnosti, vrlo bliska nuli. Također, relativna mjerna nesigurnost smanjuje se povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka, što je očekivano. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega tri do 208.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}) prema jednadžbi (5-15), te ista iznosi 59,508 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$) prema jednadžbi

(5-16), te ista iznosi 9,406 %. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 28.197, što znači da je provedeno ukupno 281.970.000 iteracija, odnosno prosječno 161,13 sljedova za jedno mjerenje.

Ulaznoj veličini napona sekundara dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a razdiobe izlaznog signala remanentnog toka imaju oblik normalne razdiobe. Također, kao i u prethodnom slučaju, veća odstupanja u odnosu na normalnu razdiobu imaju mjerenja s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja odstupanja mjerenja s većim brojem sljedova.

Srednje vrijednosti remanentnog toka dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazane su u tablici 5.9.

Tablica 5.9. Srednje vrijednosti remanentnog toka u mVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,083	3,085	3,080	3,078	3,079	3,077
33 (+)	2,752	2,788	2,757	2,746	2,748	2,751	2,766
30 (+)	2,123	2,179	2,164	2,369	2,330	2,178	2,337
27 (+)	1,805	1,881	2,104	2,078	1,872	1,864	2,055
24 (+)	1,605	1,721	1,557	1,705	1,664	1,750	1,609
21 (+)	1,324	1,455	1,378	1,344	1,536	1,309	1,243
18 (+)	1,160	1,326	1,041	1,018	1,253	1,189	1,280
15 (+)	1,004	1,072	0,868	1,026	0,913	0,864	0,892
12 (+)	0,584	0,508	0,606	0,687	0,544	0,645	0,650
9 (+)	0,377	0,378	0,445	0,370	0,454	0,353	0,429
6 (+)	0,273	0,331	0,339	0,310	0,340	0,312	0,267
3 (+)	0,167	0,163	0,186	0,151	0,181	0,143	0,148
0	-0,049	0,003	0,002	0,013	0,051	-0,037	-0,023
3 (-)	-0,155	-0,129	-0,130	-0,139	-0,140	-0,156	-0,151
6 (-)	-0,308	-0,263	-0,279	-0,270	-0,307	-0,342	-0,335
9 (-)	-0,443	-0,386	-0,339	-0,457	-0,381	-0,438	-0,430
12 (-)	-0,714	-0,738	-0,713	-0,692	-0,644	-0,801	-0,614
15 (-)	-0,992	-0,756	-0,802	-0,974	-0,878	-0,887	-0,988
18 (-)	-1,065	-1,126	-1,087	-0,917	-1,006	-1,099	-1,239
21 (-)	-1,458	-1,261	-1,195	-1,447	-1,361	-1,360	-1,208
24 (-)	-1,543	-1,660	-1,771	-1,731	-1,502	-1,591	-1,847
27 (-)	-1,848	-1,825	-1,837	-2,067	-1,850	-2,054	-1,916
30 (-)	-2,160	-2,243	-2,295	-2,180	-2,238	-2,115	-2,291
33 (-)	-2,725	-2,735	-2,727	-2,702	-2,690	-2,749	-2,732
36 (-)	-3,051	-3,049	-3,028	-3,043	-3,048	-3,055	-3,057

Mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazane su u tablici 5.10.

Tablica 5.10. Mjerne nesigurnosti u μVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	89,446	89,194	89,581	89,754	89,982	89,821	89,424
33 (+)	89,664	89,795	89,001	89,021	89,551	89,226	89,331
30 (+)	88,550	89,552	89,250	89,612	89,341	89,442	88,062
27 (+)	88,184	89,972	89,531	88,993	89,184	89,095	87,669
24 (+)	89,275	89,895	89,736	89,764	89,040	88,216	89,939
21 (+)	89,605	89,652	88,876	89,483	89,747	89,471	87,136
18 (+)	89,316	90,197	90,319	89,881	87,917	89,140	89,684
15 (+)	88,996	89,982	90,051	90,759	90,531	90,240	89,615
12 (+)	91,062	90,490	90,071	90,249	90,510	88,206	89,305
9 (+)	87,478	88,606	90,283	86,586	90,460	90,356	88,862
6 (+)	89,043	89,314	89,480	88,951	87,013	88,246	88,576
3 (+)	90,415	90,282	90,533	90,788	90,447	87,974	88,765
0	90,158	87,714	86,781	88,886	87,100	88,767	88,303
3 (–)	90,924	88,604	88,797	88,978	90,690	88,058	87,424
6 (–)	88,878	88,827	88,626	88,057	90,568	87,851	89,161
9 (–)	88,841	88,314	88,171	89,046	87,164	88,919	87,340
12 (–)	89,397	89,892	90,636	89,833	88,060	89,562	88,774
15 (–)	88,773	91,127	87,917	90,573	88,805	89,843	90,792
18 (–)	89,546	89,731	89,876	88,449	89,306	89,617	89,391
21 (–)	89,535	87,743	89,800	90,039	89,047	88,680	89,359
24 (–)	89,169	89,358	89,652	90,128	88,017	89,435	90,280
27 (–)	89,524	89,954	90,193	90,307	89,935	90,288	89,996
30 (–)	89,958	89,778	89,838	89,939	89,551	88,053	89,691
33 (–)	89,280	88,944	88,752	89,041	89,247	89,026	89,219
36 (–)	89,557	89,337	87,805	87,837	88,682	88,914	88,847

Relativne mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazane su u tablici 5.11.

Tablica 5.11. Relativne mjerne nesigurnosti za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	2,902 %	2,893 %	2,904 %	2,914 %	2,923 %	2,918 %	2,907 %
33 (+)	3,258 %	3,221 %	3,228 %	3,241 %	3,259 %	3,244 %	3,230 %
30 (+)	4,170 %	4,110 %	4,125 %	3,782 %	3,835 %	4,107 %	3,769 %
27 (+)	4,885 %	4,782 %	4,256 %	4,282 %	4,763 %	4,781 %	4,265 %
24 (+)	5,562 %	5,224 %	5,764 %	5,264 %	5,350 %	5,041 %	5,588 %
21 (+)	6,770 %	6,163 %	6,452 %	6,660 %	5,842 %	6,837 %	7,013 %
18 (+)	7,700 %	6,805 %	8,672 %	8,832 %	7,019 %	7,498 %	7,007 %
15 (+)	8,864 %	8,391 %	10,37 %	8,846 %	9,918 %	10,44 %	10,04 %
12 (+)	15,58 %	17,82 %	14,86 %	13,14 %	16,64 %	13,68 %	13,74 %
9 (+)	23,23 %	23,43 %	20,31 %	23,41 %	19,94 %	25,59 %	20,74 %
6 (+)	32,67 %	26,98 %	26,42 %	28,66 %	25,57 %	28,30 %	33,20 %
3 (+)	54,21 %	55,52 %	48,64 %	60,16 %	50,04 %	61,51 %	60,14 %
0	185,6 %	3469 %	4802 %	696,6 %	169,8 %	237,6 %	378,7 %
3 (-)	58,83 %	68,94 %	68,52 %	64,06 %	65,00 %	56,36 %	58,01 %
6 (-)	28,84 %	33,83 %	31,82 %	32,64 %	29,50 %	25,70 %	26,62 %
9 (-)	20,07 %	22,90 %	26,01 %	19,50 %	22,87 %	20,31 %	20,33 %
12 (-)	12,52 %	12,19 %	12,71 %	12,99 %	13,68 %	11,19 %	14,45 %
15 (-)	8,946 %	12,06 %	10,96 %	9,294 %	10,11 %	10,13 %	9,187 %
18 (-)	8,407 %	7,966 %	8,272 %	9,644 %	8,876 %	8,158 %	7,216 %
21 (-)	6,142 %	6,956 %	7,517 %	6,224 %	6,545 %	6,520 %	7,395 %
24 (-)	5,780 %	5,383 %	5,061 %	5,206 %	5,861 %	5,620 %	4,889 %
27 (-)	4,846 %	4,929 %	4,910 %	4,368 %	4,862 %	4,396 %	4,698 %
30 (-)	4,166 %	4,003 %	3,915 %	4,126 %	4,001 %	4,163 %	3,914 %
33 (-)	3,277 %	3,252 %	3,254 %	3,296 %	3,318 %	3,238 %	3,266 %
36 (-)	2,935 %	2,930 %	2,900 %	2,887 %	2,910 %	2,910 %	2,906 %

Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazan je u tablici 5.12.

Tablica 5.12. Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	371	370	394	344	371	341	337
33 (+)	345	346	324	358	325	364	370
30 (+)	351	357	371	373	379	333	349
27 (+)	353	358	349	367	340	353	360
24 (+)	330	342	378	359	361	363	377
21 (+)	373	372	370	351	341	420	312
18 (+)	399	418	340	370	355	379	374
15 (+)	396	384	375	380	352	376	358
12 (+)	371	367	358	357	374	373	391
9 (+)	321	332	376	312	425	391	354
6 (+)	365	366	357	359	327	361	356
3 (+)	338	346	374	355	388	332	340
0	383	349	373	355	400	369	356
3 (-)	377	350	322	382	417	364	349
6 (-)	328	333	359	377	364	379	397
9 (-)	393	386	356	355	379	335	356
12 (-)	387	404	369	365	348	403	324
15 (-)	404	427	362	387	370	403	378
18 (-)	365	368	338	329	355	416	347
21 (-)	349	333	378	374	386	352	362
24 (-)	380	368	340	330	350	347	394
27 (-)	368	386	349	356	350	382	339
30 (-)	391	391	370	397	331	351	324
33 (-)	344	345	375	367	357	384	349
36 (-)	394	390	381	339	379	339	375

Mjerna nesigurnost u tablici 5.10. približno je jednaka za sve parametre U_2 i α . Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.11. poprima značajno veće iznose za parametar $U_2 = 0$ V jer je apsolutna vrijednost srednje vrijednosti remanentnog toka, koja je u nazivniku pri računanju relativne mjerne nesigurnosti, vrlo bliska nuli. Također, relativna mjerna nesigurnost smanjuje se povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka, što je očekivano. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata manje varira u odnosu na prethodna dva slučaja, od 312 do 427.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}) prema jednadžbi (5-15), te ista iznosi 89,261 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$) prema jednadžbi

(5-16), te ista iznosi 14,109 %. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 63.662, što znači da je provedeno ukupno 636.620.000 iteracija, odnosno prosječno 363,78 sljedova za jedno mjerenje.

Ulaznoj veličini napona sekundara dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a razdiobe izlaznog signala remanentnog toka imaju oblik normalne razdiobe. Također, kao i u prethodna dva slučaja, veća odstupanja u odnosu na normalnu razdiobu imaju mjerenja s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja odstupanja mjerenja s većim brojem sljedova.

Za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, uspoređene su srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti, te prosječni brojevi sljedova za jedno mjerenje za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara (1 %, 2 % i 3 %), a rezultati su prikazani u tablici 5.13.

Tablica 5.13. Srednje vrijednosti standardne i relativne mjerne nesigurnosti, te prosječni brojevi sljedova za jedno mjerenje za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara.

Relativna nesigurnost napona sekundara	Srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka, u_{SR} (μ Vs)	Srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka, $u_{\%SR}$	Prosječan broj sljedova za jedno mjerenje
1 %	29,747	4,704 %	40,50
2 %	59,508	9,406 %	161,13
3 %	89,261	14,109 %	363,78

Iz rezultata prikazanih u tablici 5.13., vidljivo je kako je trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina linearan. Dakle, linearnim povećanjem mjerne nesigurnosti napona sekundara, očekuje se linearno povećanje mjerne nesigurnosti remanentnog toka. Također, srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka gotovo je pet puta veća od pripadajuće relativne nesigurnosti napona sekundara za ovu metodu. Na kraju, najmanji prosječan broj sljedova Monte Carlo simulacije za jedno mjerenje je pri relativnoj nesigurnosti napona sekundara od 1 %, a najveći pri 3 %.

5.2. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon

Prilikom testiranja metode određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon opisane u potpoglavlju 3.2. ovoga rada, provedeno je ukupno 175 mjerenja. Za potrebe procjene mjerne nesigurnosti, bit će korištene izmjerene ulazne veličine, odnosno napon sekundara u ovom slučaju, za 164 mjerenja za koje je bilo moguće odrediti remanentni tok primjenom ove metode. Naime, kao što je opisano u potpoglavlju 3.2. ovoga rada, postoje slučajevi u kojima struja magnetiziranja nije dosegla vrijednost izabrane struje zasićenja, odnosno jezgra nije otišla u zasićenje nakon uklopa transformatora, zbog čega nije bilo moguće odrediti remanentni tok. Za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, bit će korištene vrijednosti relativne nesigurnosti napona sekundara od 1 %, 2 % i 3 %, što će rezultirati s ukupno 492 provedene Monte Carlo simulacije. Programski kod u programskom paketu MATLAB te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada.

Srednje vrijednosti remanentnog toka dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazane su u tablici 5.14.

Tablica 5.14. Srednje vrijednosti remanentnog toka u mVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,089	3,111	3,115	3,095	-	3,048
33 (+)	2,761	2,793	2,782	2,773	2,762	-	2,718
30 (+)	2,142	2,189	2,195	2,398	2,348	2,134	2,287
27 (+)	1,829	1,898	2,115	2,119	1,876	1,816	2,005
24 (+)	1,634	1,745	1,584	1,734	-	1,696	1,548
21 (+)	1,345	1,463	1,405	1,367	-	1,246	1,186
18 (+)	1,181	1,349	1,068	1,035	-	1,135	1,218
15 (+)	1,030	1,100	0,885	1,050	0,870	0,811	0,844
12 (+)	0,612	0,527	0,626	0,699	0,494	0,577	0,594
9 (+)	0,414	0,398	0,469	0,382	0,409	0,296	0,365
6 (+)	0,300	0,355	0,360	0,325	0,276	0,246	0,208
3 (+)	0,183	0,192	0,213	0,157	0,126	0,088	0,087
0	-0,029	0,020	0,024	0,010	-0,023	-0,099	-0,085
3 (-)	-0,137	-0,105	-0,114	-	-0,199	-0,220	-0,221
6 (-)	-0,278	-0,240	-0,263	-	-0,360	-0,407	-0,392
9 (-)	-0,418	-0,365	-0,311	-	-0,459	-0,490	-0,503
12 (-)	-0,686	-0,713	-0,695	-0,728	-0,710	-0,847	-0,671
15 (-)	-0,953	-0,744	-0,785	-1,021	-0,935	-0,936	-1,034
18 (-)	-1,029	-1,106	-1,071	-0,971	-1,063	-1,143	-1,287
21 (-)	-1,422	-1,226	-1,173	-1,495	-1,417	-1,413	-1,250
24 (-)	-1,501	-1,636	-	-1,788	-1,565	-1,637	-1,889
27 (-)	-1,816	-1,807	-	-2,118	-1,902	-2,108	-1,952
30 (-)	-2,143	-2,227	-2,335	-2,243	-2,289	-2,162	-2,325
33 (-)	-2,712	-2,733	-2,772	-2,752	-2,742	-2,787	-2,761
36 (-)	-3,045	-	-3,089	-3,099	-3,098	-3,094	-3,083

Mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazane su u tablici 5.15.

