

# MODELIRANJE PETLJE HISTEREZE ENERGETSKOG TRANSFORMATORA U SIMULACIJSKOM SUČELJU

---

Grahovac, Ena

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

*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:200:267781>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike**

**MODELIRANJE PETLJE HISTEREZE ENERGETSKOG  
TRANSFORMATORA U SIMULACIJSKOM SUČELJU**

**Završni rad**

**Ena Grahovac**

**Osijek, 2019.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA.....	1
<b>2. MODELI</b> .....	2
2.1. JILES-ATHERTON MODEL .....	2
2.2. CHAN MODEL.....	2
2.3. PREISACH MODEL.....	2
2.4. BERGQVIST MODEL.....	3
<b>3. KARAKTERISTIKE TRANSFORMATORA</b> .....	5
3.1. MAGNETSKO POLJE I STRUJE .....	5
3.2. MAGNETSKA INDUKCIJA.....	6
3.3. B-H KRIVULJA.....	7
<b>4. SIMULACIJA I MODELU DIgSILENT PowerFactory SOFTVERU</b> .....	8
4.1. TOČKA ZASIĆENJA (engl. Knee flux).....	9
4.2. REAKTANCIJA ZASIĆENJA .....	10
4.3. EKSPONENT ZASIĆENJA.....	10
4.4. IZVOĐENJE SIMULACIJE .....	10
4.4.1. PRVI SLUČAJ.....	10
4.4.2. DRUGI SLUČAJ .....	14
4.4.3. TREĆI SLUČAJ .....	19
.....	22
<b>ZAKLJUČAK</b> .....	23
<b>SAŽETAK</b> .....	23
<b>SUMMARY</b> .....	23
<b>LITERATURA</b> .....	24
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	26

# 1. UVOD

U radu će se obraditi tematika vezana za analizu petlje histereze elektroenergetskog transformatora. U radu [1] se opisuje modeliranje transformatora prijelaznim pojavama pomoću statičkih svojstva laminirane jezgre. Za analizu je potrebno uzeti u obzir vrtložne efekte u transformatorskoj jezgri. Prikazani model petlje histereze prikladan je za analizu prijelaznih stanja transformatora poput procesa uključivanja. Postoji više različitih pristupa modeliranju petlje histereze, ali među njima su najpoznatiji Jiles-Atherton model, Chan model i Preisach model, [2].

## 1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

U praktičnom dijelu provest će se elektromagnetska simulacija u više slučajeva u mreži gdje će se mijenjati parametri modela. Analizirat će se petlja histereze i vidjeti o čemu ovisi njena karakteristika.

## 2. MODELI

### 2.1. JILES-ATHERTON MODEL

Jiles-Atherton model temelji se na diferencijalnoj jednačbi prvog reda te je usko povezan s Curie-Weiss teorijom magnetizma. Taj model dijeli magnetiziranje  $M$  na reverzibilne i ireverzibilne dijelove. Pokazuje nedostatke u asimetričnoj uzbuđi kao i za manje pomične petlje, ali dobro funkcionira za stacionarne ulazne veličine, [2]. Model se bazira na metodi konačnih elemenata te je prikladan za implementaciju u simulacijske softvere. Inverzni Jiles-Athertonov model se temelji na aproksimaciji petlje histereze, [3].

### 2.2. CHAN MODEL

Izračunava indukciju  $B$  koristeći jednostavnu algebarsku jednačbu sa samo tri parametra, [2].

### 2.3. PREISACH MODEL

Fizikalni je model za feromagnetsku histerezu, ali je njegova primjena proširena na mehaniku i supravodljivost, [3]. Temelji se na integraciji na području  $S$ , koje se sastoji pozitivnog i negativnog područja. Ulazna količina  $H(t)$  dovodi do specifičnog omjera između pozitivnog i negativnog područja, [2]. Kroz godine je predstavljen u matematičkom obliku i proširen na modeliranje vektorske histereze. Klasični Preisach model opisuje magnetske materijale korištenjem velikog broja elemenata petlje histereze koji se nazivaju relejni operatori ili operatori termostatske histereze. Operator opisuje njegovo gornje i donje preklopno polje. U slučaju da magnetsko polje postane veće od gornjeg preklopnog polja ili manje od nižeg preklopnog polja, tada će se element smatrati pozitivnim stanjem odnosno negativnim stanjem. Ukupno magnetiziranje jednako je zbrajanju magnetiziranja svih elemenata. Pristup modificiranju klasične metode temelji se na "Everett" funkciji. Ta funkcija koristi grafički pristup i pretvara dvostruku integraciju u zbroj nekoliko Everett funkcija. Everett funkcija, slično funkciji Preisach, definira oblik rezultirajuće petlje histereze, [3].

Postojeće jedinice za modeliranje energetskog sustava u realnom vremenu najčešće integriraju jednostavnu  $B-H$  karakteristiku uz zanemarivanje efekta histereze, [2]. U radu [3] detaljno se

opisuje model histereze i metode njezinog rješavanja. Cilj modela histereze je predvidjeti kako se magnetizacija, gustoća magnetskog toka i magnetska polarizacija mijenjaju s magnetskim poljem  $H$ . Putanje histereze se mogu podijeliti u statičke i dinamičke komponente, na temelju Bertotti teorije. Dinamička komponenta se pojavljuje zbog vrtložnih struja ovisno o brzini magnetiziranja te se može formulirati rješavanjem Maxwellovih jednadžbi, dok je statička komponenta neovisna o brzini i sadrži svojstva petlje histereze, [3]. Modeli histereze se mogu formirati u modele skalarne histereze i vektorske histereze. Kod skalarnog modela ulaz i izlaz modela su skalarne varijable, dok su vektori za vektorske modele histereze. Promatrajući utjecaj temperature na materijal, prikladniji bi bio Jiles-Athertonov model, dok za modeliranje vektorske histereze, pogodniji bi bio Bergqvistov model, [3]. Jiles-Athertonov model je lako implementirati, ali njegova preciznost nije zadovoljavajuća u slučaju predviđanja manjih petlji. Zbog toga se više koriste modeli bazirani na Preisachovom modelu kao najbolji za modeliranje statičke skalarne histereze. U sljedećem dijelu će se pokazati kratak opis Bergqvistovog modela, [3].

#### 2.4. BERGQVIST MODEL

Koristi se za modeliranje vektorske histereze, a temelji se na pretpostavci da se odstupanje od idealne nehisterezne krivulje događa zbog učinaka zaostajanja magnetskih domena. Ukupno magnetiziranje je rezultat magnetiziranja svih domena, [3].

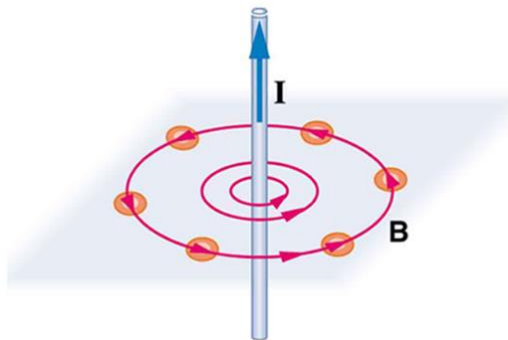
U ciklusu magnetiziranja vanjskim poljem je potrebno da prevlada magnetiziranje jezgre s ciljem mijenjanja toka, [4]. Nakon što se ukloni vanjsko magnetsko polje, magnetiziranje koje ostaje u magnetskom materijalu se zove remanencija. Kada se materijal izloži promjeni magnetskog polja, okolina koja je okružena  $B-H$  krivuljom predstavlja konačni gubitak energije. U studiji [4] gubitke u transformatoru najčešće predstavlja ekvivalentni sklop koji se sastoji od otpornika i prigušnica. U transformatoru su osim gubitaka u namotima, prisutne i vrtložne struje te histereza. Krivulju petlje histereze moguće je prikazati eliptičnom petljom, gdje su gustoća i jakost magnetskog polja predstavljeni kao kosinus funkcije, [4]. Teoriju o gubicima u namotima je složeno za izvesti jer je moguće da magnetsko polje stupi u kontakt s bilo kojim metalom u blizini i tako uzrokuje dodatne gubitke. Vrijednost otpora namota se može ispitati testiranjem cijelog transformatora i usporedbom rezultata ispitivanja s cjelovitim modelom transformatora. Međutim, teorija ne može u potpunosti biti ispravna i točna ako se ne uzme u obzir oblik jezgre transformatora. U slučaju da jezgra ima uske kutove, magnetski tok će se tamo koncentrirati i stvarati značajne gubitke. Gubitak snage zbog harmonijskih opterećenja povećava se za kvadrat harmonijskog reda, [4]. U radu [5] se objašnjava da istosmjernje struje u energetskim mrežama