Tablica 5.15. Mjerne nesigurnosti u μVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	5,935	5,838	5,790	5,788	5,819	-	5,506
33 (+)	6,048	5,942	5,811	5,798	5,862	-	5,265
30 (+)	6,111	6,058	5,936	5,912	5,959	7,359	5,083
27 (+)	6,143	6,134	5,970	5,919	6,139	7,238	4,992
24 (+)	6,242	6,152	6,076	6,045	-	7,149	4,971
21 (+)	6,316	6,198	6,051	6,092	-	7,172	4,775
18 (+)	6,316	6,248	6,208	6,188	-	7,136	4,885
15 (+)	6,328	6,274	6,211	6,233	7,665	7,196	4,806
12 (+)	6,541	6,421	6,259	6,301	7,617	6,956	4,741
9 (+)	6,333	6,305	6,300	6,245	7,565	7,125	4,667
6 (+)	6,455	6,380	6,272	6,299	7,314	6,961	4,636
3 (+)	6,569	6,450	6,357	6,476	7,556	6,893	4,596
0	6,577	6,300	6,158	6,462	7,261	6,907	4,538
3 (-)	6,645	6,371	6,306	-	7,549	6,865	4,475
6 (-)	6,530	6,416	6,318	-	7,510	6,808	4,513
9 (-)	6,543	6,404	6,301	-	7,192	6,926	4,398
12 (-)	6,633	6,558	6,537	7,896	7,169	6,840	4,435
15 (-)	6,636	6,660	6,391	7,901	7,230	6,871	4,434
18 (-)	6,694	6,609	6,572	7,704	7,270	6,835	4,311
21 (-)	6,756	6,503	6,591	7,771	7,177	6,689	4,317
24 (-)	6,749	6,681	-	7,704	7,093	6,752	4,205
27 (-)	6,821	6,761	-	7,733	7,168	6,734	4,165
30 (-)	6,923	6,838	8,141	7,640	7,083	6,533	4,055
33 (-)	7,007	6,999	7,937	7,511	7,018	6,517	3,869
36 (-)	7,178	-	7,760	7,337	6,910	6,392	3,716

Relativne mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazane su u tablici 5.16.

Tablica 5.16. Relativne mjerne nesigurnosti za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	0,193 %	0,189 %	0,186 %	0,186 %	0,188 %	-	0,181 %
33 (+)	0,219 %	0,213 %	0,209 %	0,209 %	0,212 %	-	0,194 %
30 (+)	0,285 %	0,277 %	0,270 %	0,247 %	0,254 %	0,345 %	0,222 %
27 (+)	0,336 %	0,323 %	0,282 %	0,279 %	0,327 %	0,399 %	0,249 %
24 (+)	0,382 %	0,353 %	0,384 %	0,349 %	-	0,422 %	0,321 %
21 (+)	0,470 %	0,424 %	0,431 %	0,446 %	-	0,576 %	0,402 %
18 (+)	0,535 %	0,463 %	0,581 %	0,598 %	-	0,629 %	0,401 %
15 (+)	0,615 %	0,570 %	0,702 %	0,593 %	0,881 %	0,887 %	0,570 %
12 (+)	1,068 %	1,219 %	0,999 %	0,902 %	1,543 %	1,205 %	0,799 %
9 (+)	1,528 %	1,584 %	1,343 %	1,635 %	1,850 %	2,404 %	1,278 %
6 (+)	2,150 %	1,795 %	1,743 %	1,939 %	2,654 %	2,829 %	2,224 %
3 (+)	3,581 %	3,364 %	2,991 %	4,113 %	6,016 %	7,872 %	5,278 %
0	22,85 %	31,78 %	25,18 %	61,81 %	31,31 %	6,956 %	5,346 %
3 (-)	4,856 %	6,063 %	5,509 %	-	3,802 %	3,121 %	2,022 %
6 (-)	2,349 %	2,671 %	2,401 %	-	2,089 %	1,673 %	1,153 %
9 (-)	1,565 %	1,754 %	2,029 %	-	1,567 %	1,413 %	0,875 %
12 (-)	0,966 %	0,920 %	0,940 %	1,085 %	1,010 %	0,807 %	0,661 %
15 (-)	0,696 %	0,895 %	0,814 %	0,774 %	0,774 %	0,734 %	0,429 %
18 (-)	0,651 %	0,598 %	0,614 %	0,794 %	0,684 %	0,598 %	0,335 %
21 (-)	0,475 %	0,531 %	0,562 %	0,520 %	0,507 %	0,474 %	0,345 %
24 (-)	0,450 %	0,408 %	-	0,431 %	0,453 %	0,412 %	0,223 %
27 (-)	0,376 %	0,374 %	-	0,365 %	0,377 %	0,319 %	0,213 %
30 (-)	0,323 %	0,307 %	0,349 %	0,341 %	0,309 %	0,302 %	0,174 %
33 (-)	0,258 %	0,256 %	0,286 %	0,273 %	0,256 %	0,234 %	0,140 %
36 (-)	0,236 %	-	0,251 %	0,237 %	0,223 %	0,207 %	0,121 %

Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazan je u tablici 5.17.

Tablica 5.17. Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	180	127	154	132	159	-	121
33 (+)	169	164	150	2	152	-	148
30 (+)	160	157	151	173	153	230	130
27 (+)	156	129	136	153	158	263	130
24 (+)	195	177	158	141	-	196	108
21 (+)	168	169	152	181	-	255	111
18 (+)	197	195	190	176	-	220	105
15 (+)	171	133	188	175	285	237	101
12 (+)	193	176	211	182	294	214	121
9 (+)	196	155	170	162	274	196	121
6 (+)	166	167	191	185	251	219	109
3 (+)	196	180	214	176	276	220	101
0	192	185	168	177	230	195	74
3 (-)	208	193	195	-	239	217	87
6 (-)	153	215	162	-	235	205	112
9 (-)	218	206	171	-	233	228	97
12 (-)	190	189	184	271	257	193	89
15 (-)	195	219	192	270	262	217	85
18 (-)	167	180	206	270	258	209	78
21 (-)	182	175	203	261	211	194	92
24 (-)	207	181	-	270	203	201	2
27 (-)	196	187	-	280	260	209	88
30 (-)	216	187	325	247	164	217	86
33 (-)	221	250	269	216	236	185	51
36 (-)	210	-	283	258	173	183	53

Mjerna nesigurnost u tablici 5.15. manja je za one kombinacije parametara U_2 i α pri kojima brže dođe do zasićenja jezgre. Razlog tome je kraći interval integriranja, prema jednadžbi (3-17), što za posljedicu ima manji utjecaj nesigurnosti napona sekundara na izračunati remanentni tok. Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.16. poprima veće iznose za parametar $U_2 = 0$ V jer je apsolutna vrijednost srednje vrijednosti remanentnog toka, koja je u nazivniku pri računanju relativne mjerne nesigurnosti, vrlo bliska nuli. Također, relativna mjerna nesigurnost smanjuje se povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka, što je očekivano. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega dva do 325.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}):

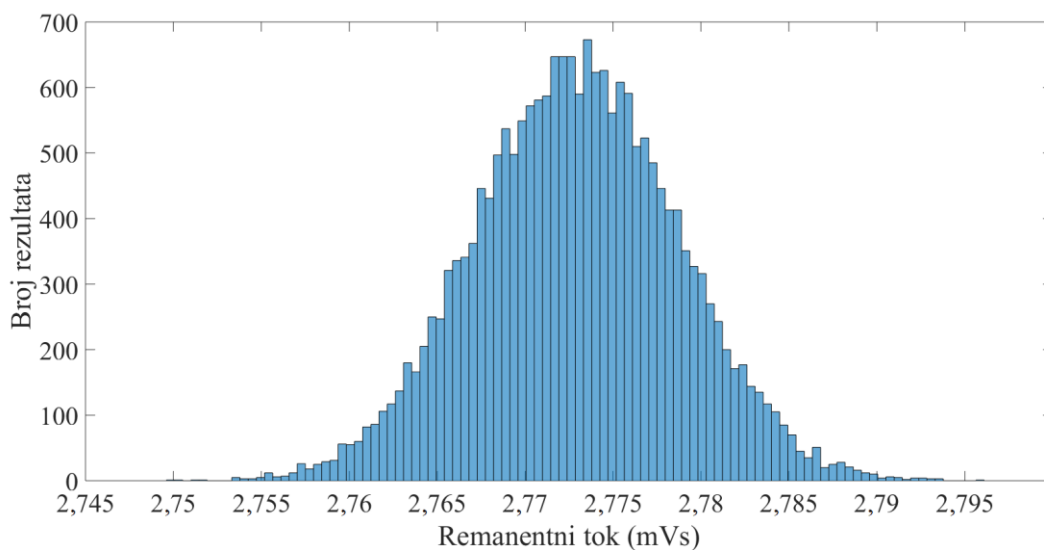
$$u_{SR} = \frac{1}{164} \sum_{i=1}^{164} u_{\Phi Ri} , \quad (5-17)$$

te ista iznosi 6,354 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$):

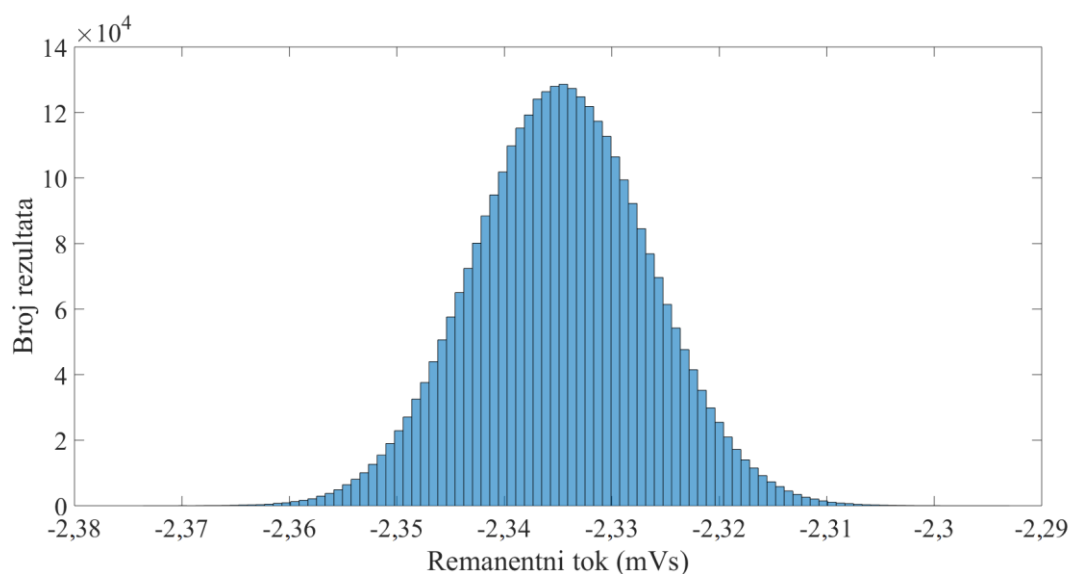
$$u_{\%SR} = \frac{1}{157} \sum_{i=1}^{157} u_{\%i} , \quad (5-18)$$

te ista iznosi 1,037 %. Pri tome nisu uzete u obzir relativne mjerne nesigurnosti za parametar $U_2 = 0$ V, s obzirom da je nazivnik u tom slučaju vrlo blizak nuli pa ta vrijednost može značajno utjecati na srednju vrijednost, ali ne zbog iznosa mjerne nesigurnosti, već zbog srednje vrijednosti remanentnog toka koja je vrlo bliska nuli. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 30.045, što znači da je provedeno ukupno 300.450.000 iteracija, odnosno prosječno 183,20 sljedova za jedno mjerenje.

Naponu sekundara kao ulaznoj veličini dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a karakteristične razdiobe remanentnog toka prikazane su na slikama 5.3. i 5.4.



Slika 5.3. Razdioba remanentnog toka za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametre $U_2 = 33 \text{ V (+)}$ i $\alpha = 90^\circ$.



Slika 5.4. Razdioba remanentnog toka za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametre $U_2 = 30 \text{ V (-)}$ i $\alpha = 60^\circ$.

Razdioba rezultata, odnosno remanentnog toka za parametre $U_2 = 33 \text{ V (+)}$ i $\alpha = 90^\circ$ na slici 5.3. ima oblik normalne razdiobe, ali uz veća odstupanja u odnosu na razdiobu za $U_2 = 30 \text{ V (-)}$ i $\alpha = 60^\circ$ na slici 5.4. Naime, ova dva slučaja karakteristična su po tome što je za parametre $U_2 = 33 \text{ V (+)}$ i $\alpha = 90^\circ$ provedeno dva slijeda Monte Carlo simulacija, odnosno 20.000 iteracija, a za $U_2 = 30 \text{ V (-)}$ i $\alpha = 60^\circ$ 325 sljedova, odnosno 3.250.000 iteracija. Naravno, za oba slučaja, kao i za sve ostale, zadovoljen je stabilizacijski kriterij prema [70]. Dakle, što je više provedenih

iteracija, razdioba rezultata približava se normalnoj, odnosno u ovom slučaju onoj koja je zadana za ulaznu veličinu.

Srednje vrijednosti remanentnog toka dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazane su u tablici 5.18.

Tablica 5.18. Srednje vrijednosti remanentnog toka u mVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,089	3,111	3,115	3,095	-	3,048
33 (+)	2,761	2,793	2,782	2,773	2,762	-	2,718
30 (+)	2,142	2,189	2,195	2,398	2,348	2,134	2,287
27 (+)	1,829	1,898	2,115	2,119	1,876	1,816	2,005
24 (+)	1,634	1,745	1,584	1,734	-	1,696	1,548
21 (+)	1,345	1,463	1,405	1,367	-	1,246	1,186
18 (+)	1,182	1,349	1,068	1,035	-	1,135	1,218
15 (+)	1,030	1,100	0,885	1,050	0,870	0,811	0,844
12 (+)	0,612	0,527	0,626	0,699	0,494	0,577	0,594
9 (+)	0,414	0,398	0,469	0,382	0,409	0,296	0,365
6 (+)	0,300	0,355	0,360	0,325	0,276	0,246	0,208
3 (+)	0,183	0,192	0,212	0,158	0,126	0,087	0,087
0	-0,029	0,020	0,024	0,011	-0,023	-0,099	-0,085
3 (-)	-0,137	-0,105	-0,114	-	-0,199	-0,220	-0,221
6 (-)	-0,278	-0,240	-0,263	-	-0,359	-0,407	-0,392
9 (-)	-0,418	-0,365	-0,311	-	-0,459	-0,490	-0,503
12 (-)	-0,686	-0,713	-0,695	-0,728	-0,710	-0,847	-0,671
15 (-)	-0,953	-0,744	-0,785	-1,021	-0,935	-0,936	-1,034
18 (-)	-1,029	-1,106	-1,071	-0,971	-1,063	-1,143	-1,287
21 (-)	-1,422	-1,225	-1,173	-1,495	-1,417	-1,412	-1,250
24 (-)	-1,501	-1,636	-	-1,788	-1,565	-1,637	-1,889
27 (-)	-1,816	-1,807	-	-2,119	-1,902	-2,108	-1,952
30 (-)	-2,143	-2,227	-2,335	-2,243	-2,289	-2,162	-2,325
33 (-)	-2,713	-2,733	-2,772	-2,752	-2,741	-2,787	-2,761
36 (-)	-3,045	-	-3,089	-3,099	-3,098	-3,094	-3,083

Mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazane su u tablici 5.19.

Tablica 5.19. Mjerne nesigurnosti u μVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	11,848	11,625	11,558	11,622	11,721	-	10,986
33 (+)	12,120	11,909	11,624	11,649	11,713	-	10,530
30 (+)	12,234	12,046	11,878	11,815	11,880	14,705	10,099
27 (+)	12,263	12,293	11,944	11,825	12,295	14,472	9,985
24 (+)	12,430	12,201	12,132	12,133	-	14,267	10,027
21 (+)	12,605	12,423	12,111	12,214	-	14,342	9,560
18 (+)	12,624	12,481	12,425	12,324	-	14,250	9,787
15 (+)	12,664	12,556	12,425	12,517	15,358	14,407	9,613
12 (+)	13,081	12,851	12,500	12,569	15,107	13,840	9,483
9 (+)	12,674	12,637	12,569	12,426	14,954	14,206	9,335
6 (+)	12,861	12,722	12,533	12,580	14,664	13,944	9,276
3 (+)	13,160	12,933	12,741	12,941	15,192	13,740	9,195
0	13,113	12,558	12,319	12,955	14,533	13,768	9,087
3 (-)	13,422	12,723	12,545	-	15,127	13,711	8,946
6 (-)	13,118	12,863	12,656	-	15,019	13,557	9,041
9 (-)	13,126	12,776	12,615	-	14,399	13,908	8,808
12 (-)	13,295	13,082	13,059	15,845	14,347	13,726	8,873
15 (-)	13,231	13,297	12,671	15,751	14,429	13,779	8,869
18 (-)	13,361	13,274	13,140	15,393	14,431	13,708	8,630
21 (-)	13,521	13,021	13,037	15,546	14,324	13,396	8,636
24 (-)	13,505	13,313	-	15,404	14,198	13,559	8,390
27 (-)	13,586	13,483	-	15,492	14,372	13,412	8,341
30 (-)	13,834	13,746	16,287	15,243	14,140	13,105	8,099
33 (-)	14,051	14,029	15,893	14,990	14,061	13,041	7,732
36 (-)	14,418	-	15,533	14,692	13,854	12,858	7,429

Relativne mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazane su u tablici 5.20.

Tablica 5.20. Relativne mjerne nesigurnosti za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	0,384 %	0,376 %	0,372 %	0,373 %	0,379 %	-	0,360 %
33 (+)	0,439 %	0,426 %	0,418 %	0,420 %	0,424 %	-	0,387 %
30 (+)	0,571 %	0,550 %	0,541 %	0,493 %	0,506 %	0,689 %	0,442 %
27 (+)	0,670 %	0,648 %	0,565 %	0,558 %	0,655 %	0,797 %	0,498 %
24 (+)	0,761 %	0,699 %	0,766 %	0,700 %	-	0,841 %	0,648 %
21 (+)	0,937 %	0,849 %	0,862 %	0,893 %	-	1,151 %	0,806 %
18 (+)	1,068 %	0,925 %	1,163 %	1,191 %	-	1,256 %	0,804 %
15 (+)	1,230 %	1,141 %	1,404 %	1,192 %	1,764 %	1,776 %	1,139 %
12 (+)	2,137 %	2,438 %	1,995 %	1,798 %	3,059 %	2,398 %	1,597 %
9 (+)	3,060 %	3,175 %	2,680 %	3,251 %	3,657 %	4,792 %	2,556 %
6 (+)	4,284 %	3,580 %	3,484 %	3,873 %	5,321 %	5,666 %	4,450 %
3 (+)	7,173 %	6,747 %	5,997 %	8,216 %	12,09 %	15,70 %	10,56 %
0	45,53 %	63,34 %	50,38 %	123,3 %	62,81 %	13,86 %	10,71 %
3 (-)	9,805 %	12,09 %	10,96 %	-	7,614 %	6,233 %	4,042 %
6 (-)	4,719 %	5,352 %	4,810 %	-	4,178 %	3,331 %	2,309 %
9 (-)	3,139 %	3,499 %	4,062 %	-	3,136 %	2,838 %	1,752 %
12 (-)	1,937 %	1,835 %	1,878 %	2,177 %	2,021 %	1,620 %	1,322 %
15 (-)	1,388 %	1,787 %	1,614 %	1,543 %	1,544 %	1,472 %	0,857 %
18 (-)	1,298 %	1,200 %	1,227 %	1,585 %	1,357 %	1,199 %	0,670 %
21 (-)	0,951 %	1,063 %	1,111 %	1,040 %	1,011 %	0,948 %	0,691 %
24 (-)	0,900 %	0,814 %	-	0,861 %	0,907 %	0,828 %	0,444 %
27 (-)	0,748 %	0,746 %	-	0,731 %	0,756 %	0,636 %	0,427 %
30 (-)	0,645 %	0,617 %	0,698 %	0,680 %	0,618 %	0,606 %	0,348 %
33 (-)	0,518 %	0,513 %	0,573 %	0,545 %	0,513 %	0,468 %	0,280 %
36 (-)	0,474 %	-	0,503 %	0,474 %	0,447 %	0,416 %	0,241 %

Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazan je u tablici 5.21.

Tablica 5.21. Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	2	2	4	3	4	-	6
33 (+)	2	7	8	5	6	-	6
30 (+)	2	2	6	4	8	11	2
27 (+)	3	6	7	4	11	4	454
24 (+)	8	2	5	3	-	15	6
21 (+)	4	8	9	3	-	3	402
18 (+)	2	8	10	2	-	2	462
15 (+)	6	5	3	2	12	10	403
12 (+)	14	9	8	2	7	7	392
9 (+)	2	6	6	2	2	3	402
6 (+)	6	16	13	13	8	7	390
3 (+)	8	11	6	10	3	10	342
0	9	5	8	4	9	3	369
3 (-)	2	2	9	-	2	8	377
6 (-)	2	3	8	-	17	5	400
9 (-)	9	3	5	-	5	8	330
12 (-)	7	9	6	16	7	2	380
15 (-)	9	5	2	14	3	8	354
18 (-)	7	2	3	4	2	6	358
21 (-)	2	6	2	3	7	2	363
24 (-)	2	6	-	16	2	2	318
27 (-)	3	15	-	3	3	7	283
30 (-)	2	2	8	3	11	4	305
33 (-)	3	9	4	2	11	2	283
36 (-)	2	-	19	16	7	6	277

Mjerna nesigurnost u tablici 5.19., kao i u prethodnom slučaju, manja je za one kombinacije parametara U_2 i α pri kojima brže dođe do zasićenja jezgre. Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.20. poprima značajno veće iznose za parametar $U_2 = 0$ V te se smanjuje povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka, što je očekivano. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega dva do 462. Također, broj sljedova višestruko je veći za mjerenja pri $\alpha = 180^\circ$.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}) prema jednadžbi (5-17), te ista iznosi 12,705 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$) prema jednadžbi (5-18), te ista iznosi 2,075 %. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 8.506, što

znači da je provedeno ukupno 85.060.000 iteracija, odnosno prosječno 51,87 sljedova za jedno mjerenje.

Ulaznoj veličini napona sekundara dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a razdiobe izlaznog signala remanentnog toka imaju oblik normalne razdiobe. Također, kao i u prethodnom slučaju, veća odstupanja u odnosu na normalnu razdiobu imaju mjerenja s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja odstupanja mjerenja s većim brojem sljedova.

Srednje vrijednosti remanentnog toka dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazane su u tablici 5.22.

Tablica 5.22. Srednje vrijednosti remanentnog toka u mVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	3,082	3,089	3,111	3,115	3,095	-	3,048
33 (+)	2,761	2,793	2,782	2,773	2,762	-	2,718
30 (+)	2,142	2,189	2,195	2,398	2,348	2,134	2,287
27 (+)	1,829	1,898	2,115	2,119	1,876	1,816	2,005
24 (+)	1,634	1,745	1,584	1,734	-	1,696	1,548
21 (+)	1,345	1,463	1,405	1,367	-	1,246	1,186
18 (+)	1,181	1,349	1,068	1,035	-	1,135	1,218
15 (+)	1,030	1,100	0,885	1,050	0,870	0,811	0,844
12 (+)	0,612	0,527	0,627	0,699	0,494	0,577	0,594
9 (+)	0,414	0,398	0,469	0,382	0,409	0,296	0,365
6 (+)	0,300	0,355	0,360	0,325	0,276	0,246	0,208
3 (+)	0,183	0,192	0,213	0,157	0,126	0,088	0,087
0	-0,029	0,020	0,024	0,010	-0,023	-0,099	-0,085
3 (-)	-0,137	-0,105	-0,114	-	-0,198	-0,220	-0,221
6 (-)	-0,278	-0,240	-0,263	-	-0,360	-0,407	-0,392
9 (-)	-0,418	-0,365	-0,310	-	-0,459	-0,490	-0,503
12 (-)	-0,686	-0,713	-0,695	-0,728	-0,710	-0,848	-0,671
15 (-)	-0,953	-0,744	-0,785	-1,021	-0,935	-0,936	-1,034
18 (-)	-1,029	-1,106	-1,071	-0,971	-1,063	-1,143	-1,287
21 (-)	-1,422	-1,225	-1,173	-1,495	-1,417	-1,413	-1,250
24 (-)	-1,501	-1,636	-	-1,788	-1,565	-1,637	-1,889
27 (-)	-1,816	-1,807	-	-2,118	-1,902	-2,108	-1,952
30 (-)	-2,143	-2,227	-2,335	-2,243	-2,289	-2,162	-2,324
33 (-)	-2,712	-2,733	-2,772	-2,752	-2,741	-2,788	-2,761
36 (-)	-3,045	-	-3,089	-3,099	-3,098	-3,094	-3,083

Mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazane su u tablici 5.23.

Tablica 5.23. Mjerne nesigurnosti u μVs za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	17,855	17,539	17,355	17,417	17,490	-	16,553
33 (+)	18,177	17,798	17,488	17,387	17,567	-	15,891
30 (+)	18,324	18,171	17,849	17,754	17,845	22,096	15,338
27 (+)	18,334	18,401	17,951	17,763	18,403	21,738	15,033
24 (+)	18,701	18,531	18,220	18,123	-	21,443	14,883
21 (+)	18,946	18,598	18,154	18,260	-	21,492	14,350
18 (+)	19,016	18,748	18,610	18,590	-	21,390	14,673
15 (+)	19,051	18,866	18,665	18,735	23,131	21,566	14,396
12 (+)	19,630	19,280	18,849	18,934	22,825	20,853	14,243
9 (+)	18,954	18,909	18,903	18,734	22,681	21,413	14,025
6 (+)	19,366	19,136	18,787	18,883	21,959	20,865	13,891
3 (+)	19,726	19,344	19,084	19,407	22,676	20,727	13,796
0	19,733	18,942	18,418	19,323	21,791	20,743	13,619
3 (-)	19,960	19,166	18,923	-	22,658	20,605	13,399
6 (-)	19,576	19,223	18,990	-	22,446	20,406	13,583
9 (-)	19,612	19,199	18,902	-	21,575	20,790	13,275
12 (-)	19,832	19,632	19,595	23,718	21,535	20,542	13,340
15 (-)	19,918	19,997	19,087	23,679	21,738	20,614	13,304
18 (-)	20,116	19,867	19,694	23,119	21,788	20,516	12,920
21 (-)	20,228	19,466	19,734	23,308	21,599	20,072	12,885
24 (-)	20,249	20,244	-	23,036	21,291	20,288	12,555
27 (-)	20,385	20,294	-	23,063	21,501	20,200	12,526
30 (-)	20,744	20,680	24,369	22,887	21,265	19,590	12,124
33 (-)	21,017	20,985	23,879	22,598	21,048	19,515	11,634
36 (-)	21,557	-	23,354	22,034	20,726	19,121	11,151

Relativne mjerne nesigurnosti dobivene Monte Carlo simulacijama za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazane su u tablici 5.24.

Tablica 5.24. Relativne mjerne nesigurnosti za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	0,579 %	0,568 %	0,558 %	0,559 %	0,565 %	-	0,543 %
33 (+)	0,658 %	0,637 %	0,629 %	0,627 %	0,636 %	-	0,585 %
30 (+)	0,855 %	0,830 %	0,813 %	0,740 %	0,760 %	1,035 %	0,671 %
27 (+)	1,002 %	0,970 %	0,849 %	0,838 %	0,981 %	1,197 %	0,750 %
24 (+)	1,145 %	1,062 %	1,150 %	1,045 %	-	1,264 %	0,962 %
21 (+)	1,409 %	1,272 %	1,292 %	1,335 %	-	1,725 %	1,210 %
18 (+)	1,610 %	1,390 %	1,742 %	1,796 %	-	1,885 %	1,205 %
15 (+)	1,850 %	1,715 %	2,109 %	1,784 %	2,657 %	2,659 %	1,706 %
12 (+)	3,206 %	3,659 %	3,008 %	2,709 %	4,622 %	3,613 %	2,399 %
9 (+)	4,575 %	4,751 %	4,030 %	4,903 %	5,547 %	7,224 %	3,839 %
6 (+)	6,451 %	5,385 %	5,220 %	5,814 %	7,968 %	8,480 %	6,664 %
3 (+)	10,75 %	10,09 %	8,979 %	12,34 %	18,05 %	23,68 %	15,86 %
0	68,38 %	95,44 %	75,19 %	184,1 %	93,78 %	20,90 %	16,04 %
3 (-)	14,60 %	18,28 %	16,54 %	-	11,42 %	9,370 %	6,053 %
6 (-)	7,044 %	7,998 %	7,218 %	-	6,242 %	5,016 %	3,469 %
9 (-)	4,691 %	5,257 %	6,091 %	-	4,700 %	4,240 %	2,641 %
12 (-)	2,890 %	2,755 %	2,818 %	3,258 %	3,034 %	2,424 %	1,987 %
15 (-)	2,090 %	2,688 %	2,432 %	2,319 %	2,326 %	2,202 %	1,286 %
18 (-)	1,955 %	1,797 %	1,840 %	2,381 %	2,049 %	1,795 %	1,004 %
21 (-)	1,422 %	1,588 %	1,682 %	1,559 %	1,524 %	1,421 %	1,031 %
24 (-)	1,349 %	1,238 %	-	1,288 %	1,360 %	1,239 %	0,665 %
27 (-)	1,122 %	1,123 %	-	1,089 %	1,130 %	0,958 %	0,642 %
30 (-)	0,968 %	0,929 %	1,044 %	1,021 %	0,929 %	0,906 %	0,522 %
33 (-)	0,775 %	0,768 %	0,861 %	0,821 %	0,768 %	0,700 %	0,421 %
36 (-)	0,708 %	-	0,756 %	0,711 %	0,669 %	0,618 %	0,362 %

Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazan je u tablici 5.25.

Tablica 5.25. Broj sljedova Monte Carlo simulacija za relativnu nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Fazni kut uklopa, α						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
36 (+)	18	24	2	2	9	-	9
33 (+)	5	12	17	12	13	-	11
30 (+)	23	13	17	11	14	27	2
27 (+)	2	14	15	15	24	12	9
24 (+)	2	11	16	6	-	20	10
21 (+)	18	18	26	6	-	20	16
18 (+)	19	9	16	8	-	22	10
15 (+)	2	17	17	24	2	16	10
12 (+)	16	22	5	19	36	26	12
9 (+)	4	16	22	9	30	24	13
6 (+)	17	13	6	8	18	32	13
3 (+)	8	22	18	2	34	21	12
0	17	18	17	2	26	18	10
3 (-)	23	2	20	-	13	10	10
6 (-)	18	21	18	-	17	15	11
9 (-)	22	18	2	-	20	11	2
12 (-)	2	2	20	26	27	4	11
15 (-)	28	21	2	30	28	27	8
18 (-)	16	25	21	24	23	19	7
21 (-)	20	21	9	22	23	23	2
24 (-)	16	2	-	9	31	19	5
27 (-)	23	22	-	2	19	9	8
30 (-)	2	2	13	25	29	15	5
33 (-)	4	24	16	19	3	15	2
36 (-)	18	-	2	25	28	14	9

Mjerna nesigurnost u tablici 5.23., kao i u prethodna dva slučaja, manja je za one kombinacije parametara U_2 i α pri kojima brže dođe do zasićenja jezgre. Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.24. poprima značajno veće iznose za parametar $U_2 = 0$ V te se smanjuje povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka, što je očekivano. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata manje varira nego u prethodnim slučajevima, od dva do 36.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}) prema jednadžbi (5-17), te ista iznosi 19,068 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$) prema jednadžbi (5-18), te ista iznosi 3,114 %. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 2.438, što

znači da je provedeno ukupno 24.380.000 iteracija, odnosno prosječno 14,87 sljedova za jedno mjerenje.

Ulaznoj veličini napona sekundara dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a razdiobe izlaznog signala remanentnog toka imaju oblik normalne razdiobe. Također, kao i u prethodna dva slučaja, veća odstupanja u odnosu na normalnu razdiobu imaju mjerenja s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja odstupanja mjerenja s većim brojem sljedova.

Za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, uspoređene su srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti, te prosječni brojevi sljedova za jedno mjerenje za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara (1 %, 2 % i 3 %), a rezultati su prikazani u tablici 5.26.