moгу zasititi energetske transformatore i tako prouzročiti znatne negativne učinke na energetske transformatore i energetske mreže. Te struje stvaraju se interakcijom između solarnog vjetrova i magnetskog polja Zemlje, a frekvencije su im jako niske. U studiji [5] pojavljuju se 2 modela za dobivanje histereze, a među njima su Jiles-Athertonov model i Preisachov model te novi diferencijalni pristup. Taj pristup se koristi za modeliranje statičke skalarne histereze, a temelji se na klasičnoj Preisachovoj teoriji. Taj model može predvidjeti histerezu kao klasični Preisachov model te se može okrenuti i imat će jednostavan algoritam. Metoda konačnih elemenata vrlo je koristan alat za rješavanje elektromagnetskih jednadžbi. Spomenuta metoda se koristi za modeliranje transformatora. Izračunava struje magnetiziranja, gubitke uslijed rasipanja, gubitke u jezgri, elektromagnetskih sila i parametara mješovitih modela. Koristi se u svrhu istraživanja i procjenjivanja, ali ograničenje joj je velika potražnja za računalnom memorijom i dugo vrijeme izračuna. Glavni cilj modeliranja je vidjeti kako istosmjerna struja može utjecati na struju magnetiziranja, zasićenje jezgre, gubitke jezgre. Elektromagnetsko modeliranje energetskih transformatora u velikoj mjeri se upotrebljava za analizu prijelaznih pojava koje se javljaju u interakciji transformatora i elektroenergetske mreže, ali se koristi i za izračun parametara koji je potreban za potrebe dizajna, [5]. U radu [6] su konstruirani poboljšani topološki ispravni modeli. Problem je naglašen u tome kako provesti detaljne modele bez potpunih i pouzdanih podataka. Stoga se razvijaju metode procjene parametara da bi se odredili parametri zadanog modela u trenutku kada su dostupne informacije nepotpune, [6]. Modeli podrazumijevaju odvojeni prikaz svakog segmenta jezgre, uključujući kapacitivne efekte, karakteristiku zasićenja, histerezu i frekvencijsku ovisnost otpora namata te gubitka jezgre. Modeliranje vrtložnih struja i histereza je komplicirano zbog nedostatka informacija, ali u unaprijeđenom modelu su parametri za model transformatora procijenjeni korištenjem tehnika optimizacije i osnovnih podataka testiranja transformatora. Trenutačnu vezu između struje i toka povezanog za periodičku uzбудu daje  $\lambda$ - $i$  petlja histereze. Skaliranjem  $B$ - $H$  karakteristika se može dobiti  $\lambda$ - $i$ , a njena petlja daje normalnu magnetsku krivulju zasićenja. Ispravna putanja petlje histereze je nužan dio modela jezgre s točnom vremenskom domenom, jer je magnetski tok u jezgri vrlo bitan prilikom pokretanja simulacije. Svrha studije [6] je bila razvoj modela transformatora koji se temelje na dualnosti i procjene parametara koji mogu učinkovito iskoristiti dostupne podatke i mjerenja u slučaju da su nepotpuni. Proširuju se vještine topološki ispravnih trofaznih modela autotransformatora i metoda procjene parametara. Da bi poboljšali detaljne prikaze korištene u modeliranju transformatora, proučavane su nelinearne i frekvencijski ovisne karakteristike. Ustanovljene su metode procjene parametara da bi se odredili parametri zadanog modela kada su nepotpuni podaci dostupni, [6]

### 3. KARAKTERISTIKE TRANSFORMATORA

#### 3.1. MAGNETSKO POLJE I STRUJE

Magnetsko polje je prouzrokovano električnom strujom. Kako bi se pojasnilo magnetsko polje i struje transformatora, potrebno je promatrati ravni cilindrični vodič kroz kojeg prolazi struja  $i$ , [7]. Smjer magnetskog polje se dobiva se pravilom desne ruke, gdje palac desne ruke ide u smjeru struje, a prsti pokazuju smjer magnetskog polja, [10].



*Slika 3.1. Magnetsko polje generirano strujom, [10]*

Za bilo koji zatvorenu petlju gustoća magnetskog polja je funkcija struje u vodiču te se može pokazati jednačinom:

$$\int B * dl = i \times \mu_0 \quad (2-1)$$

$\mu_0$  predstavlja vakuumsku permeabilnost i iznosi  $4\pi \times 10^{-7} N/A^2$ , a  $dl$  je duljina.

U slučaju ravnog vodiča, putanja gustoće magnetskog polja je kružna. Udaljena je u vrijednosti  $r$  od središta vodiča pa je to prikazano sljedećom jednačinom:

$$\int B * dl = B \times 2\pi r \quad (2-2)$$

A iz toga proizlazi da je gustoća magnetskog polja obrnuto proporcionalan udaljenosti od središta vodiča, [7].

$$B = i \times \frac{\mu_0}{2\pi r} \quad (2-3)$$

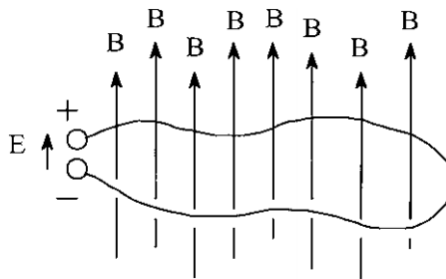


### 3.2. MAGNETSKA INDUKCIJA

Temelji se na Faradayevom zakonu indukcije, gdje se magnetski tok  $\phi$  dobiva integrirajući površinu  $dA$  u bilo kojoj površini unutar zatvorene petlje i to je prikazano s jednažbom:

$$\phi = \int B * dA \quad (2-4)$$

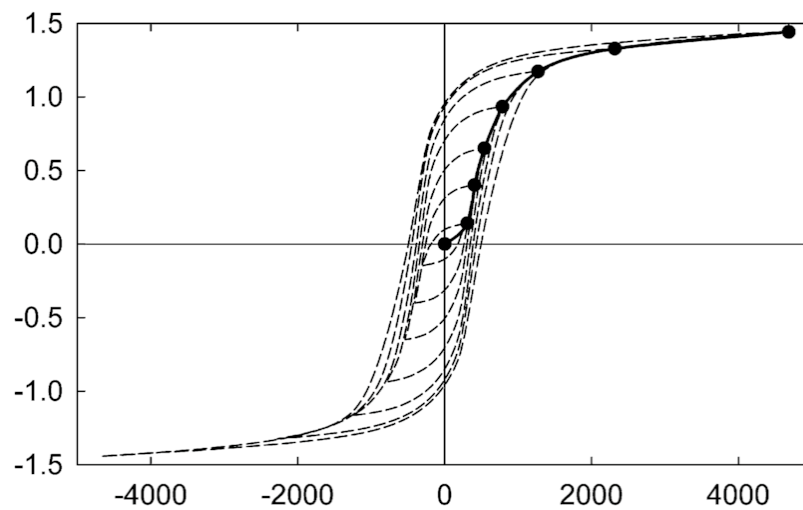
Time se utvrdilo da postoji inducirana struja, a također i inducirani napon, samo kada se magnetski tok mijenja s vremenom, [7]. Naziv „inducirana“ struja je dobiveno zbog toga što nije stvorena baterijom ili nekim izvorom napona, nego se struja u žici inducira magnetskim poljem, [11].



*Slika 3.2. Induciran napon okružen promjenjivim poljem B, [7]*

### 3.3. B-H KRIVULJA

Krivulja je karakteristična za magnetska svojstva materijala, elemenata ili legure. Zatvorena je petlja koja se kreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu u jednom ciklusu. Kod ove krivulje je bitno spomenuti kad je struja magnetiziranja nula, prisutan je značajni negativni ili pozitivni zaostali tok u jezgri. Pomoću krivulje se primjećuje kako materijal reagira na vanjsko magnetsko polje. Stoga je bitna pri dizajniranju magnetskih krugova.  $B$ - $H$  krivulja će se suziti na frekvencijama ispod 60 Hz, a također to vrijedi i za ostale različite amplitude, [7].



*Slika 3.3. Krivulja magnetiziranja, [11]*

## **4. SIMULACIJA I MODELU DIgSILENT PowerFactory SOFTVERU**

Za potrebe analiziranja prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustava koristi se simulacija. Kod vremenskih domena simulacije elektroenergetskog sustava postoje različite vrijednosti koji se vežu za frekvencijski raspon proučavanih poremećaja, [8]. Powerfactory je aplikacija koja omogućava analiziranje sustava, [12]. U PowerFactory postoje dvije vrste simulacija :

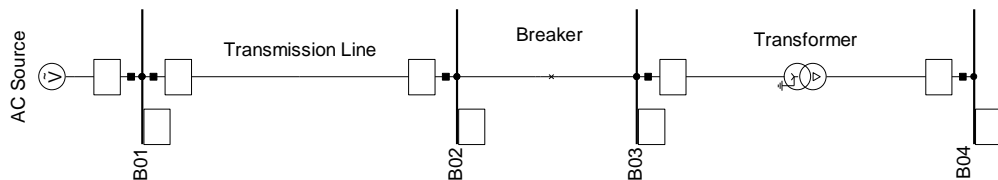
1. elektromagnetske prijelazne pojave – EMT simulacija
2. elektromehaničke prijelazne pojave – RMS simulacija

Elektromagnetske prijelazne pojave su veoma brze pojave, a pojavljuju se u rasponu od mikrosekundi do milisekundi. Najčešće su izazvane neočekivanim promjenama u konfiguraciji mreže, a tu spadaju pojave prouzročene zatvaranjem ili otvaranjem prekidača ili određenim kvarom, [13]. Prednost elektromagnetskih pojava je da rade preciznu simulaciju mrežnih komponenti, kao što su transformatori, zaštitni uređaji, prijenosni vodovi ili pretvarački, [8].