Tablica 5.26. Srednje vrijednosti standardne i relativne mjerne nesigurnosti, te prosječni brojevi sljedova za jedno mjerenje za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara.

Relativna nesigurnost napona sekundara	Srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka, u_{SR} (μ Vs)	Srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka, $u_{\%SR}$	Prosječan broj sljedova za jedno mjerenje
1 %	6,354	1,037 %	183,20
2 %	12,705	2,075 %	51,87
3 %	19,068	3,114 %	14,87

Iz rezultata prikazanih u tablici 5.26., vidljivo je kako je trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina linearan. Dakle, linearnim povećanjem mjerne nesigurnosti napona sekundara, očekuje se linearno povećanje mjerne nesigurnosti remanentnog toka. Također, srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka gotovo je jednaka pripadajućoj relativnoj nesigurnosti napona sekundara za ovu metodu. Na kraju, najmanji prosječan broj sljedova Monte Carlo simulacije za jedno mjerenje je pri relativnoj nesigurnosti napona sekundara od 3 %, a najveći pri 1 %.

5.3. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovano uklopom transformatora na niski istosmjerni napon

Prilikom testiranja metode određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovano uklopom transformatora na niski istosmjerni napon opisane u potpoglavlju 3.3. ovoga rada, provedeno je ukupno 25 mjerenja. Za potrebe procjene mjerne nesigurnosti, bit će korištene izmjerene ulazne veličine, odnosno napon sekundara u ovom slučaju, za svih 25 mjerenja. Za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, bit će korištene vrijednosti relativne nesigurnosti napona sekundara od 1 %, 2 % i 3 %, što će rezultirati s ukupno 75 provedenih Monte Carlo simulacija. Programski kod u programskom paketu MATLAB te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada.

Rezultati Monte Carlo simulacije za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 1 % prikazani su u tablici 5.27.

Tablica 5.27. Srednja vrijednost remanentnog toka, standardna i relativna mjerna nesigurnost, te broj sljedova Monte Carlo simulacije za nesigurnost napona sekundara od 1 %.

U_2 (V)	Srednja vrijednost remanentnog toka, Φ_{RS} (mVs)	Mjerna nesigurnost remanentnog toka, $u_{\Phi R}$ (μ Vs)	Relativna mjerna nesigurnost remanentnog toka, $u\%$	Broj sljedova Monte Carlo simulacije, H
36 (+)	3,072	0,730	0,024 %	241
33 (+)	2,760	0,800	0,029 %	290
30 (+)	2,330	0,881	0,038 %	348
27 (+)	1,975	0,951	0,048 %	409
24 (+)	1,569	1,023	0,065 %	3
21 (+)	1,479	1,030	0,070 %	2
18 (+)	1,054	1,092	0,104 %	5
15 (+)	0,751	1,154	0,154 %	2
12 (+)	0,638	1,156	0,181 %	2
9 (+)	0,471	1,177	0,250 %	2
6 (+)	0,288	1,199	0,417 %	10
3 (+)	0,186	1,215	0,655 %	8
0	-0,038	1,247	3,259 %	4
3 (-)	-0,129	1,247	0,969 %	9
6 (-)	-0,288	1,279	0,444 %	9
9 (-)	-0,461	1,294	0,281 %	8
12 (-)	-0,631	1,314	0,208 %	4
15 (-)	-0,764	1,332	0,174 %	9
18 (-)	-1,035	1,362	0,132 %	3
21 (-)	-1,490	1,413	0,095 %	10
24 (-)	-1,534	1,417	0,092 %	11
27 (-)	-1,885	1,459	0,077 %	9
30 (-)	-2,329	1,510	0,065 %	15
33 (-)	-2,764	1,548	0,056 %	17
36 (-)	-3,026	1,607	0,053 %	2

Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.27. ne prelazi iznos od 1 %, osim za parametar $U_2 = 0$ V. Razlog za tu iznimku je relativno mala apsolutna vrijednost srednje vrijednosti remanentnog toka, vrlo bliska nuli, s obzirom da se ta vrijednost nalazi u nazivniku pri računanju relativne mjerne nesigurnosti. Također, mjerna nesigurnost povećava se od parametra $U_2 = 36$ V (+) do $U_2 = 36$ V (-). Naime, prijelazno stanje traje najkraće upravo za parametar $U_2 = 36$ V (+), a najdulje za $U_2 = 36$ V (-), što se vidi na slici 3.24. Relativna mjerna nesigurnost smanjuje se povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega dva do 409.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}):

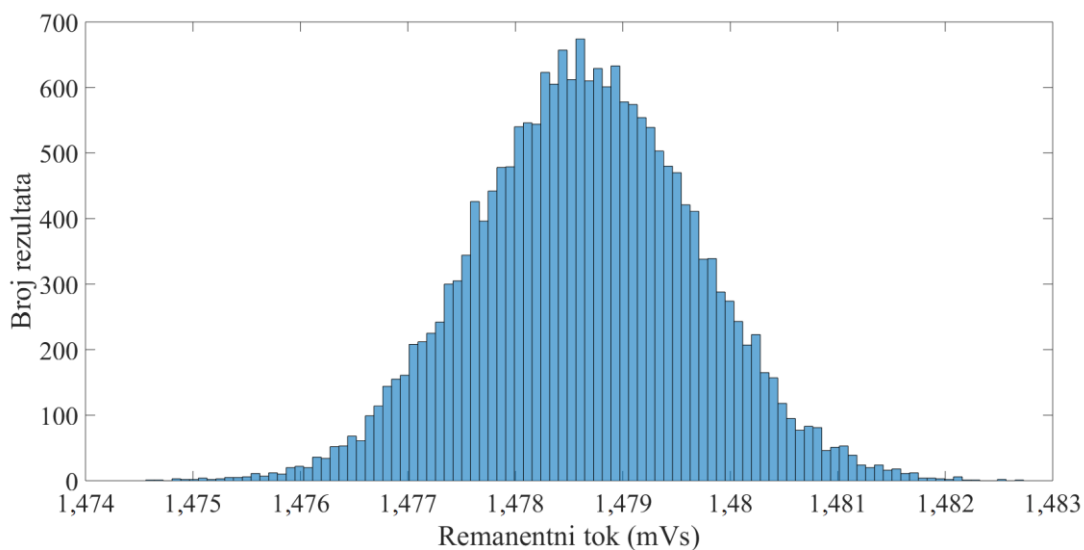
$$u_{SR} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} u_{\Phi Ri} , \quad (5-19)$$

te ista iznosi 1,217 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$):

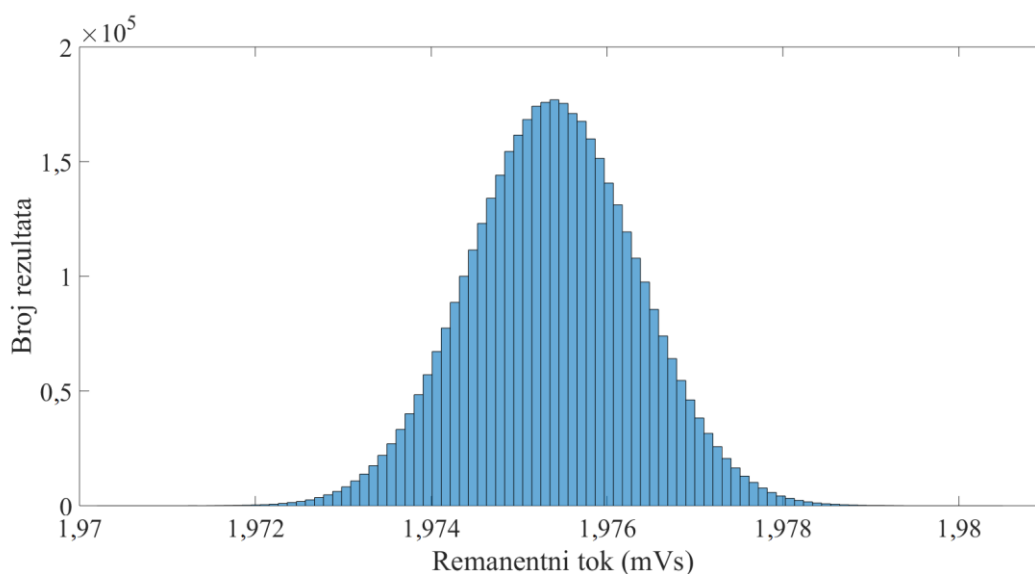
$$u_{\%SR} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} u_{\%i} , \quad (5-20)$$

te ista iznosi 0,195 %. Pri tome nije uzeta u obzir relativna mjerna nesigurnost za parametar $U_2 = 0$ V, s obzirom da je nazivnik u tom slučaju vrlo blizak nuli pa ta vrijednost može značajno utjecati na srednju vrijednost, ali ne zbog iznosa mjerne nesigurnosti, već zbog srednje vrijednosti remanentnog toka koja je vrlo bliska nuli. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 1.432, što znači da je provedeno ukupno 14.320.000 iteracija, odnosno prosječno 57,28 sljedova za jedno mjerenje.

Naponu sekundara kao ulaznoj veličini dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a karakteristične razdiobe remanentnog toka prikazane su na slikama 5.5. i 5.6.



Slika 5.5. Razdioba remanentnog toka za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametar $U_2 = 21 \text{ V (+)}$.



Slika 5.6. Razdioba remanentnog toka za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametar $U_2 = 27 \text{ V (+)}$.

Razdioba rezultata, odnosno remanentnog toka za parametar $U_2 = 21 \text{ V (+)}$ na slici 5.5. ima oblik normalne razdiobe, ali uz veća odstupanja u odnosu na razdiobu za $U_2 = 27 \text{ V (+)}$ na slici 5.6. Naime, ova dva slučaja karakteristična su po tome što je za parametar $U_2 = 21 \text{ V (+)}$ provedeno dva slijeda Monte Carlo simulacija, odnosno 20.000 iteracija, a za $U_2 = 27 \text{ V (+)}$ 409 sljedova, odnosno 4.090.000 iteracija. Naravno, za oba slučaja, kao i za sve ostale, zadovoljen je

stabilizacijski kriterij prema [70]. Dakle, što je više provedenih iteracija, razdioba rezultata približava se normalnoj, odnosno u ovom slučaju onoj koja je zadana za ulaznu veličinu.

Rezultati Monte Carlo simulacije za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 2 % prikazani su u tablici 5.28.

Tablica 5.28. Srednja vrijednost remanentnog toka, standardna i relativna mjerna nesigurnost, te broj sljedova Monte Carlo simulacije za nesigurnost napona sekundara od 2 %.

U_2 (V)	Srednja vrijednost remanentnog toka, Φ_{RS} (mVs)	Mjerna nesigurnost remanentnog toka, $u_{\Phi R}$ (μ Vs)	Relativna mjerna nesigurnost remanentnog toka, $u\%$	Broj sljedova Monte Carlo simulacije, H
36 (+)	3,071	1,469	0,048 %	4
33 (+)	2,760	1,590	0,058 %	12
30 (+)	2,330	1,762	0,076 %	8
27 (+)	1,975	1,898	0,096 %	22
24 (+)	1,568	2,044	0,130 %	20
21 (+)	1,478	2,060	0,139 %	23
18 (+)	1,054	2,189	0,208 %	14
15 (+)	0,750	2,278	0,304 %	24
12 (+)	0,638	2,312	0,362 %	4
9 (+)	0,471	2,352	0,499 %	21
6 (+)	0,288	2,401	0,835 %	26
3 (+)	0,185	2,434	1,312 %	30
0	-0,038	2,454	6,393 %	2
3 (-)	-0,129	2,507	1,945 %	30
6 (-)	-0,288	2,549	0,884 %	28
9 (-)	-0,461	2,596	0,563 %	25
12 (-)	-0,631	2,631	0,417 %	35
15 (-)	-0,764	2,656	0,348 %	38
18 (-)	-1,035	2,721	0,263 %	44
21 (-)	-1,490	2,828	0,190 %	33
24 (-)	-1,534	2,832	0,185 %	44
27 (-)	-1,885	2,917	0,155 %	35
30 (-)	-2,329	3,021	0,130 %	46
33 (-)	-2,764	3,102	0,112 %	47
36 (-)	-3,026	3,224	0,107 %	60

Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.28. ne prelazi iznos od 1 %, osim za parametre $U_2 = 3$ V (-), $U_2 = 0$ V i $U_2 = 3$ V (+). Također, kao i u prethodnom slučaju, mjerna nesigurnost povećava se od parametra $U_2 = 36$ V (+) do $U_2 = 36$ V (-). Relativna mjerna nesigurnost smanjuje se povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka. Nadalje, broj sljedova

Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata manje varira u usporedbi s prethodnim slučajem, od dva do 60.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}) prema jednadžbi (5-19), te ista iznosi 2,433 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$) prema jednadžbi (5-20), te ista iznosi 0,390 %. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 675, što znači da je provedeno ukupno 6.750.000 iteracija, odnosno prosječno 27,00 sljedova za jedno mjerenje.

Ulaznoj veličini napona sekundara dodijeljena je standardizirana (jedinичna) normalna razdioba, a razdiobe izlaznog signala remanentnog toka imaju oblik normalne razdiobe. Također, kao i u prethodnom slučaju, veća odstupanja u odnosu na normalnu razdiobu imaju mjerenja s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja odstupanja mjerenja s većim brojem sljedova.

Rezultati Monte Carlo simulacije za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara od 3 % prikazani su u tablici 5.29.

Tablica 5.29. Srednja vrijednost remanentnog toka, standardna i relativna mjerna nesigurnost, te broj sljedova Monte Carlo simulacije za nesigurnost napona sekundara od 3 %.

U_2 (V)	Srednja vrijednost remanentnog toka, Φ_{RS} (mVs)	Mjerna nesigurnost remanentnog toka, $u_{\Phi R}$ (μ Vs)	Relativna mjerna nesigurnost remanentnog toka, $u\%$	Broj sljedova Monte Carlo simulacije, H
36 (+)	3,071	2,198	0,072 %	18
33 (+)	2,760	2,404	0,087 %	31
30 (+)	2,330	2,642	0,113 %	36
27 (+)	1,975	2,851	0,144 %	43
24 (+)	1,568	3,066	0,196 %	12
21 (+)	1,478	3,090	0,209 %	26
18 (+)	1,054	3,279	0,311 %	55
15 (+)	0,750	3,420	0,456 %	51
12 (+)	0,638	3,454	0,541 %	61
9 (+)	0,471	3,531	0,749 %	60
6 (+)	0,288	3,600	1,252 %	71
3 (+)	0,185	3,651	1,971 %	77
0	-0,039	3,727	9,657 %	73
3 (-)	-0,129	3,754	2,908 %	70
6 (-)	-0,289	3,828	1,327 %	60
9 (-)	-0,461	3,888	0,843 %	72
12 (-)	-0,631	3,949	0,625 %	65
15 (-)	-0,764	3,990	0,522 %	71
18 (-)	-1,035	4,083	0,394 %	82
21 (-)	-1,490	4,244	0,285 %	84
24 (-)	-1,535	4,249	0,277 %	64
27 (-)	-1,885	4,382	0,232 %	102
30 (-)	-2,329	4,528	0,194 %	81
33 (-)	-2,764	4,652	0,168 %	126
36 (-)	-3,026	4,830	0,160 %	112

Relativna mjerna nesigurnost ($u\%$) u tablici 5.29. prelazi iznos od 1 %, za razliku od prethodna dva slučaja, i za parametre $U_2 = 6$ V (-) i $U_2 = 6$ V (+). Također, kao i u prethodna dva slučaja, mjerna nesigurnost povećava se od parametra $U_2 = 36$ V (+) do $U_2 = 36$ V (-), a relativna mjerna nesigurnost smanjuje povećanjem apsolutne srednje vrijednosti remanentnog toka. Nadalje, broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata kreće se od 12 do 126.