Elektromehaničke prijelazne pojave nastaju zbog neusklađivanja između proizvodnje i potrošnje električne energije. Ponekad se taj poremećaj dogodi zbog isključivanja dalekovoda koji se nalazi u blizini, [13]. Sporije su pojave od elektromagnetskih prijelaznih pojava zbog inercije velikih generatora, a pojavljuju se u rasponu od milisekundi do sekundi. Simulacija koja je prepoznatljiva kod ove vrste je simulacija stabilnosti. U toj simulaciji filtriraju se elektromagnetske prijelazne pojave, dok su matematički modeli elektromehaničkih prijelaznih pojava pojednostavljeni ili se izračunavaju iz elektromagnetskih pojava, [8].

Za elektromagnetsku simulaciju vrlo se često koriste opsežni modeli koji se temelje na diferencijalnim jednadžbama. Vrijeme simulacije traje nekoliko sekundi i to je dosta dugo zbog velikog broja stanja sustava. Rješavanje diferencijalnih jednadžbi sustava zahtijeva simulaciju u niskim vrijednostima vremenskog koraka u razmaku od 100 nanosekundi do 100 mikrosekundi, [8].

Jednofazni prikaz simulacijskog modela je prikazan na slici 4.1. Modelirani transformator je priključen na naponski izvor preko prijenosnog voda. Korišteni model primjer je DlgSILENT PowerFactory tima za simulaciju i prikaz udarnih struja magnetiziranja transformatora.



*Slika 4.1. Prikaz praktičnog rada u aplikaciji Powerfactory*

Modelirani transformator je snage 60 MVA uz prijenosni omjer 210/10,6 kV. Relativni iznos napona kratkog spoja –  $u_k$  je 12,4 %, gubici u bakru  $P_k$  su 360 kW, a relativni iznos struje magnetiziranja  $i_0$  je 0,16%. Za modeliranje magnetske karakteristike te simulacije uključenja transformatora u simulacijski je model (*kartica EMT – Saturation*) potrebno unijeti i sljedeće parametre:

#### 4.1. TOČKA ZASIĆENJA (engl. Knee flux)

Vrijednost koja prikazuje normalnu radnu točku transformatora, a dobiva se  $\Phi$ - $I$  karakteristikom transformatora. Najčešće se za točku zasićenja uzima vrijednost 1.04 p.u, [9].

## 4.2. REAKTANCIJA ZASIĆENJA

Podatak koji se izračunava preko stvarnih karakteristika otvorene petlje, odnosno preko one karakteristike koja je ravna linija i pokazuje stupanj zasićenja karakteristike kratkog spoja. Reaktancija zasićenja nije konstantna vrijednost, [14].

## 4.3. EKSPONENT ZASIĆENJA

Metoda je kojom se može dobiti relativna permeabilnost za višefazni tok. Zasniva se na empirijskom odnosu između zasićenja i relativne permeabilnosti, [15].

## 4.4. IZVOĐENJE SIMULACIJE

U simulacijskim slučajevima provodila se elektromagnetska simulacija u programu DiGSILENT Powerfactory. Modeliranom transformatoru mijenjale su se različitim vrijednostima parametara u svakom posebnom slučaju simulacije. Pokretanjem simulacije (*kartica Calculation – RMS/EMT Simulation – Start Simulation*) iscrtali su se grafovi za svaki pojedini slučaj simulacije modeliranog transformatora. Simulacijom dobiveni su grafovi faznih struja i napona na visokonaponskoj strani, magnetskog toka, struje magnetiziranja, Fourierove analize struje i petlje histereze.

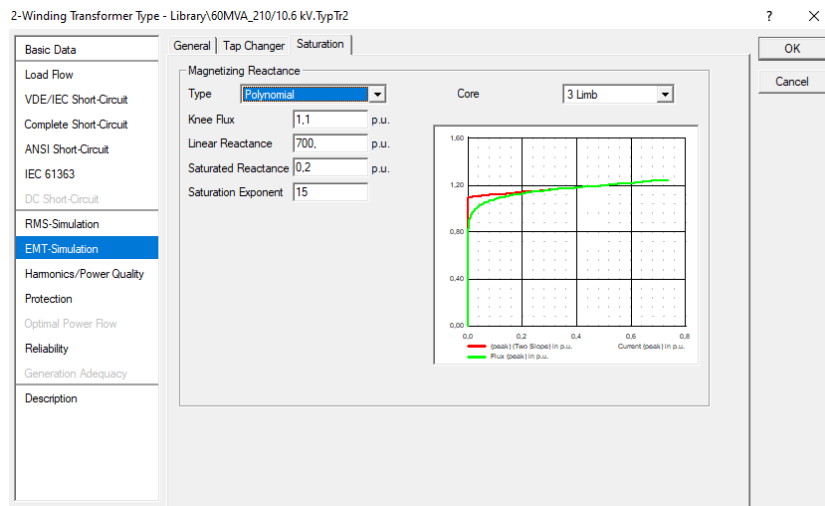
### 4.4.1. PRVI SLUČAJ

U prvom slučaju koristile su se sljedeće vrijednosti prikazane u tablici 1. Postavlja se vrijeme isključenja na 1 s i pokreće se elektromagnetska simulacija.

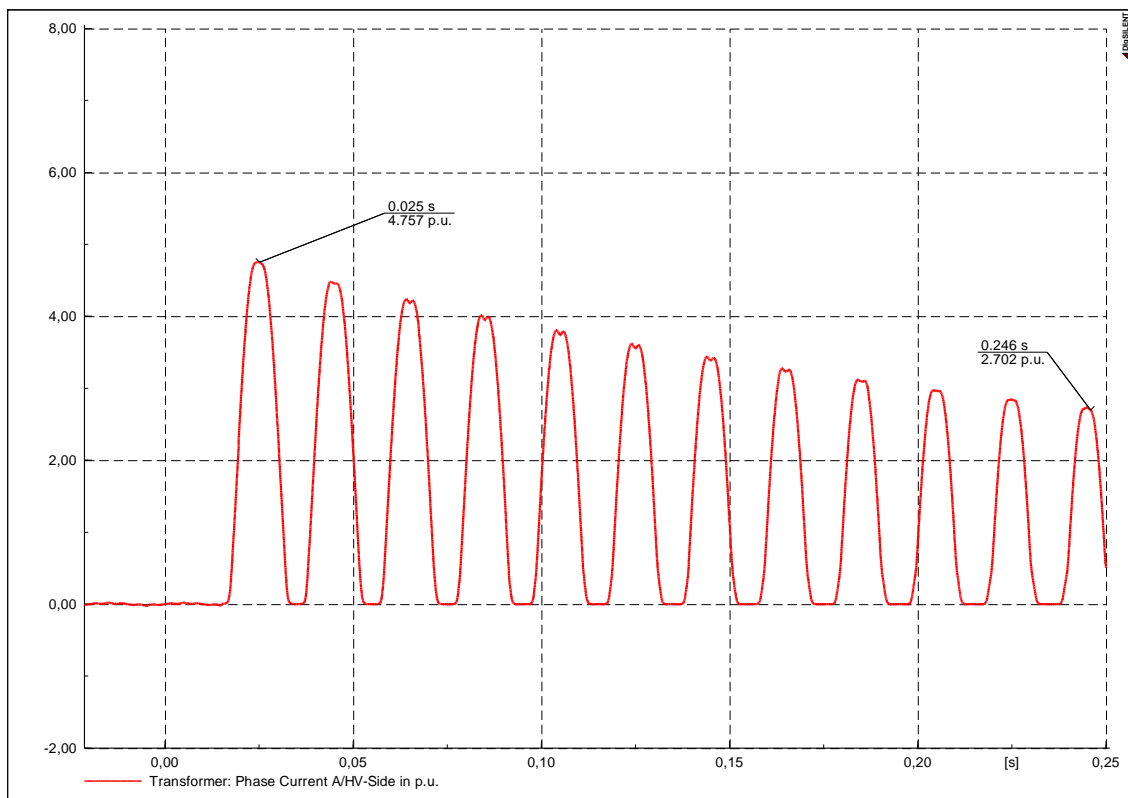
$$t_{isključenja} = 1 \text{ s}$$

Točka zasićenja	1,1 p.u.
Linearna reaktancija	700 p.u.
Reaktancija zasićenja	0,2 p.u.
EkspONENT zasićenja	15