Za potrebe usporedbe metoda i određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara, izračunata je srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka (u_{SR}) prema jednadžbi (5-19), te ista iznosi 3,652 μ Vs. Također, izračunata je i srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka ($u_{\%S}$) prema jednadžbi (5-20),

te ista iznosi 0,585 %. Ukupan broj sljedova Monte Carlo simulacije iznosi 1.603, što znači da je provedeno ukupno 16.030.000 iteracija, odnosno prosječno 64,12 sljedova za jedno mjerenje.

Ulaznoj veličini napona sekundara dodijeljena je standardizirana (jedinичna) normalna razdioba, a razdiobe izlaznog signala remanentnog toka imaju oblik normalne razdiobe. Također, kao i u prethodna dva slučaja, veća odstupanja u odnosu na normalnu razdiobu imaju mjerenja s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja odstupanja mjerenja s većim brojem sljedova.

Za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, uspoređene su vrijednosti mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara (1 %, 2 % i 3 %), a rezultati su prikazani u tablici 5.30.

Tablica 5.30. Standardna i relativna mjerna nesigurnost za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara.

U_2 (V)	Mjerna nesigurnost remanentnog toka za 1 %, $u_{\Phi R}$ (μ Vs)	Relativna mjerna nesigurnost remanentnog toka za 1 %, $u_{\%}$	Mjerna nesigurnost remanentnog toka za 2 %, $u_{\Phi R}$ (μ Vs)	Relativna mjerna nesigurnost remanentnog toka za 2 %, $u_{\%}$	Mjerna nesigurnost remanentnog toka za 3 %, $u_{\Phi R}$ (μ Vs)	Relativna mjerna nesigurnost remanentnog toka za 3 %, $u_{\%}$
36 (+)	0,730	0,024 %	1,469	0,048 %	2,198	0,072 %
33 (+)	0,800	0,029 %	1,590	0,058 %	2,404	0,087 %
30 (+)	0,881	0,038 %	1,762	0,076 %	2,642	0,113 %
27 (+)	0,951	0,048 %	1,898	0,096 %	2,851	0,144 %
24 (+)	1,023	0,065 %	2,044	0,130 %	3,066	0,196 %
21 (+)	1,030	0,070 %	2,060	0,139 %	3,090	0,209 %
18 (+)	1,092	0,104 %	2,189	0,208 %	3,279	0,311 %
15 (+)	1,154	0,154 %	2,278	0,304 %	3,420	0,456 %
12 (+)	1,156	0,181 %	2,312	0,362 %	3,454	0,541 %
9 (+)	1,177	0,250 %	2,352	0,499 %	3,531	0,749 %
6 (+)	1,199	0,417 %	2,401	0,835 %	3,600	1,252 %
3 (+)	1,215	0,655 %	2,434	1,312 %	3,651	1,971 %
0	1,247	3,259 %	2,454	6,393 %	3,727	9,657 %
3 (-)	1,247	0,969 %	2,507	1,945 %	3,754	2,908 %
6 (-)	1,279	0,444 %	2,549	0,884 %	3,828	1,327 %
9 (-)	1,294	0,281 %	2,596	0,563 %	3,888	0,843 %
12 (-)	1,314	0,208 %	2,631	0,417 %	3,949	0,625 %
15 (-)	1,332	0,174 %	2,656	0,348 %	3,990	0,522 %
18 (-)	1,362	0,132 %	2,721	0,263 %	4,083	0,394 %
21 (-)	1,413	0,095 %	2,828	0,190 %	4,244	0,285 %
24 (-)	1,417	0,092 %	2,832	0,185 %	4,249	0,277 %
27 (-)	1,459	0,077 %	2,917	0,155 %	4,382	0,232 %
30 (-)	1,510	0,065 %	3,021	0,130 %	4,528	0,194 %
33 (-)	1,548	0,056 %	3,102	0,112 %	4,652	0,168 %
36 (-)	1,607	0,053 %	3,224	0,107 %	4,830	0,160 %

Također, za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, uspoređene su i srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti i relativne mjerne nesigurnosti za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara (1 %, 2 % i 3 %), a rezultati su prikazani u tablici 5.31. Dodatno, uspoređeni su i prosječni brojevi sljedova za jedno mjerenje za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara te prikazani u tablici 5.31.

Tablica 5.31. Srednje vrijednosti standardne i relativne mjerne nesigurnosti, te prosječni brojevi sljedova za jedno mjerenje za sva tri slučaja relativne nesigurnosti napona sekundara.

Relativna nesigurnost napona sekundara	Srednja vrijednost mjerne nesigurnosti remanentnog toka, u_{SR} (μ Vs)	Srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka, $u_{\%SR}$	Prosječan broj sljedova za jedno mjerenje
1 %	1,217	0,195 %	57,28
2 %	2,433	0,390 %	27,00
3 %	3,652	0,585 %	64,12

Iz rezultata prikazanih u tablicama 5.30. i 5.31., vidljivo je kako je trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina linearan. Dakle, linearnim povećanjem mjerne nesigurnosti napona sekundara, očekuje se linearno povećanje mjerne nesigurnosti remanentnog toka. Također, srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti remanentnog toka oko pet puta je manja od pripadajuće relativne nesigurnosti napona sekundara za ovu metodu. Na kraju, najmanji prosječan broj sljedova Monte Carlo simulacije za jedno mjerenje je pri relativnoj nesigurnosti napona sekundara od 2 %, a najveći pri 3 %.

5.4. Procjena propagacije mjerne nesigurnosti mjerenih veličina za metodu određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze

Prilikom testiranja metode određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze u četvrtom poglavlju ovoga rada, provedeno je ukupno 75 mjerenja. Za potrebe procjene mjerne nesigurnosti, bit će korištene izmjerene ulazne veličine, odnosno napon sekundara i struja primara u ovom slučaju, za svih 75 mjerenja. Za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, bit će korištena tri para istih relativnih mjernih nesigurnosti napona sekundara i struje primara od 1 %, 2 % i 3 %, što će rezultirati s ukupno 225 provedenih Monte Carlo simulacija. Programski kod u programskom paketu MATLAB te pripadajući snimljeni valni oblici nalaze se u prilogu ovoga rada. Za razliku od prethodne tri metode u kojima je izlazna veličina bio remanentni tok, u ovoj metodi je to parametar W_Q . Naime, kao što je opisano u četvrtom poglavlju ovoga rada, remanentni tok očitava se iz funkcije ovisnosti o parametru W_Q .

Rezultati Monte Carlo simulacije za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara i struje primara od 1 % prikazani su u tablicama 5.32. i 5.33.

Tablica 5.32. Srednja vrijednost parametra W_Q i broj sljedova Monte Carlo simulacije za nesigurnost napona sekundara i struje primara od 1 %.

	Srednja vrijednost parametra W_Q (μJ)			Broj sljedova, H		
U_2 (V)	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$
36 (+)	814,5	1577,4	2718,0	33	144	4
33 (+)	534,3	951,3	1743,6	10	37	246
30 (+)	393,0	758,7	1329,5	300	2	100
27 (+)	327,4	627,3	1165,5	162	18	79
24 (+)	291,6	564,8	1034,0	170	11	70
21 (+)	256,2	499,2	913,2	103	3	44
18 (+)	215,6	435,1	806,4	66	425	30
15 (+)	206,9	395,3	778,4	103	398	30
12 (+)	194,3	393,7	712,0	48	305	21
9 (+)	193,3	383,2	719,1	50	312	21
6 (+)	191,6	382,8	712,8	49	261	27
3 (+)	195,6	383,2	716,5	48	329	19
0	-196,2	-393,2	-712,2	2	241	25
3 (-)	-209,2	-391,4	-718,6	2	248	14
6 (-)	-214,8	-396,5	-730,1	17	243	12
9 (-)	-222,3	-395,5	-742,6	2	239	11
12 (-)	-232,7	-393,7	-739,3	21	205	2
15 (-)	-232,5	-420,0	-759,9	31	213	23
18 (-)	-250,6	-466,1	-794,8	21	267	10
21 (-)	-260,9	-481,4	-850,3	30	351	22
24 (-)	-279,4	-545,2	-928,3	61	386	32
27 (-)	-302,1	-631,9	-1047,9	110	3	29
30 (-)	-423,4	-713,6	-1209,6	54	2	44
33 (-)	-530,2	-952,9	-1501,7	100	12	57
36 (-)	-770,9	-1362,3	-2038,0	176	21	99

Broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega dva do 425. Ukupan broj sljedova za parametre $E = 1 \text{ V}$ i $T = 20 \text{ ms}$ iznosi 1.769, za $E = 4 \text{ V}$ i $T = 5 \text{ ms}$ iznosi 4.676, te za $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$ iznosi 1.071. Pri tome, prosječan broj sljedova za jedno mjerenje za parametre $E = 1 \text{ V}$ i $T = 20 \text{ ms}$ iznosi 70,76, za $E = 4 \text{ V}$ i $T = 5 \text{ ms}$ iznosi 187,04, te za $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$ iznosi 42,84.

Tablica 5.33. Mjerna nesigurnost i relativna mjerna nesigurnost parametra W_Q za nesigurnost napona sekundara i struje primara od 1 %.

	Mjerna nesigurnost parametra W_Q , u_{WQ} (μJ)			Relativna mjerna nesigurnost parametra W_Q , $u_{WQ}\%$		
	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$
U_2 (V)						
36 (+)	1,663	3,911	9,348	0,204 %	0,248 %	0,344 %
33 (+)	0,836	1,949	4,951	0,157 %	0,205 %	0,284 %
30 (+)	0,527	1,365	3,377	0,134 %	0,180 %	0,254 %
27 (+)	0,416	1,058	2,778	0,127 %	0,169 %	0,238 %
24 (+)	0,401	0,949	2,428	0,138 %	0,168 %	0,235 %
21 (+)	0,321	0,801	2,084	0,125 %	0,160 %	0,228 %
18 (+)	0,270	0,638	1,771	0,125 %	0,147 %	0,220 %
15 (+)	0,308	0,609	1,685	0,149 %	0,154 %	0,216 %
12 (+)	0,224	0,542	1,480	0,115 %	0,138 %	0,208 %
9 (+)	0,223	0,546	1,533	0,116 %	0,142 %	0,213 %
6 (+)	0,222	0,560	1,521	0,116 %	0,146 %	0,213 %
3 (+)	0,211	0,552	1,459	0,108 %	0,144 %	0,204 %
0	0,177	0,488	1,294	0,090 %	0,124 %	0,182 %
3 (-)	0,146	0,474	1,242	0,070 %	0,121 %	0,173 %
6 (-)	0,137	0,463	1,219	0,064 %	0,117 %	0,167 %
9 (-)	0,151	0,449	1,228	0,068 %	0,113 %	0,165 %
12 (-)	0,145	0,466	1,219	0,062 %	0,118 %	0,165 %
15 (-)	0,178	0,461	1,227	0,077 %	0,110 %	0,161 %
18 (-)	0,169	0,512	1,408	0,068 %	0,110 %	0,177 %
21 (-)	0,189	0,592	1,517	0,072 %	0,123 %	0,178 %
24 (-)	0,232	0,595	1,627	0,083 %	0,109 %	0,175 %
27 (-)	0,309	0,698	1,794	0,102 %	0,110 %	0,171 %
30 (-)	0,238	0,775	1,925	0,056 %	0,109 %	0,159 %
33 (-)	0,298	0,961	2,405	0,056 %	0,101 %	0,160 %
36 (-)	0,439	1,407	3,300	0,057 %	0,103 %	0,162 %

Mjerna nesigurnost u tablici 5.33. povećava se s povećanjem apsolutne vrijednosti parametra W_Q za sve parove parametara E i T . Za potrebe određivanja trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara i struje primara, izračunate su srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti parametra W_Q (u_{SR}):

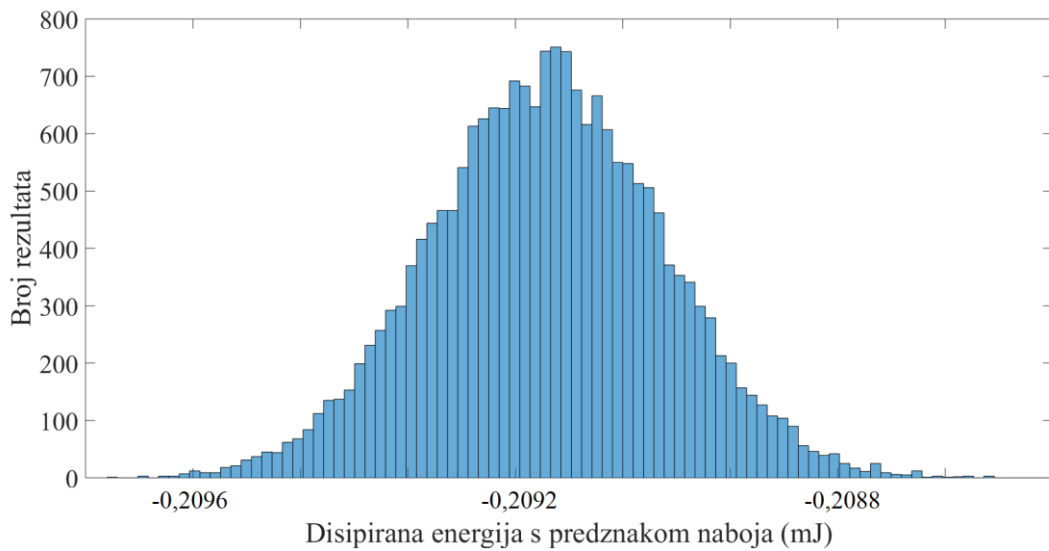
$$u_{SR} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} u_{WQi} , \quad (5-21)$$

kao i srednje vrijednosti relativne mjerne nesigurnosti parametra W_Q ($u_{\%S}$):

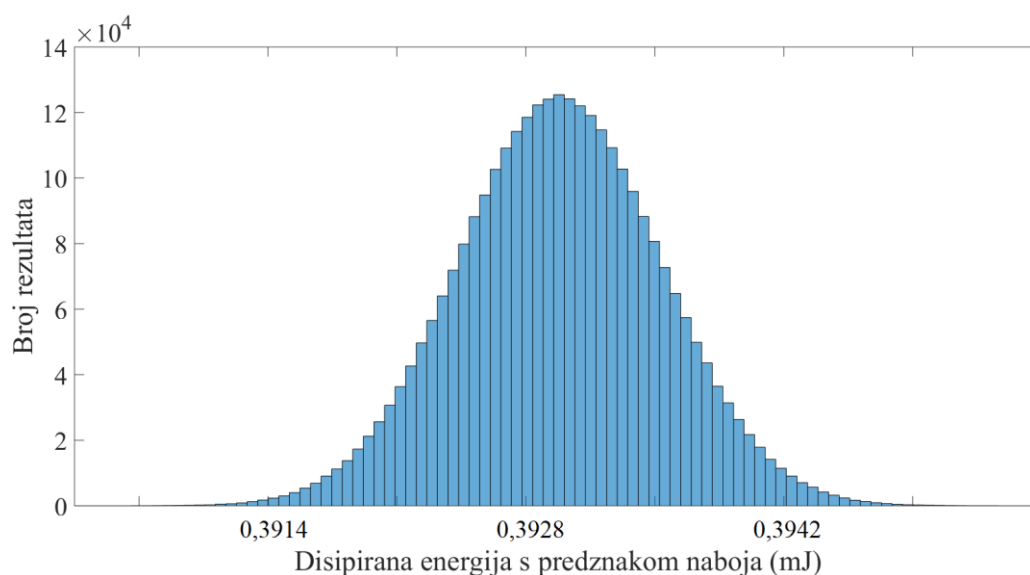
$$u_{\%SR} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} u_{WQ\%i} , \quad (5-22)$$

za sve parove parametara E i T . Rezultati su prikazani u tablici 5.38. za sva tri para relativnih mjernih nesigurnosti napona sekundara i struje primara.

Naponu sekundara i struji primara kao ulaznim veličinama dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba, a karakteristične razdiobe parametra W_Q prikazane su na slikama 5.7. i 5.8.



Slika 5.7. Razdioba parametra W_Q za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametre $E = 1$ V, $T = 20$ ms i $U_2 = 3$ V (-).



Slika 5.8. Razdioba parametra W_Q za nesigurnost napona sekundara od 1 % i parametre $E = 1$ V, $T = 20$ ms i $U_2 = 30$ V (+).

Razdioba rezultata, odnosno parametra W_Q za parametre $E = 1$ V, $T = 20$ ms i $U_2 = 3$ V (–) na slici 5.7. ima oblik normalne razdiobe, ali uz veća odstupanja u odnosu na razdiobu za $E = 1$ V, $T = 20$ ms i $U_2 = 30$ V (+) na slici 5.8. Naime, ova dva slučaja karakteristična su po tome što je za prvi (prikazan na slici 5.7.) provedeno dva slijeda Monte Carlo simulacija, odnosno 20.000 iteracija, a za drugi (prikazan na slici 5.8.) 300 sljedova, odnosno 3.000.000 iteracija. Naravno, za oba slučaja, kao i za sve ostale, zadovoljen je stabilizacijski kriterij prema [70]. Dakle, što je više provedenih iteracija, razdioba rezultata približava se normalnoj, odnosno u ovom slučaju onoj koja je zadana za ulazne veličine.

Rezultati Monte Carlo simulacije za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara i struje primara od 2 % prikazani su u tablicama 5.34. i 5.35.

Tablica 5.34. Srednja vrijednost parametra W_Q i broj sljedova Monte Carlo simulacije za nesigurnost napona sekundara i struje primara od 2 %.

U_2 (V)	Srednja vrijednost parametra W_Q (μ J)			Broj sljedova, H		
	$E = 1$ V, $T = 20$ ms	$E = 4$ V, $T = 5$ ms	$E = 10$ V, $T = 2$ ms	$E = 1$ V, $T = 20$ ms	$E = 4$ V, $T = 5$ ms	$E = 10$ V, $T = 2$ ms
36 (+)	814,5	1577,4	2718,1	116	2	18
33 (+)	534,3	951,3	1743,7	39	128	9
30 (+)	393,0	758,7	1329,5	11	63	8
27 (+)	327,4	627,2	1165,5	9	40	309
24 (+)	291,6	564,8	1034,0	11	45	230
21 (+)	256,2	499,2	913,2	432	39	207
18 (+)	215,6	435,1	806,4	299	25	124
15 (+)	206,9	395,3	778,4	427	25	118
12 (+)	194,3	393,7	712,0	202	20	88
9 (+)	193,3	383,2	719,1	173	9	98
6 (+)	191,6	382,8	712,8	189	15	106
3 (+)	195,6	383,2	716,5	197	2	83
0	-196,2	-393,2	-712,2	128	6	81
3 (-)	-209,2	-391,4	-718,6	91	8	69
6 (-)	-214,8	-396,5	-730,1	79	2	67
9 (-)	-222,3	-395,5	-742,6	2	6	75
12 (-)	-232,7	-393,7	-739,3	99	13	49
15 (-)	-232,5	-420,0	-759,9	134	2	77
18 (-)	-250,6	-466,1	-794,8	132	20	60
21 (-)	-260,9	-481,4	-850,3	164	9	97
24 (-)	-279,4	-545,2	-928,3	192	19	100
27 (-)	-302,1	-631,9	-1047,9	438	21	121
30 (-)	-423,4	-713,6	-1209,6	221	19	142
33 (-)	-530,2	-952,9	-1501,7	384	34	240
36 (-)	-770,9	-1362,3	-2038,0	10	94	460

Broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega dva do 460. Ukupan broj sljedova za parametre $E = 1$ V i $T = 20$ ms iznosi 4.179, za $E = 4$ V i $T = 5$ ms iznosi 666, te za $E = 10$ V i $T = 2$ ms iznosi 3.036. Pri tome, prosječan broj sljedova za jedno mjerenje za parametre $E = 1$ V i $T = 20$ ms iznosi 167,16, za $E = 4$ V i $T = 5$ ms iznosi 26,64, te za $E = 10$ V i $T = 2$ ms iznosi 121,44.

Tablica 5.35. Mjerna nesigurnost i relativna mjerna nesigurnost parametra W_Q za nesigurnost napona sekundara i struje primara od 2 %.

	Mjerna nesigurnost parametra W_Q , u_{WQ} (μJ)			Relativna mjerna nesigurnost parametra W_Q , $u_{WQ}\%$		
	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$
U_2 (V)						
36 (+)	3,327	7,778	18,837	0,409 %	0,493 %	0,693 %
33 (+)	1,669	3,907	9,919	0,312 %	0,411 %	0,569 %
30 (+)	1,058	2,728	6,755	0,269 %	0,360 %	0,508 %
27 (+)	0,833	2,119	5,563	0,254 %	0,338 %	0,477 %
24 (+)	0,803	1,904	4,849	0,275 %	0,337 %	0,469 %
21 (+)	0,642	1,608	4,165	0,251 %	0,322 %	0,456 %
18 (+)	0,541	1,275	3,550	0,251 %	0,293 %	0,440 %
15 (+)	0,616	1,218	3,368	0,298 %	0,308 %	0,433 %
12 (+)	0,448	1,083	2,966	0,230 %	0,275 %	0,417 %
9 (+)	0,447	1,090	3,066	0,231 %	0,284 %	0,426 %
6 (+)	0,444	1,123	3,042	0,231 %	0,293 %	0,427 %
3 (+)	0,423	1,097	2,918	0,216 %	0,286 %	0,407 %
0	0,356	0,977	2,596	0,182 %	0,249 %	0,364 %
3 (-)	0,291	0,946	2,486	0,139 %	0,242 %	0,346 %
6 (-)	0,274	0,930	2,442	0,128 %	0,235 %	0,335 %
9 (-)	0,299	0,900	2,458	0,135 %	0,228 %	0,331 %
12 (-)	0,290	0,934	2,432	0,125 %	0,237 %	0,329 %
15 (-)	0,357	0,920	2,456	0,154 %	0,219 %	0,323 %
18 (-)	0,338	1,026	2,818	0,135 %	0,220 %	0,355 %
21 (-)	0,377	1,182	3,036	0,144 %	0,246 %	0,357 %
24 (-)	0,464	1,191	3,253	0,166 %	0,218 %	0,350 %
27 (-)	0,618	1,392	3,586	0,205 %	0,220 %	0,342 %
30 (-)	0,476	1,558	3,858	0,113 %	0,218 %	0,319 %
33 (-)	0,596	1,920	4,813	0,112 %	0,201 %	0,320 %
36 (-)	0,877	2,818	6,599	0,114 %	0,207 %	0,324 %

Mjerna nesigurnost u tablici 5.35. povećava se s povećanjem apsolutne vrijednosti parametra W_Q za sve parove parametara E i T . Kao i u prethodnom slučaju, ulaznim veličinama napona sekundara i struje primara dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba pa razdiobe parametra W_Q također imaju oblik normalne razdiobe uz veća odstupanja pri mjerenjima s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja pri mjerenjima s većim brojem sljedova.

Rezultati Monte Carlo simulacije za relativnu nesigurnost izmjerenog napona sekundara i struje primara od 3 % prikazani su u tablicama 5.36. i 5.37.

Tablica 5.36. Srednja vrijednost parametra W_Q i broj sljedova Monte Carlo simulacije za nesigurnost napona sekundara i struje primara od 3 %.

U_2 (V)	Srednja vrijednost parametra W_Q (μ J)			Broj sljedova, H		
	$E = 1$ V, $T = 20$ ms	$E = 4$ V, $T = 5$ ms	$E = 10$ V, $T = 2$ ms	$E = 1$ V, $T = 20$ ms	$E = 4$ V, $T = 5$ ms	$E = 10$ V, $T = 2$ ms
36 (+)	814,5	1577,4	2718,1	252	11	84
33 (+)	534,3	951,3	1743,6	66	340	22
30 (+)	393,0	758,7	1329,5	26	161	17
27 (+)	327,4	627,2	1165,5	3	90	3
24 (+)	291,6	564,8	1033,9	2	88	7
21 (+)	256,2	499,2	913,2	17	72	323
18 (+)	215,6	435,1	806,4	9	42	263
15 (+)	206,9	395,3	778,4	4	27	258
12 (+)	194,3	393,7	712,0	30	22	231
9 (+)	193,3	383,2	719,1	426	13	207
6 (+)	191,6	382,8	712,8	477	42	222
3 (+)	195,6	383,2	716,5	433	32	205
0	-196,2	-393,2	-712,2	249	26	159
3 (-)	-209,2	-391,4	-718,6	184	21	138
6 (-)	-214,8	-396,5	-730,1	142	20	131
9 (-)	-222,3	-395,5	-742,6	166	18	161
12 (-)	-232,7	-393,7	-739,3	194	14	138
15 (-)	-232,5	-420,0	-759,9	282	22	129
18 (-)	-250,6	-466,1	-794,8	225	16	187
21 (-)	-260,9	-481,4	-850,3	331	28	203
24 (-)	-279,4	-545,2	-928,3	7	40	238
27 (-)	-302,1	-631,9	-1047,9	7	68	295
30 (-)	-423,4	-713,6	-1209,6	2	50	372
33 (-)	-530,2	-952,9	-1501,7	5	104	10
36 (-)	-770,9	-1362,3	-2038,0	27	192	3

Broj sljedova Monte Carlo simulacije (H) potrebnih za stabilizaciju rezultata značajno varira, i to od svega dva do 477. Ukupan broj sljedova za parametre $E = 1$ V i $T = 20$ ms iznosi 3.566, za $E = 4$ V i $T = 5$ ms iznosi 1.559, te za $E = 10$ V i $T = 2$ ms iznosi 4.006. Pri tome, prosječan broj sljedova za jedno mjerenje za parametre $E = 1$ V i $T = 20$ ms iznosi 142,64, za $E = 4$ V i $T = 5$ ms iznosi 62,36, te za $E = 10$ V i $T = 2$ ms iznosi 160,24.

Tablica 5.37. Mjerna nesigurnost i relativna mjerna nesigurnost parametra W_Q za nesigurnost napona sekundara i struje primara od 3 %.

	Mjerna nesigurnost parametra W_Q , u_{WQ} (μJ)			Relativna mjerna nesigurnost parametra W_Q , $u_{WQ}\%$		
	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$	$E = 1 \text{ V},$ $T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V},$ $T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V},$ $T = 2 \text{ ms}$
U_2 (V)						
36 (+)	4,987	11,753	28,272	0,612 %	0,745 %	1,040 %
33 (+)	2,501	5,863	14,852	0,468 %	0,616 %	0,852 %
30 (+)	1,583	4,103	10,140	0,403 %	0,541 %	0,763 %
27 (+)	1,249	3,178	8,313	0,382 %	0,507 %	0,713 %
24 (+)	1,195	2,857	7,279	0,410 %	0,506 %	0,704 %
21 (+)	0,962	2,413	6,252	0,376 %	0,483 %	0,685 %
18 (+)	0,811	1,914	5,326	0,376 %	0,440 %	0,661 %
15 (+)	0,928	1,825	5,057	0,449 %	0,462 %	0,650 %
12 (+)	0,672	1,623	4,450	0,346 %	0,412 %	0,625 %
9 (+)	0,670	1,635	4,604	0,347 %	0,427 %	0,640 %
6 (+)	0,666	1,676	4,566	0,348 %	0,438 %	0,640 %
3 (+)	0,634	1,658	4,380	0,324 %	0,433 %	0,611 %
0	0,534	1,462	3,892	0,272 %	0,372 %	0,546 %
3 (-)	0,437	1,424	3,726	0,209 %	0,364 %	0,518 %
6 (-)	0,412	1,391	3,666	0,192 %	0,351 %	0,502 %
9 (-)	0,452	1,344	3,684	0,203 %	0,340 %	0,496 %
12 (-)	0,435	1,404	3,649	0,187 %	0,357 %	0,494 %
15 (-)	0,535	1,383	3,680	0,230 %	0,329 %	0,484 %
18 (-)	0,507	1,533	4,220	0,202 %	0,329 %	0,531 %
21 (-)	0,566	1,776	4,547	0,217 %	0,369 %	0,535 %
24 (-)	0,697	1,786	4,889	0,250 %	0,328 %	0,527 %
27 (-)	0,924	2,092	5,385	0,306 %	0,331 %	0,514 %
30 (-)	0,710	2,338	5,791	0,168 %	0,328 %	0,479 %
33 (-)	0,894	2,877	7,220	0,169 %	0,302 %	0,481 %
36 (-)	1,318	4,226	9,988	0,171 %	0,310 %	0,490 %

Mjerna nesigurnost u tablici 5.37. povećava se s povećanjem apsolutne vrijednosti parametra W_Q za sve parove parametara E i T . Kao i u prethodna dva slučaja, ulaznim veličinama napona sekundara i struje primara dodijeljena je standardizirana (jedinična) normalna razdioba pa razdiobe parametra W_Q također imaju oblik normalne razdiobe uz veća odstupanja pri mjerenjima s manjim brojem sljedova Monte Carlo simulacije, a manja pri mjerenjima s većim brojem sljedova.

Također, za određivanje trenda propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina, uspoređene su i srednje vrijednosti mjerne nesigurnosti i relativne mjerne

nesigurnosti izračunate prema jednadžbama (5-21) i (5-22) za sva tri slučaja relativne nesigurnosti ulaznih veličina (1 %, 2 % i 3 %), a rezultati su prikazani u tablici 5.38.

Tablica 5.38. 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 $W_Q, u_{SR} (\mu J)$			Srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti parametra $W_Q, u_{\%SR}$		
	$E = 1 \text{ V}, T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V}, T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$	$E = 1 \text{ V}, T = 20 \text{ ms}$	$E = 4 \text{ V}, T = 5 \text{ ms}$	$E = 10 \text{ V}, T = 2 \text{ ms}$
1 %	0,337	0,873	2,233	0,102 %	0,139 %	0,202 %
2 %	0,675	1,745	4,473	0,203 %	0,278 %	0,405 %
3 %	1,011	2,621	6,713	0,305 %	0,417 %	0,607 %

Trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina linearan je za sve parove parametara E i T . Dakle, linearnim povećanjem mjerne nesigurnosti napona sekundara i struje primara, očekuje se linearno povećanje mjerne nesigurnosti parametra W_Q . Nadalje, najmanja srednja vrijednost relativne mjerne nesigurnosti parametra W_Q pojavljuje se za parametre $E = 1 \text{ V}$ i $T = 20 \text{ ms}$, a najveća za parametre $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$. Za parametre $E = 1 \text{ V}$ i $T = 20 \text{ ms}$, mjerna nesigurnost parametra W_Q je približno deset puta manja od nesigurnosti ulaznih veličina, dok je za parametre $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$ približno pet puta manja. Dakle, iz aspekta propagacije mjerne nesigurnosti, povoljniji je slučaj pri nižem naponu E i duljem periodu T .

6. ZAKLJUČAK

Remanentni tok u magnetskoj jezgri može stvarati značajne probleme u radu elektroenergetskog sustava ako njegova vrijednost nije poznata, posebice pri uklopu neopterećenog transformatora ili zavojnice na nazivni napon. U većini slučajeva u praksi nemoguće ga je izravno mjeriti s obzirom da je zatvoren unutar magnetske jezgre pa postoje metode koje ga neizravno određuju, od kojih najčešće korištena integrira napon jednog od namota prilikom isklopa transformatora te na taj način određuje remanentni tok. Međutim, ova metoda ima značajan nedostatak – temelji se na pretpostavci kako se vrijednost remanentnog toka u jezgri neće mijenjati od trenutka isklopa do trenutka sljedećeg uklopa transformatora. Također, postoji još nekoliko metoda određivanja remanentnog toka koje se rjeđe koriste, a u praksi je važan i postupak demagnetiziranja kojim se ne određuje remanentni tok, već poništava, odnosno postavlja u nultu vrijednost. Dakle, postoji potreba za razvojem metoda koje će moći odgovoriti na dva izazova, od kojih je prvi pouzdano i precizno odrediti remanentni tok na kraju razdoblja neuklopljenosti transformatora ili zavojnice kako bi se mogla istražiti ovisnost remanentnog toka o vremenu te vanjskim utjecajima. Drugi izazov je odrediti remanentni tok uz očuvanje vrijednosti, odnosno ispunjavanje uvjeta da njegova vrijednost ne bude promijenjena nakon provođenja mjernog postupka. U ovom radu izrađen je laboratorijski sustav za implementaciju i ispitivanje metoda za određivanje remanentnog toka kojim se može postaviti željena vrijednost remanentnog toka u magnetskoj jezgri te provesti mjerni postupak za sve novorazvijene metode.