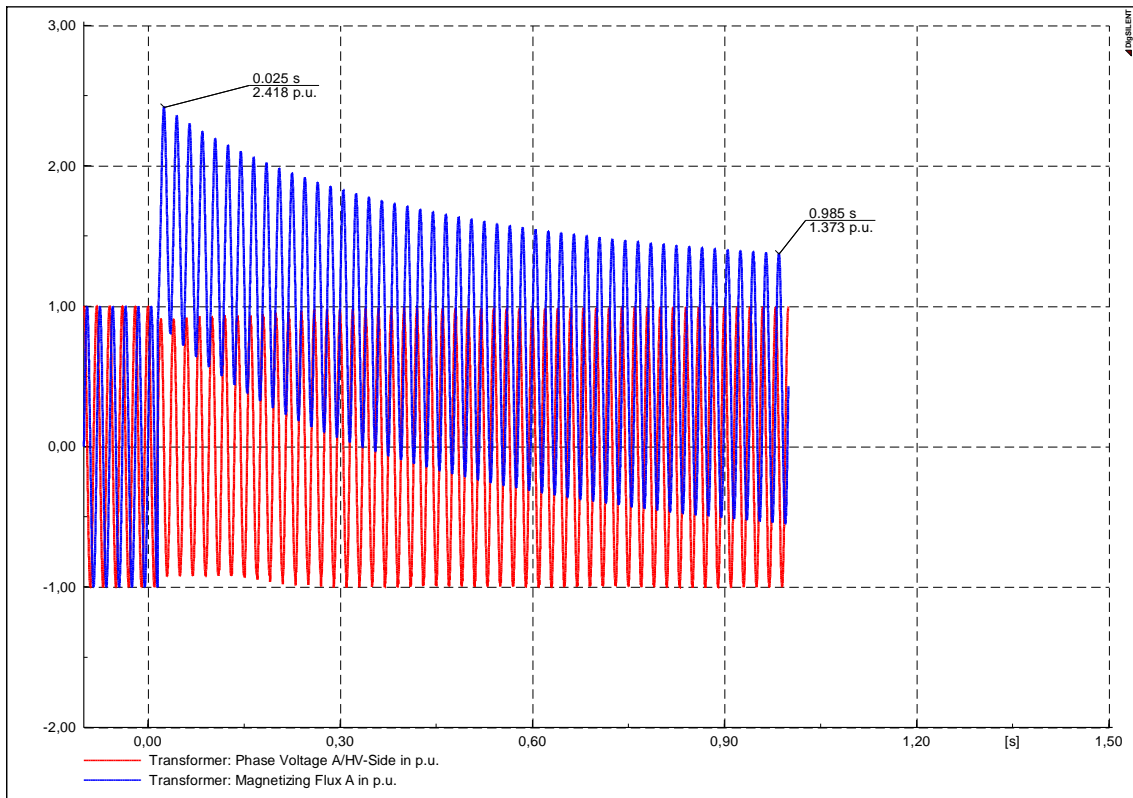
**Tablica 1** Vrijednosti za prvi slučaj simulacije



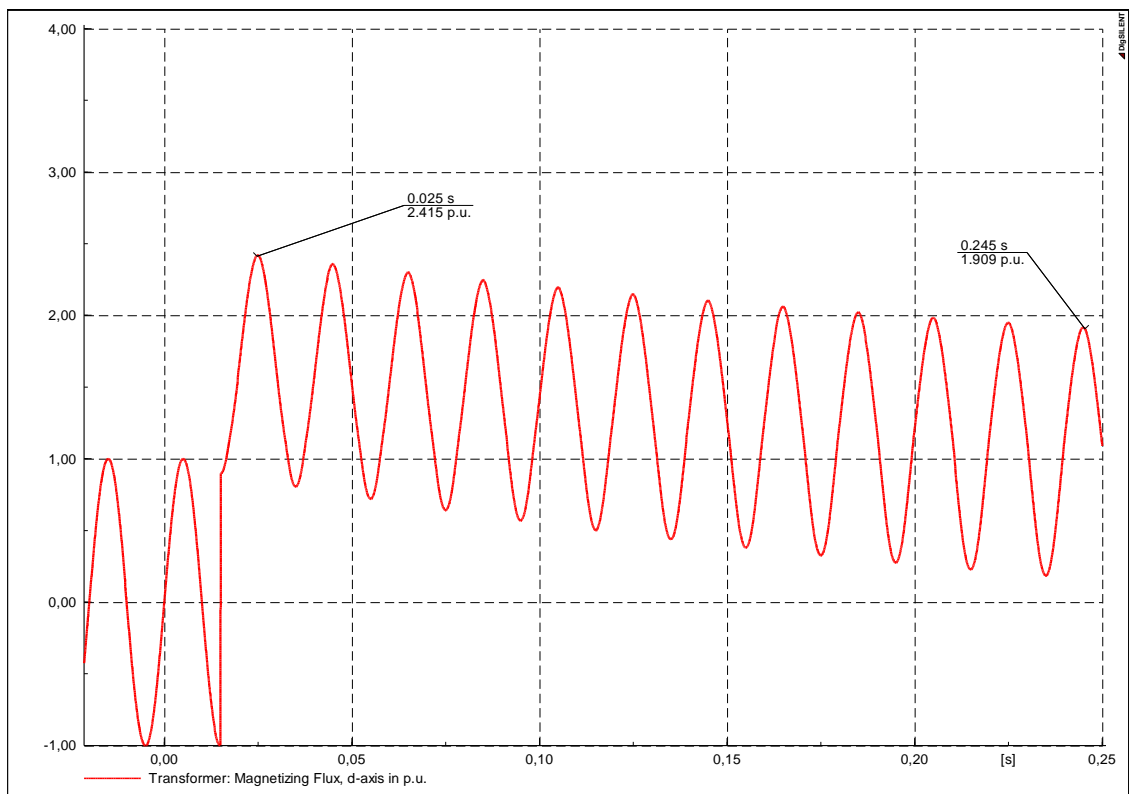
*Slika 4.1. Podešeni parametri i petlja histereze za prvi slučaj*



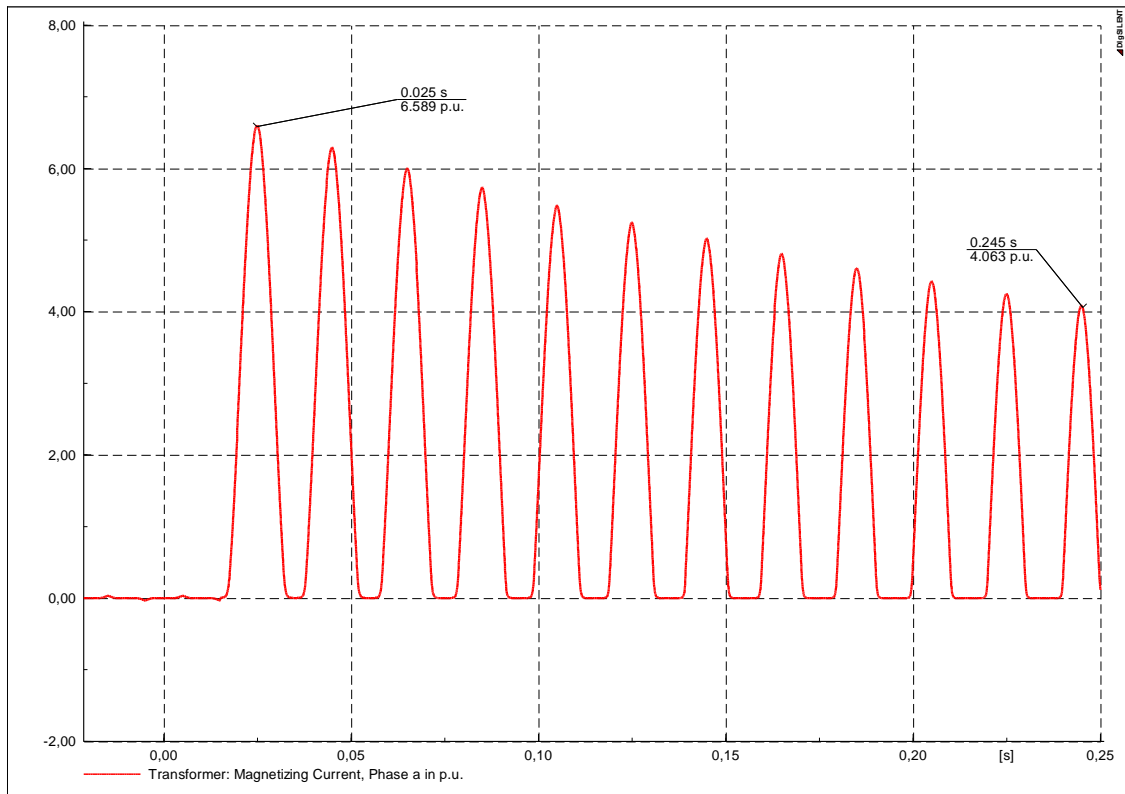
*Slika 4.2. Fazna struja (faza A) za prvi slučaj – visokonaponska strana*



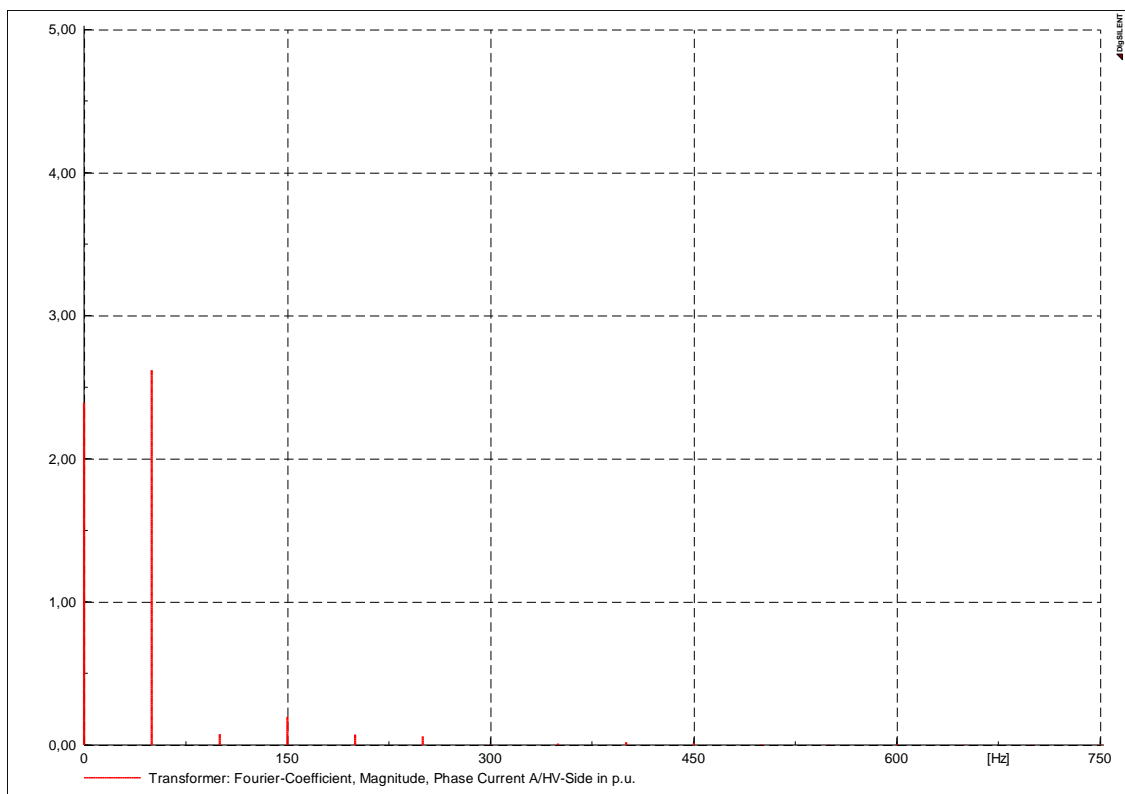
*Slika 4.3. Fazni napon (faza A) na visokonaponskoj strani i magnetski tok za prvi slučaj*



*Slika 4.5. Magnetski tok za prvi slučaj*

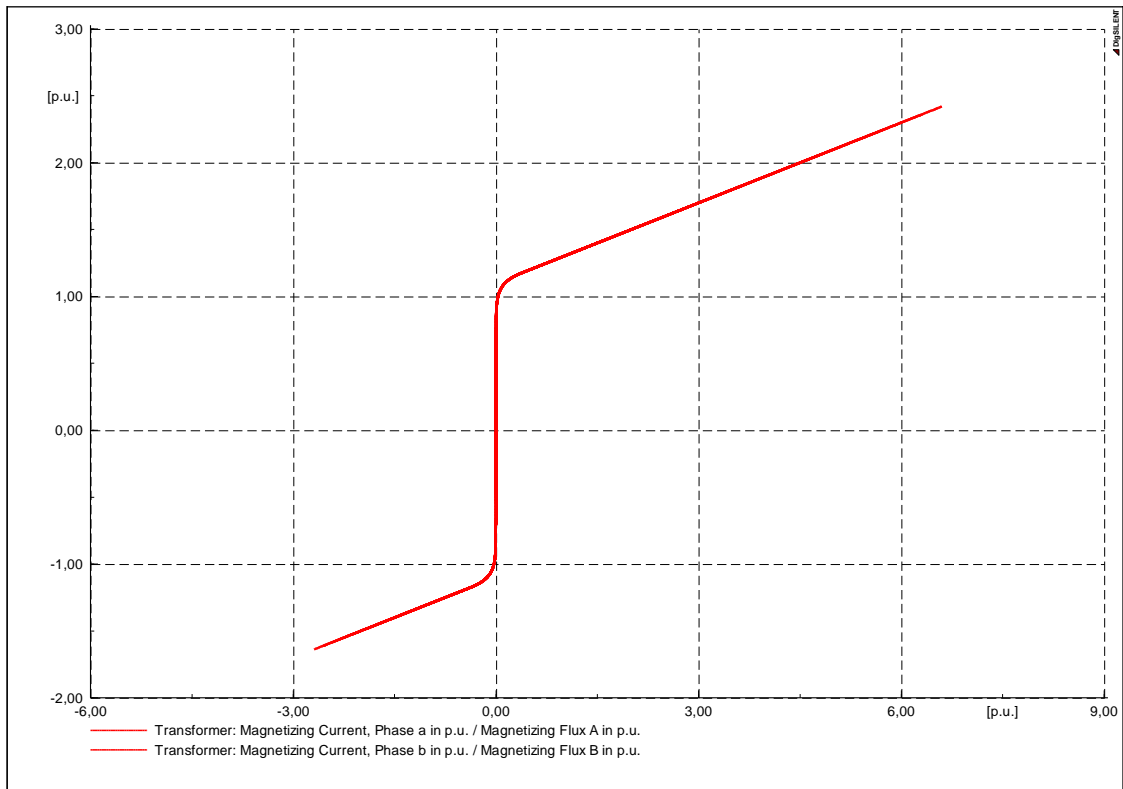


*Slika 4.6. Struja magnetiziranja za prvi slučaj*



*Slika 4.7. Fourierova analiza struje za prvi slučaj*





*Slika 4.8. Petlja histereze za prvi slučaj*

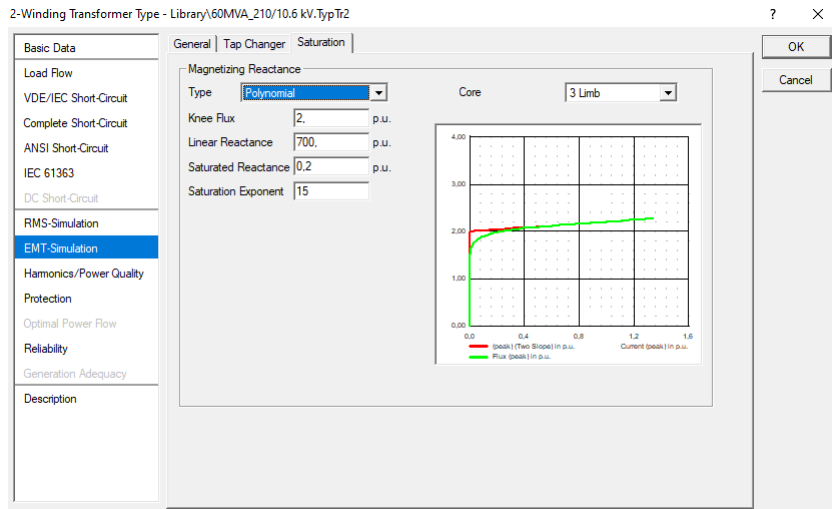
#### 4.4.2. DRUGI SLUČAJ

Prije početka druge simulacije promijenile su se vrijednosti točke zasićenja i vremena isključenja dok su ostale vrijednosti ostale iste, što je vidljivo u tablici 2. Nakon toga izvršila se elektromagnetska simulacija.

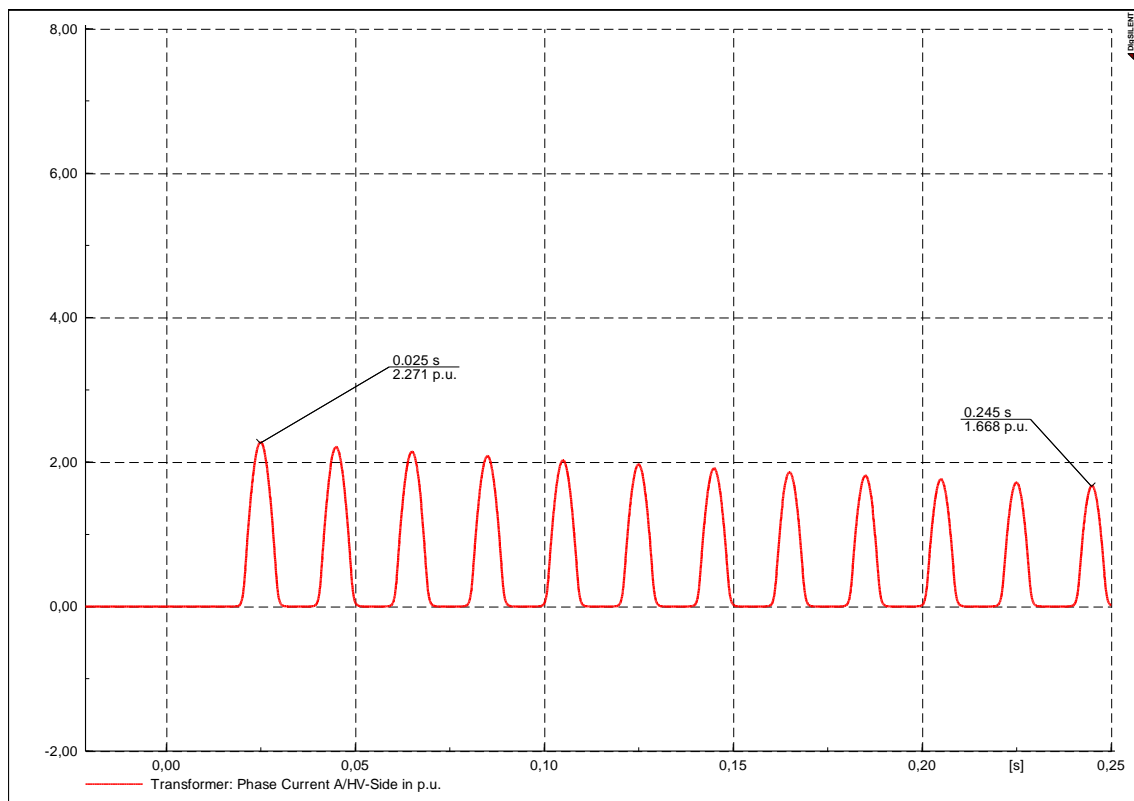
$$t_{\text{isključenja}} = 2 \text{ s}$$