Metoda određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon, predstavljena u potpoglavlju 3.1. ovoga rada, može precizno i pouzdano odrediti remanentni tok bez podataka o prethodnim stanjima i parametrima transformatora, provodeći samo mjerenje napona neopterećenog sekundara transformatora. Ova metoda može se koristiti za istraživanje utjecaja tranzijenata u mreži te ostalih pojava poput vanjskih elektromagnetskih polja na remanentni tok u jezgri, ali i općenito istraživanje ovisnosti remanentnog toka o vremenu bez vanjskih utjecaja. Naime, najčešće korištena metoda za smanjenje udarne struje određuje remanentni tok u trenutku isklopa i temelji se na pretpostavci kako njegova vrijednost neće biti promijenjena do sljedećeg uklopa. Međutim, dokazano je kako vrijednost remanentnog toka može biti promijenjena čak i bez ikakvih vanjskih utjecaja. Stoga, prethodno poznata metoda može biti korištena za određivanje remanentnog toka u trenutku isklopa, a ova metoda za određivanje remanentnog toka na kraju razdoblja neuklopljenosti transformatora. Nakon toga, te dvije vrijednosti mogu biti uspoređene kako bi se utvrdila

promjena remanentnog toka u vremenu uslijed vanjskih utjecaja ili bez njih. Najveći nedostatak ove metode koji značajno ograničava područje primjene je promjena remanentnog toka u jezgri prilikom provođenja mjernog postupka. Naime, neka nova, nepoznata vrijednost remanentnog toka postojat će u jezgri nakon provođenja mjernog postupka. Stoga, ova metoda ne može biti korištena za smanjenje udarne struje kontroliranim uklopom. Nadalje, trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina kod ove je metode linearan. Međutim, mjerna nesigurnost remanentnog toka gotovo je pet puta veća od pripadajuće nesigurnosti mjerenog napona sekundara.

Metoda određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon, predstavljena u potpoglavlju 3.2. ovoga rada, također može precizno i pouzdano odrediti remanentni tok bez podataka o prethodnim stanjima transformatora, kao i prethodna metoda, provodeći samo mjerenje napona neopterećenog sekundara transformatora. No, za razliku od prethodne metode, glavna petlja histereze mora biti određena prije primjene ove metode, te vrijednosti struje i toka zasićenja moraju biti izabrane. Potencijalno područje primjene identično je kao i kod prethodne metode, s obzirom da i ova metoda ima isti nedostatak – nepoznata vrijednost remanentnog toka postojat će u jezgri nakon provođenja mjernog postupka. Dodatno, ova metoda ima još jedan značajan nedostatak – remanentni tok ne može biti određen pri svakom pokušaju. Naime, postoje slučajevi u kojima struja magnetiziranja ne dosegne vrijednost izabrane struje zasićenja, odnosno jezgra ne ode u zasićenje nakon uklopa transformatora. Trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina i kod ove je metode linearan, ali za razliku od prethodne metode, mjerna nesigurnost remanentnog toka gotovo je identična pripadajućoj nesigurnosti mjerenog napona sekundara.

Metoda određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na niski istosmjerni napon, predstavljena u potpoglavlju 3.3. ovoga rada, također može precizno i pouzdano odrediti remanentni tok bez podataka o prethodnim stanjima transformatora, kao i prethodne dvije metode. Pri tome, potrebno je provesti samo mjerenje napona neopterećenog sekundara transformatora. No, kao i kod druge, a za razliku od prve metode, glavna petlja histereze mora biti određena prije primjene ove metode, te vrijednosti struje i toka zasićenja moraju biti izabrane. Potencijalno područje primjene identično je kao i kod prethodne dvije metode, s obzirom da i ova metoda ima isti nedostatak – remanentni tok neće biti očuvan nakon provođenja mjernog postupka. No, za razliku od prethodne dvije metode,

remanentni tok će poprimiti maksimalnu vrijednost nakon provođenja mjernog postupka. Prednost ove metode u odnosu na prethodne dvije je u korištenju niskog istosmjernog napona prilikom uklopa, što posebno dolazi do izražaja ako se radi o visokonaponskim energetske transformatorima. S druge strane, to može biti i nedostatak s obzirom da je potreban dodatni sklop, odnosno istosmjerni izvor napajanja za implementaciju metode, dok se kod prethodne dvije metode može koristiti nazivni izmjenični napon koji je u većini slučajeva dostupan. Trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti ulaznih veličina i kod ove je metode linearan, ali za razliku od prethodne dvije metode, mjerna nesigurnost remanentnog toka gotovo je pet puta manja od pripadajuće nesigurnosti mjerenog napona sekundara. Dakle, iz aspekta propagacije mjerne nesigurnosti, ova metoda je najpovoljnija jer je za istu mjernu nesigurnost napona sekundara, nesigurnost remanentnog toka za prvu metodu gotovo 25, a za drugu pet puta veća od nesigurnosti za ovu metodu.

Metoda određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze, predstavljena u četvrtom poglavlju ovoga rada, može precizno i pouzdano odrediti remanentni tok bez podataka o prethodnim stanjima transformatora. Pri tome, potrebno je provesti mjerenje napona neopterećenog sekundara i struje primara transformatora nakon primjene testnog signala. No, prije prve primjene metode za pojedini transformator ili tip transformatora, potrebno je uspostaviti funkciju ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q . Potencijalno područje primjene ove metode uključuje područje spomenuto za prethodne tri metode, ali ono što je najvažnije, ova metoda može biti korištena za smanjenje udarne struje magnetiziranja u kombinaciji s kontroliranim uklopom. Naime, značajna prednost ove metode u odnosu na prethodne tri je u tome što je remanentni tok u jezgri očuvan nakon provođenja mjernog postupka. Dodatno, postoji nekoliko prednosti u odnosu na najčešće korištenu prethodno poznatu metodu za smanjenje udarne struje. Prije svega, remanentni tok moguće je odrediti primjenom ove metode i ako nisu poznata prethodna stanja, odnosno ako napon jednog od namota transformatora nije sniman prilikom isklopa, što kod prethodno poznate metode nije moguće. Dodatno, remanentni tok određuje se neposredno prije uklopa transformatora, čime se praktički isključuje mogućnost promjene njegove vrijednosti od trenutka mjerenja do trenutka uklopa. Naime, između isklopa i novog uklopa transformatora u praksi može proći i nekoliko mjeseci, što značajno povećava vjerojatnost promjene vrijednosti remanentnog toka u jezgri uslijed pojave tranzijenata u mreži ili zbog magnetske viskoznosti čak ako i nema nikakvih vanjskih utjecaja. Ova metoda ima i dva nedostatka, od kojih je jedan već spomenut, a to je potreba za uspostavljanjem funkcije ovisnosti remanentnog toka u jezgri o parametru W_Q prije prve

primjene ove metode za pojedini transformator ili pojedini tip transformatora. Drugi nedostatak je relativno niska razlučivost pri nižim vrijednostima remanentnog toka, što je posebno izraženo za vrijednosti do otprilike jedne trećine vrijednosti toka zasićenja. Međutim, razlučivost je značajno bolja pri višim vrijednostima remanentnog toka, a što je važno u potencijalnoj primjeni za smanjenje udarne struje magnetiziranja jer je često dovoljno znati samo interval vrijednosti u kojemu se nalazi remanentni tok kako bi smanjenje udarne struje bilo učinkovito. Također, veće vršne vrijednosti udarne struje mogu se pojaviti upravo pri višim vrijednostima remanentnog toka. Nadalje, trend propagacije mjerne nesigurnosti prilikom povećanja nesigurnosti napona sekundara i struje primara linearan je kod ove metode. Mjerna nesigurnost parametra W_Q približno je deset puta manja od pripadajuće nesigurnosti mjerenih ulaznih veličina.

U budućim istraživanjima, ova metoda bit će implementirana uz različite valne oblike testnog signala. Također, bit će korišteni transformatori s različitim tipovima jezgri, ali i veće snage od transformatora u ovom istraživanju. No, najveći izazov u budućim istraživanjima bit će prilagođavanje metode za primjenu kod trofaznih energetske transformatora, što će uvelike proširiti područje primjene.

LITERATURA

- [1] U. Parikh, B. R. Bhalja, “Mitigation of magnetic inrush current during controlled energization of coupled un-loaded power transformers in presence of residual flux without load side voltage measurements”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 76, pp. 156–164, 2016.
- [2] J. H. Brunke, K. J. Fröhlich, “Elimination of transformer inrush currents by controlled switching - Part I: Theoretical considerations”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, no. 2, pp. 276–280, 2001.
- [3] X. Duan, Huangzhihui, M. Liao, J. Zou, “Controlled vacuum circuit breaker for transformer inrush current minimization”, *Proc. - Int. Symp. Discharges Electr. Insul. Vacuum, ISDEIV*, vol. 1, pp. 133–136, 2008.
- [4] R. Apolonio, J. C. de Oliveira, H. S. Bronzeado, A. B. de Vasconcellos, “Transformer controlled switching: a strategy proposal and laboratory validation”, *2004 11th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, pp. 625–630, 2004.
- [5] A. Ebner, M. Bösch, R. Cortesi, “Controlled switching of transformers - Effects of closing time scatter and residual flux uncertainty”, *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2008.
- [6] G. Ning, W. Aiyuan, W. Jie, L. Haitao, R. Zhong, “Analysis and reduction of magnetizing inrush current for switch-on unloaded transformer”, *2013 2nd Int. Symp. Instrum. Meas. Sens. Netw. Autom.*, no. 2012, pp. 1022–1026, 2013.
- [7] A. Reis, J. C. De Oliveira, R. Apolonio, H. S. Bronzeado, “A controlled switching methodology for transformer inrush current elimination: Theory and experimental validation”, *Proceeding Int. Conf. Electr. Power Qual. Util. EPQU*, pp. 493–498, 2011.
- [8] S. K. Sahoo, A. Modi, M. Balamurugan, R. Sultana, S. Chhawchharia, “Reduction of Inrush Current Using Point On Wave Switching In Power Transformers”, pp. 1–6, 2017.
- [9] J. Faiz, S. Saffari, “Inrush current modeling in a single-phase transformer”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 2, pp. 578–581, 2010.
- [10] E. Cardelli, E. Della Torre, V. Esposito, A. Faba, “Theoretical considerations of magnetic hysteresis and transformer inrush current”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 11, pp. 5247–5250, 2009.
- [11] E. Cardelli, A. Faba, F. Tissi, “Prediction and control of transformer inrush currents”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, pp. 10–13, 2015.

- [12] S. Fang, H. Ni, H. Lin, S. L. Ho, "A Novel Strategy for Reducing Inrush Current of Three-Phase Transformer Considering Residual Flux", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 7, pp. 4442–4451, 2016.
- [13] Y. Husianyia, M. Rioual, "Determination of the residual fluxes when de-energizing a power transformer / comparison with on-site tests", *IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. 2005*, pp. 449–454, 2005.
- [14] Li Dongxia, Wang Zanzi, Liu Xiucheng, "Modeling and simulation of magnetizing inrush current of large power transformers", *ICEMS'2001. Proc. Fifth Int. Conf. Electr. Mach. Syst. (IEEE Cat. No.01EX501)*, vol. 1, pp. 440–443, 2001.
- [15] Y. Wang, X. Yin, D. You, T. Xu, "Analysis on the influencing factors of transformer sympathetic inrush current", *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 1–8, 2008.
- [16] J. V. Leite, A. Benabou, N. Sadowski, "Transformer inrush currents taking into account vector hysteresis", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 8, pp. 3237–3240, 2010.
- [17] A. Moradi, S. M. Madani, "Technique for inrush current modelling of power transformers based on core saturation analysis", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 10, pp. 2317–2324, 2018.
- [18] M. G. Vanti, S. L. Bertoli, S. H. L. Cabrai, A. G. Gerent, P. Kuo-Peng, "Semianalytic solution for a simple model of inrush currents in transformers", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 6, pp. 1270–1273, 2008.
- [19] Y. Wang, S. G. Abdulsalam, W. Xu, "Analytical formula to estimate the maximum inrush current", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 1266–1268, 2008.
- [20] C. K. Cheng, J. F. Chen, T. J. Liang, S. D. Chen, "Transformer design with consideration of restrained inrush current", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 102–108, 2006.
- [21] J.-L. S. J.-L. Shyu, "A Novel Control Strategy to Reduce Transformer Inrush Currents by Series Compensator", *2005 Int. Conf. Power Electron. Drives Syst.*, vol. 2, pp. 1283–1288, 2005.
- [22] P. Amiri, M. Akhbari, "Transient current limiter for suppressing transformer inrush, motor starting and fault currents in power system", *IET Electr. Power Appl.*, vol. 11, no. 3, pp. 423–433, 2017.
- [23] Y. Kang, X. Lin, S. Ye, H. Lei, S. Gao, "Transformer inrush mitigation for dynamic voltage restorer using direct flux linkage control", *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 11, pp. 2281–2289, 2015.

- [24] A. Ketabi, A. R. Hadidi Zavareh, "New method for inrush current mitigation using series voltage-source PWM converter for three phase transformer", *2011 2nd Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf. PEDSTC 2011*, pp. 501–506, 2011.
- [25] S. M. Madani, M. Rostami, G. B. Gharehpetian, R. Haghmaram, "Inrush current limiter based on three-phase diode bridge for Y-yg transformers", *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 6, p. 345, 2012.
- [26] H.-T. Tseng, J.-F. Chen, "Voltage compensation-type inrush current limiter for reducing power transformer inrush current", *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 2, p. 101, 2012.
- [27] T. Ghanbari, E. Farjah, "Efficient resonant-type transformer inrush current limiter", *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 7, p. 429, 2012.
- [28] Y. Cui, S. G. Abdulsalam, S. Chen, W. Xu, "A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction - Part I: Simulation and experimental results", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 I, pp. 943–949, 2005.
- [29] S. G. Abdulsalam, W. Xu, "A sequential phase energization method for transformer inrush current reduction-transient performance and practical considerations", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 208–216, 2007.
- [30] V. Molcrette, J. L. Kotny, J. P. Swan, J. F. Brudny, "Reduction of inrush current in single-phase transformer using virtual air gap technique", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 4 PART 1, pp. 1192–1194, 1998.
- [31] Y. C. Kang, S. H. Kang, P. Crossley, "An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third-difference function", *2003 IEEE Bol. PowerTech - Conf. Proc.*, vol. 4, no. 3, pp. 318–323, 2003.
- [32] A. A. Abdoos, "Detection of current transformer saturation based on variational mode decomposition analysis", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 11, pp. 2658–2669, 2016.
- [33] Y. C. Kang, S. H. Ok, S. H. Kang, "A CT Saturation Detection Algorithm", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 78–85, 2004.
- [34] J. Duan, Z. Jin, Y. Lei, "Residual flux suppression of protective current transformers for autoreclosure process", *2017 IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2017*, 2017.
- [35] E. Hajipour, M. Salehizadeh, M. Vakilian, M. Sanaye-Pasand, "Residual Flux Mitigation of Protective Current Transformers Used in an Autoreclosing Scheme", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 4, pp. 1636–1644, 2016.