Točka zasićenja	2 p.u.
Linearna reaktancija	700 p.u.
Reaktancija zasićenja	0.2 p.u.
EkspONENT zasićenja	15

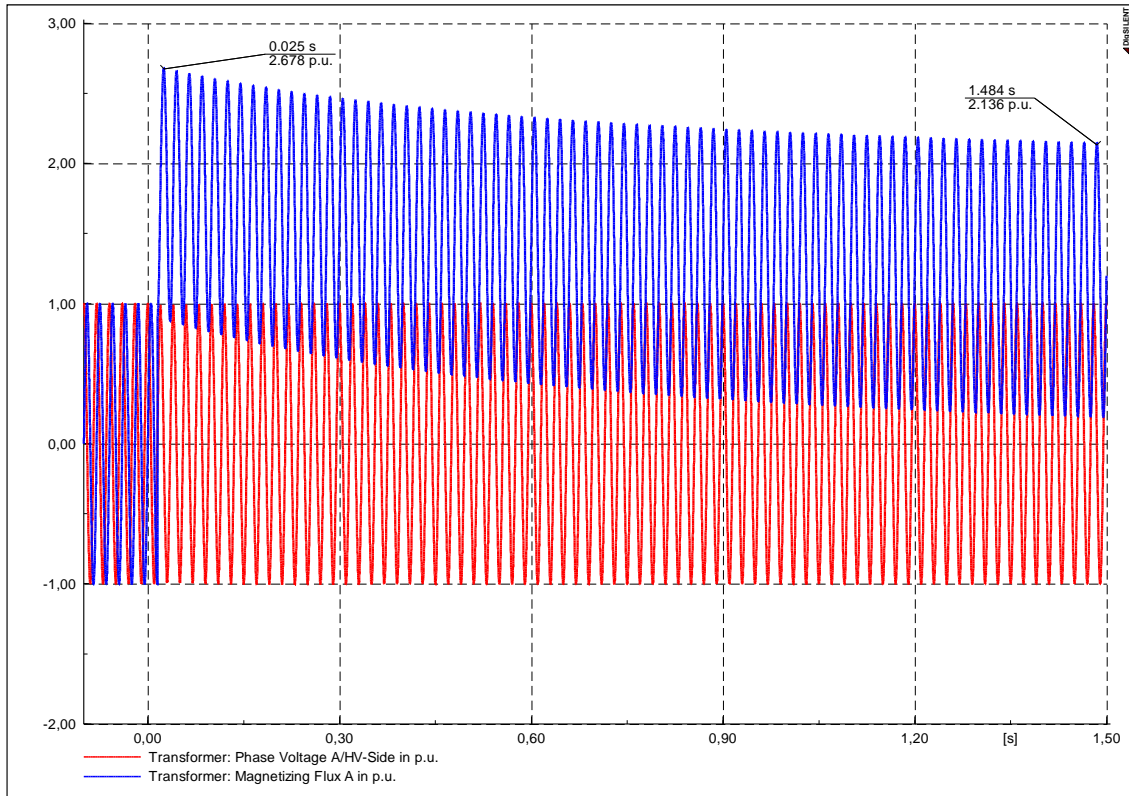
**Tablica 2** *Vrijednosti za drugi slučaj simulacije*



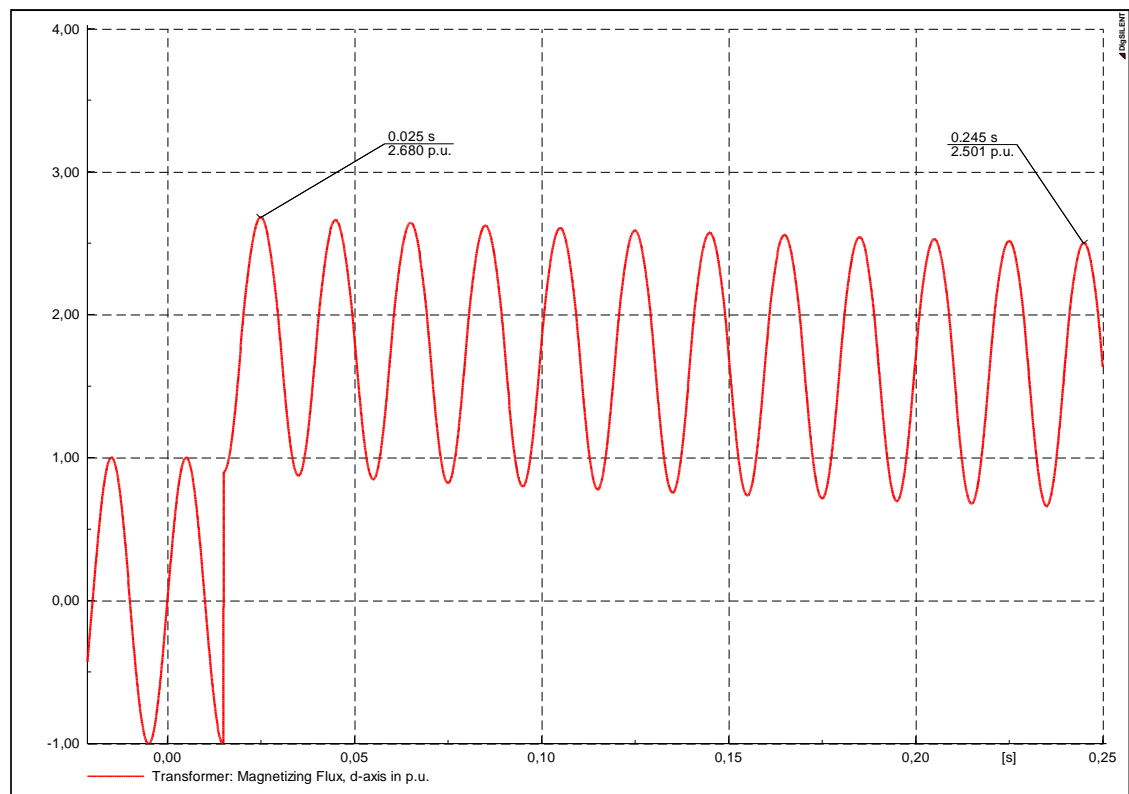
*Slika 4.9. Podešeni parametri i petlja histereze za drugi slučaj*



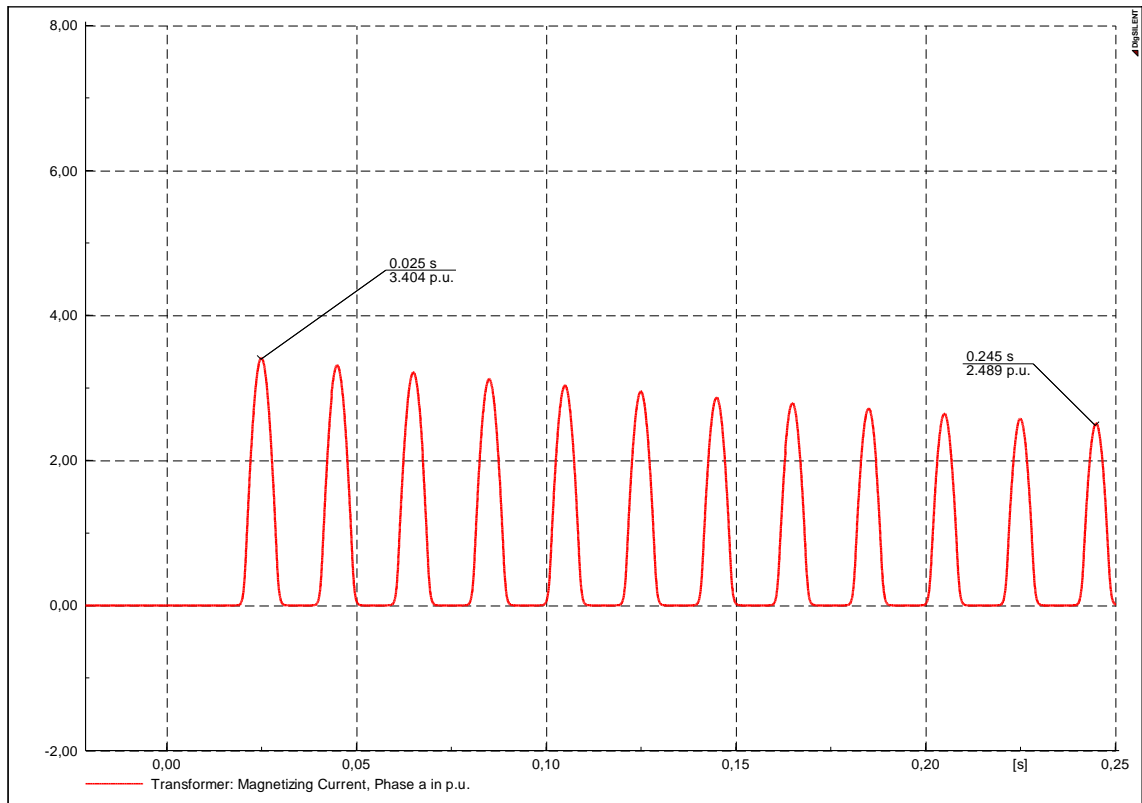
*Slika 4.10. Fazna struja (faza A) za drugi slučaj – visokonaponska strana*



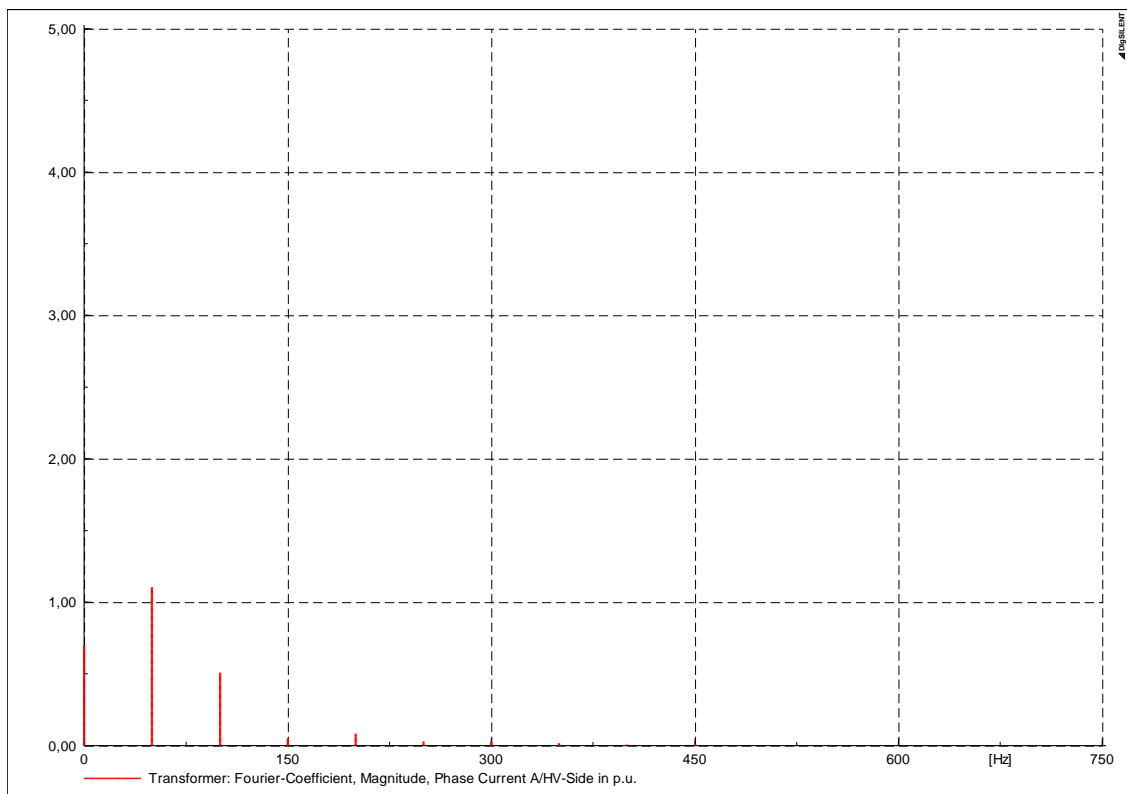
*Slika 4.11. Fazni napon (faza A) na visokonaponskoj strani i magnetski tok za drugi slučaj*



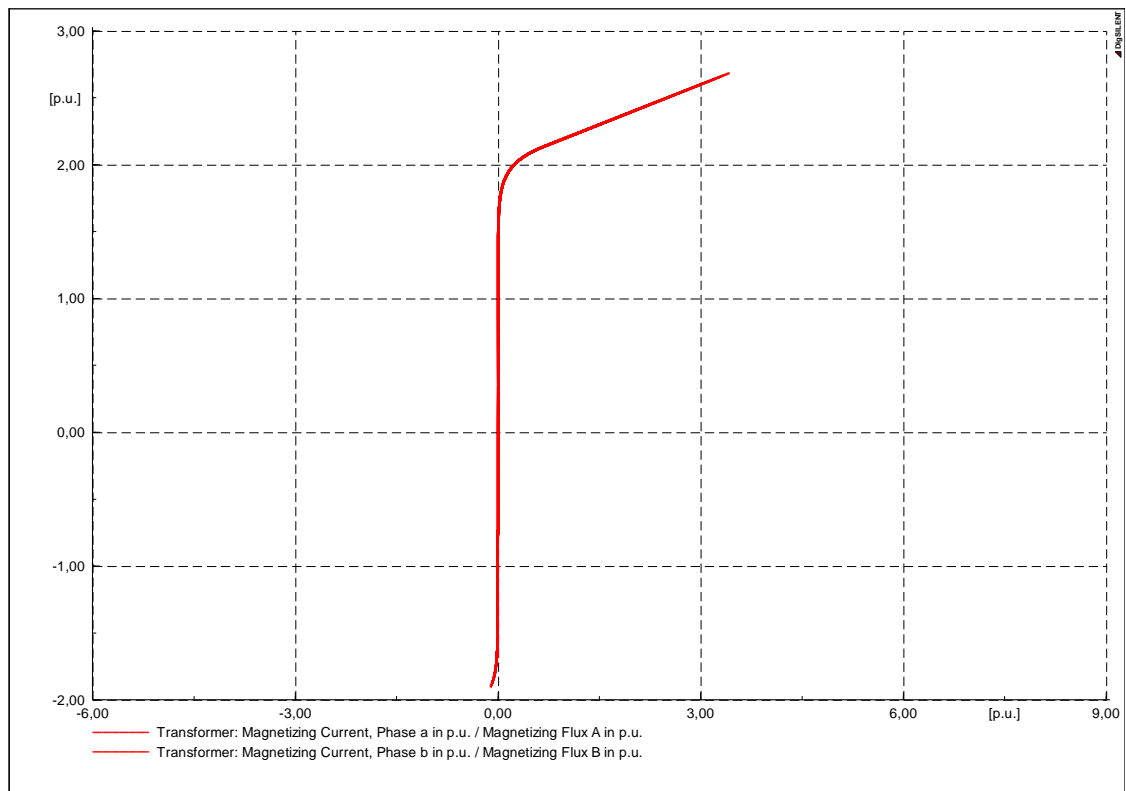
*Slika 4.12. Magnetski tok za drugi slučaj*



*Slika 4.13. Struja magnetiziranja za drugi slučaj*



*Slika 4.14. Fourierova analiza struje za drugi slučaj*



*Slika 4.15. Petlja histereze za drugi slučaj*

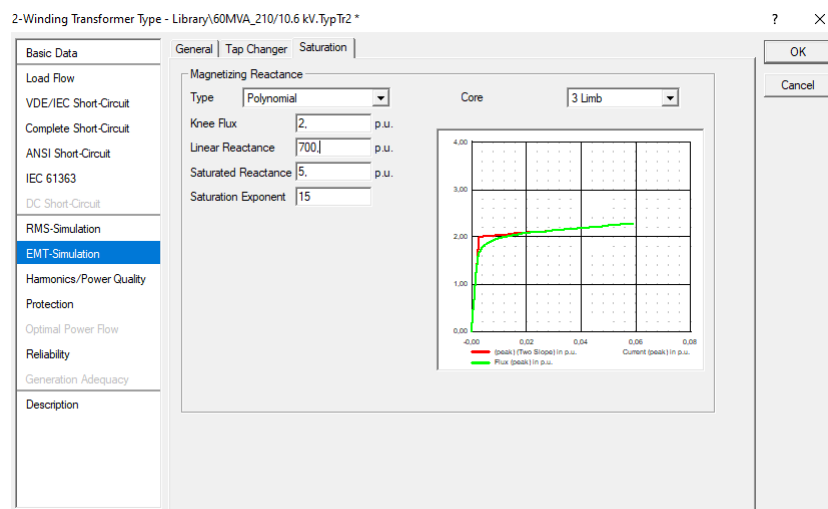
#### 4.4.3. TREĆI SLUČAJ

Za provedbu trećeg slučaja uneseni su novi podaci iz tablice 3, gdje su se promijenile vrijednosti reaktancije zasićenja i vremena isključenja, a sve druge vrijednosti su ostale iste kao u prethodnom slučaju. Također se nakon toga izvela elektromagnetska simulacija.