- [36] T. Zheng *et al.*, “Fast, in Situ Demagnetization Method for Protection Current Transformers”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 7, pp. 1–4, 2016.
- [37] Y. C. Kang, U. J. Lim, S. H. Kang, Y. G. Kim, “Compensating algorithm for use with measurement type current transformers for protection”, *2005 IEEE Russ. Power Tech, PowerTech*, pp. 1–7, 2005.
- [38] Y.-C. Kang, T.-Y. Zheng, Y.-H. Kim, B.-E. Lee, S.-H. So, P. A. Crossley, “Development of a compensation algorithm for a measurement current transformer”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 5, p. 531, 2011.
- [39] F. Li, Y. Li, R. K. Aggarwal, “Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers”, *Gener. Transm. Distrib. IEE Proc.*, vol. 149, no. 4, pp. 497–503, 2002.
- [40] O. Ozgonenel, U. K. Terzi, İ. Petričenko, R. Petričenko, “Current transformer modeling for compensating algorithms”, *Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, no. May, pp. 522–527, 2013.
- [41] K. Milicevic, D. Vinko, D. Vulin, “Experimental investigation of impact of remnant flux on the ferroresonance initiation”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 346–354, 2014.
- [42] M. Rioual, P. Guuinic, D. Laval, M. Schäfer, M. A. Abdelghani, N. Schäfer, “Modeling of the energization of a power transformer in a 110 kV network and its validation by on site tests. Description of ferroresonance phenomena involved and means to avoid them”, *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, 2008.
- [43] M. Yang *et al.*, “Electromagnetic transient study on flexible control processes of ferroresonance”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 93, pp. 194–203, 2017.
- [44] M. Yang, W. Sima, L. Chen, P. Duan, P. Sun, T. Yuan, “Suppressing ferroresonance in potential transformers using a model-free active-resistance controller”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 95, pp. 384–393, 2018.
- [45] K. Miličević, “Vrednovanje matematičkog modela ferorezonantnih dijelova elektroenergetske mreže”, doktorski rad, Elektrotehnički fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2008.
- [46] K. A. Bhatt, B. R. Bhalja, U. B. Parikh, “Evaluation of controlled energisation of an unloaded power transformer for minimising the level of inrush current and transient voltage distortion using PIR-CBs”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 11, pp. 2788–2798, 2018.

- [47] D. Tishuai, Z. Bi-De, F. Chun-En, L. Wei, R. Xiao, C. Chuanjiang, "Influence of system transients on the residual flux of three-phase transformers", *ICEPE-ST 2017 - 4th Int. Conf. Electr. Power Equipment- Switch. Technol.*, vol. 2017-Decem, pp. 970–973, 2017.
- [48] M. F. Lachman, V. Fomichev, V. Rashkovski, A. M. Shaikh, "Frequency Response Analysis of Transformers and Influence of Magnetic Viscosity", *77th Annu. Int. Doble Client Conf.*, pp. 1–18, 2010.
- [49] D. Cavallera, V. Oiring, J. L. Coulomb, O. Chadebec, B. Caillault, F. Zgainski, "A new method to evaluate residual flux thanks to leakage flux, application to a transformer", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, 2014.
- [50] J. Horiszny, "Method of determining the residual fluxes in transformer core", *2017 18th Int. Symp. Electromagn. Fields Mechatronics, Electr. Electron. Eng. ISEF 2017*, pp. 2–3, 2017.
- [51] C. Wei, X. Li, M. Yang, Z. Ma, H. Hou, "Novel remanence determination for power transformers based on magnetizing inductance measurements", *Energies*, vol. 12, no. 24, 2019.
- [52] W. Ge, Y. Wang, Z. Zhao, X. Yang, Y. Li, "Residual Flux in the Closed Magnetic Core of a Power Transformer", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, pp. 3–6, 2014.
- [53] F. De Leon, A. Farazmand, S. Jazebi, D. Deswal, R. Levi, "Elimination of Residual Flux in Transformers by the Application of an Alternating Polarity DC Voltage Source", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 4, pp. 1727–1734, 2015.
- [54] B. Kovan, F. De Leon, D. Czarkowski, Z. Zabbar, L. Birenbaum, "Mitigation of inrush currents in network transformers by reducing the residual flux with an ultra-low-frequency power source", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 3, pp. 1563–1570, 2011.
- [55] P. Kumar, S. Y. Reddy, "Optimization of inrush current in electrical transformer", *2014 Int. Conf. Smart Electr. Grid, ISEG 2014*, pp. 1–5, 2015.
- [56] D. Lovejoy, "Demagnetization", in *Magnetic Particle Inspection*, Springer, Dordrecht, 1993, pp. 149–169.
- [57] V. O. De Castro Cezar, L. L. Rouve, J. L. Coulomb, F. X. Zgainski, O. Chadebec, B. Caillault, "Elimination of inrush current using a new prefluxing method. Application to a single-phase transformer", *Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2014*, pp. 1717–1723, 2014.
- [58] P. J. Kotak, P. Jaikaran, "Prefluxing Technique to Mitigate Inrush Current of Three-Phase Power Transformer", *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 135–141, 2013.

- [59] D. I. Taylor, J. D. Law, B. K. Johnson, N. Fischer, “Single-phase transformer inrush current reduction using prefluxing”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 1, pp. 245–252, 2012.
- [60] L. O. Chua, K. A. Stromsmoe, “Lumped-Circuit Models for Nonlinear Inductors Exhibiting Hysteresis Loops”, *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 17, no. 4, pp. 564–574, 1970.
- [61] F. Preisach, “On the Magnetic Aftereffect”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 3, pp. 1–11, 2017.
- [62] D. C. Jiles, J. B. Thoelke, M. K. Devine, “Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 1, pp. 27–35, 1992.
- [63] A. Benabou, S. Clénet, F. Piriou, “Comparison of Preisach and Jiles-Atherton models to take into account hysteresis phenomenon for finite element analysis”, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 261, no. 1–2, pp. 139–160, 2003.
- [64] M. Zou, W. Sima, M. Yang, L. Li, Q. Yang, P. Sun, “Improved low-frequency transformer model based on Jiles–Atherton hysteresis theory”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 4, pp. 915–923, 2017.
- [65] A. Wilk, M. Michna, A. Cichowski, “Simulation of the Remanence Influence on the Transient States of the Single-Phase Transformer Including Feedback Preisach Model”, in *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014, pp. 875–880.
- [66] K. Milicevic, D. Vulin, D. Vinko, “Experimental Investigation of Symmetry-Breaking in Ferroresonant Circuit”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Regular papers*, vol. 61, no. 5, pp. 1543–1552, 2014.
- [67] K. Miličević, D. Vinko, Z. Emin, “Identifying ferroresonance initiation for a range of initial conditions and parameters”, *Nonlinear Dyn.*, vol. 66, no. 4, pp. 755–762, 2011.
- [68] D. Vulin, I. Biondic, K. Milicevic, D. Vinko, “Laboratory setup for determining residual magnetic flux value using low voltage DC source”, *Electr. Eng.*, 2020.
- [69] G. Petrović, T. Kilić, S. Milun, “Remanent flux measurement and optimal energization instant determination of power transformer”, *Proceedings, XVII IMEKO World Congr. June 22 – 27, 2003, Dubrovnik, Croat.*, no. 5, pp. 952–955, 2003.
- [70] J. C. F. G. I. Metrology, “Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the ‘Guide to the expression of uncertainty in measurement’ — Propagation of distributions using a Monte Carlo method”, *Jt. Comm. Guid. Metrol.*, 2008.

- [71] Joint Committee For Guides In Metrology, “Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement”, *Int. Organ. Stand. Geneva ISBN*, vol. 50, no. September, p. 134, 2008.
- [72] K. Milicevic, I. Biondic, D. Vulin, “Measurement uncertainty of the instantaneous characteristics of non-linear coil obtained by Dommel’s method”, *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 8, 2017.
- [73] S. Sediva, M. Havlikova, “Comparison of GUM and Monte Carlo method for evaluation measurement uncertainty of indirect measurements”, *Proc. 2013 14th Int. Carpathian Control Conf. ICCCC 2013*, no. June, pp. 325–329, 2013.
- [74] M. Azpúrua, C. Tremola, E. Páez, “Comparison of the GUM and Monte Carlo methods for the uncertainty estimation in electromagnetic compatibility testing”, *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 34, no. 34, pp. 125–144, 2011.
- [75] M. Solaguren-Beascoa Fernández, J. M. Alegre Calderón, P. M. Bravo Díez, “Implementation in MATLAB of the adaptive Monte Carlo method for the evaluation of measurement uncertainties”, *Accredit. Qual. Assur.*, vol. 14, no. 2, pp. 95–106, 2009.

SAŽETAK

Remanentni tok u magnetskoj jezgri može stvarati značajne probleme u radu elektroenergetskog sustava, posebice pri uklopu transformatora na nazivni napon. U praksi ga je nemoguće izravno mjeriti s obzirom da je zatvoren unutar jezgre. Iako postoje metode koje ga neizravno određuju, zbog njihovih nedostataka javlja se potreba za razvojem novih koje će moći pouzdano i precizno odrediti remanentni tok na kraju razdoblja neuklopljenosti transformatora, te odrediti remanentni tok uz očuvanje njegove vrijednosti nakon provođenja mjernog postupka. Cilj ovoga rada je razviti metode koje će moći odgovoriti na prethodno navedene izazove. U tu svrhu, izrađen je i laboratorijski sustav za implementaciju i ispitivanje metoda. Razvijene su i predstavljene ukupno četiri metode određivanja remanentnog toka u magnetskoj jezgri. Korištenjem prve tri metode, remanentni tok određuje se na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon te na temelju prijelaznog stanja uzrokovano uklopom transformatora na nazivni izmjenični, odnosno niski istosmjerni napon. Međutim, primjenom ovih metoda, nakon provedenog mjernog postupka vrijednost remanentnog toka neće biti očuvana, što značajno sužava područje primjene. Iako prethodno navedene tri metode ne odgovaraju u potpunosti na postavljene izazove, imaju svoje prednosti u određenim područjima primjene u odnosu na prethodno poznate metode. Razvijena je i metoda određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze, čijom primjenom remanentni tok u jezgri ostane očuvan nakon provođenja mjernog postupka, što značajno proširuje područje primjene. Naime, ova metoda može biti korištena i za smanjenje udarne struje magnetiziranja prilikom uklopa transformatora na nazivni napon, što je najveći izazov u praksi povezan s remanentnim tokom. Također, u ovom radu je procijenjena propagacija mjerne nesigurnosti mjerenih veličina za sve metode određivanja remanentnog toka primjenom adaptivne Monte Carlo metode.

Ključne riječi: remanentni magnetski tok, transformator, udarna struja, petlja histereze, mjerna nesigurnost, adaptivna Monte Carlo metoda

ABSTRACT

METHODS FOR DETERMINING THE RESIDUAL FLUX IN A MAGNETIC CORE

The residual flux in a magnetic core can cause significant problems in the operation of electric power systems, especially during the energization of the transformer using the nominal voltage. Since the residual flux only exists within the magnetic core itself, it cannot be directly measured. Although some existing methods can be used to determine the residual flux indirectly, they have several flaws. Therefore, there is a need for new methods that can be used to determine the residual flux at the end of an idle state. These methods should be accurate and reliable; they must also allow the residual flux to remain after the procedure. This study's purpose is to develop such methods. The laboratory setup used to implement and test the developed methods was created with the above criteria in mind. Four methods for determining the residual flux are introduced in this study. The first three methods determine the residual flux based on (1) the steady-state established after the nominal AC energization, (2) the transient state caused by the nominal AC energization, and (3) the low-voltage DC energization, respectively. These three methods have advantages over the older methods but do not allow the residual flux to remain after the procedure. The fourth method for determining the residual flux uses a minor hysteresis loop and successfully preserves the residual flux. This fourth method can be applied more widely than the previous ones. It can be used to mitigate the inrush current when energizing the transformer, which is the biggest challenge related to the residual flux. The study also estimates the propagation of measurement uncertainties of the measured values for all four methods using the adaptive Monte Carlo simulation.

Keywords: residual magnetic flux, transformer, inrush current, hysteresis loop, measurement uncertainty, adaptive Monte Carlo method

ŽIVOTOPIS

Dragan Vulin rođen je 1. svibnja 1986. godine u Osijeku. Sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek završava 2008., a sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, 2010. godine. Dobitnik je Rektorove nagrade i godišnje nagrade "Hrvoje Požar" Hrvatskog energetskog društva za izvrstan uspjeh u studiju. Po završetku studija počinje raditi na suradničkom radnom mjestu asistenta na Zavodu za elektrostrojarstvo Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Sveučilišni poslijediplomski doktorski studij elektrotehnike upisuje 2011. godine.

Dragan Vulin

PRILOZI

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

- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje metode određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon u datoteci „Metoda_1.m“ (\\Prilozi\\Metoda 1\\Metoda_1.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje metode određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon u datotekama „Metoda_2.m“ (\\Prilozi\\Metoda 2\\Metoda_2.m) i „LevelCrossDetect_2.m“ (\\Prilozi\\Metoda 2\\LevelCrossDetect_2.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje metode određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na niski istosmjerni napon u datoteci „Metoda_3.m“ (\\Prilozi\\Metoda 3\\Metoda_3.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje metode određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze u datotekama „Metoda_4_10V_2ms.m“ (\\Prilozi\\Metoda 4\\Metoda_4_10V_2ms.m) i „LevelCrossDetect_4.m“ (\\Prilozi\\Metoda 4\\LevelCrossDetect_4.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje procjene propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon u datotekama „Metoda_1_AMC.m“ (\\Prilozi\\Metoda 1\\AMC\\Metoda_1_AMC.m) i „AMC_funkcija_1.m“ (\\Prilozi\\Metoda 1\\AMC\\AMC_funkcija_1.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje procjene propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon u datotekama „Metoda_2_AMC.m“ (\\Prilozi\\Metoda 2\\AMC\\Metoda_2_AMC.m), „LevelCrossDetect_2.m“ (\\Prilozi\\Metoda 2\\AMC\\LevelCrossDetect_2.m) i „AMC_funkcija_2.m“ (\\Prilozi\\Metoda 2\\AMC\\AMC_funkcija_2.m);
- programski kod u programskom paketu MATLAB za izvođenje procjene propagacije mjerne nesigurnosti mjerene veličine za metodu određivanja remanentnog toka na

temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na niski istosmjerni napon u datotekama „Metoda_3_AMC.m“ (\\Prilozi\\Metoda 3\\AMC\\Metoda_3_AMC.m) i „AMC_funkcija_3.m“ (\\Prilozi\\Metoda 3\\AMC\\AMC_funkcija_3.m);

- 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\\Metoda 4\\AMC\\Metoda_4_10V_2ms_AMC.m), „LevelCrossDetect_4.m“ (\\Prilozi\\Metoda 4\\AMC\\LevelCrossDetect_4.m) i „AMC_funkcija_4_10V_2ms.m“ (\\Prilozi\\Metoda 4\\AMC\\AMC_funkcija_4_10V_2ms.m).

Također, u prilogu ovoga rada, u elektroničkom obliku pohranjenom na CD-u nalaze se i rezultati mjerenja za:

- metodu određivanja remanentnog toka na temelju ustaljenog stanja uspostavljenog nakon uklopa transformatora na nazivni izmjenični napon i metodu određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na nazivni izmjenični napon u mapi „Metoda 1 i 2“ (\\Prilozi\\Rezultati mjerenja\\Metoda 1 i 2\\);
- metodu određivanja remanentnog toka na temelju prijelaznog stanja uzrokovanog uklopom transformatora na niski istosmjerni napon u mapi „Metoda 3“ (\\Prilozi\\Rezultati mjerenja\\Metoda 3\\);
- metodu određivanja remanentnog toka analiziranjem male petlje histereze u mapama „1 V, 20 ms“ (\\Prilozi\\Rezultati mjerenja\\Metoda 4\\1 V, 20 ms\\), „4 V, 5 ms“ (\\Prilozi\\Rezultati mjerenja\\Metoda 4\\4 V, 5 ms\\) i „10 V, 2 ms“ (\\Prilozi\\Rezultati mjerenja\\Metoda 4\\10 V, 2 ms\\).