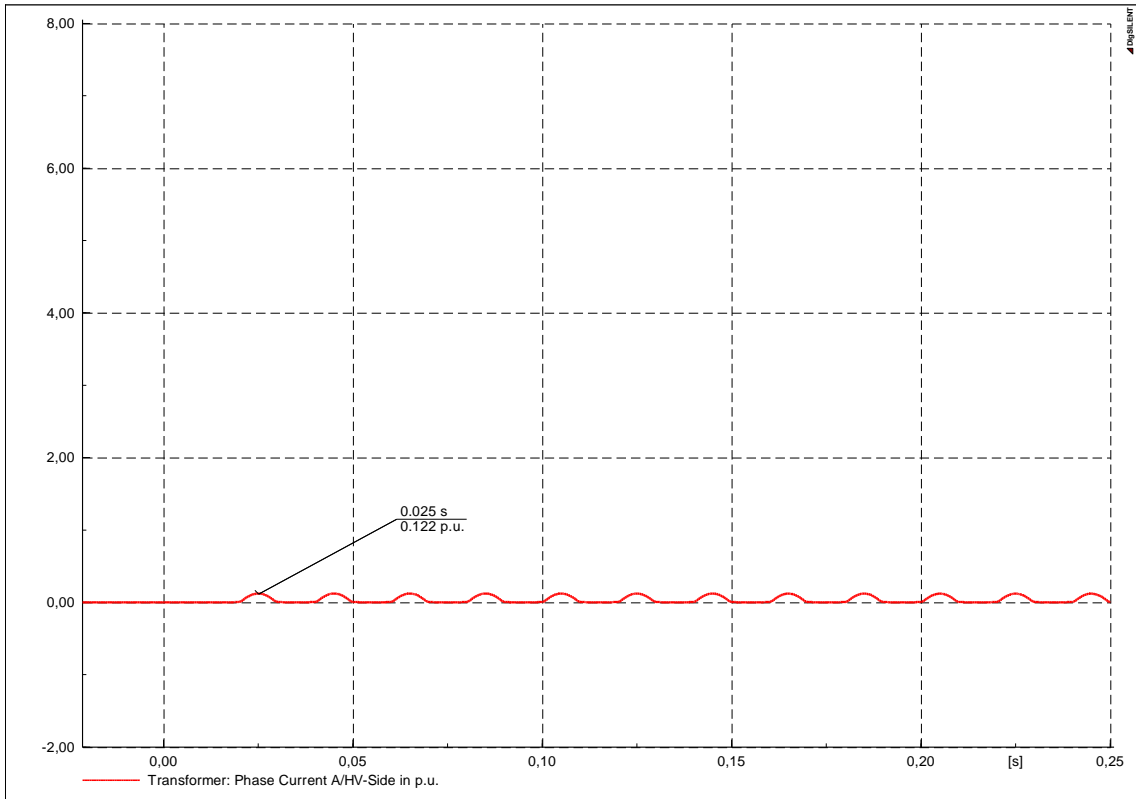
$$t_{\text{isključenja}} = 3 \text{ s}$$

Točka zasićenja	2 p.u.
Linearna reaktancija	700 p.u.
Reaktancija zasićenja	5 p.u.
EkspONENT zasićenja	15

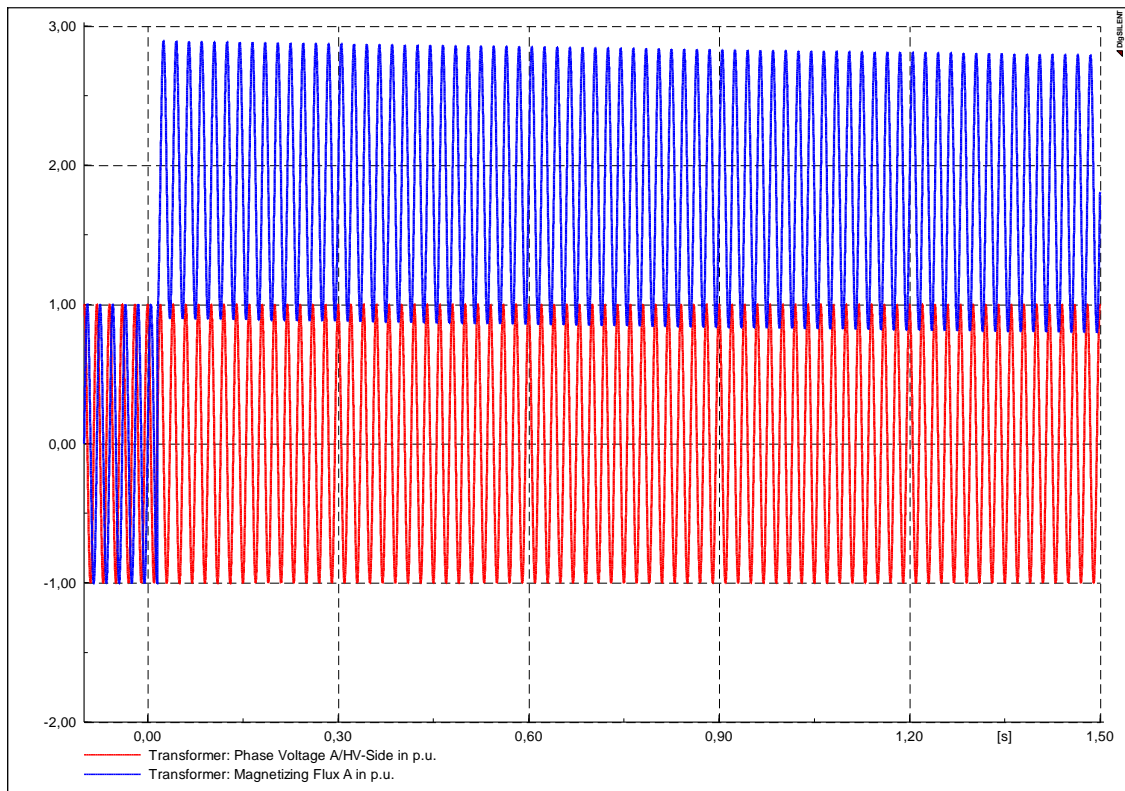
**Tablica 3** Vrijednosti za treći slučaj simulacije



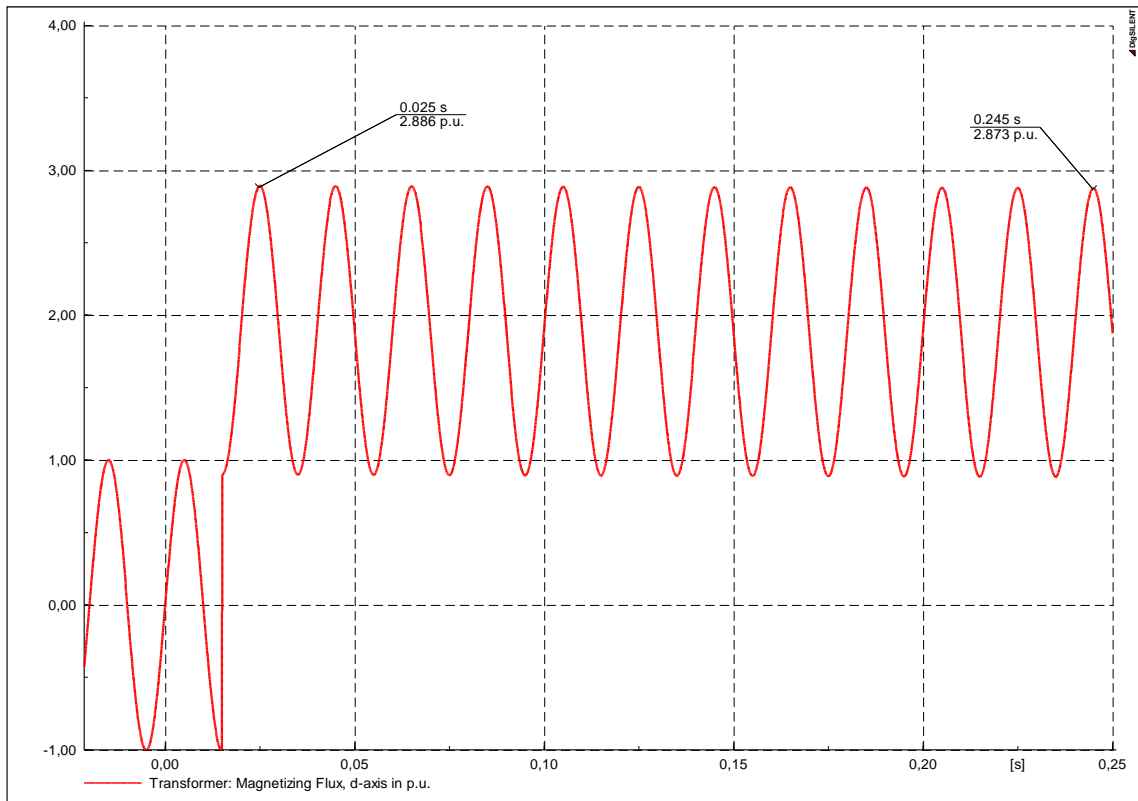
**Slika 4.16.** Podešeni parametri i petlja histereze za treći slučaj



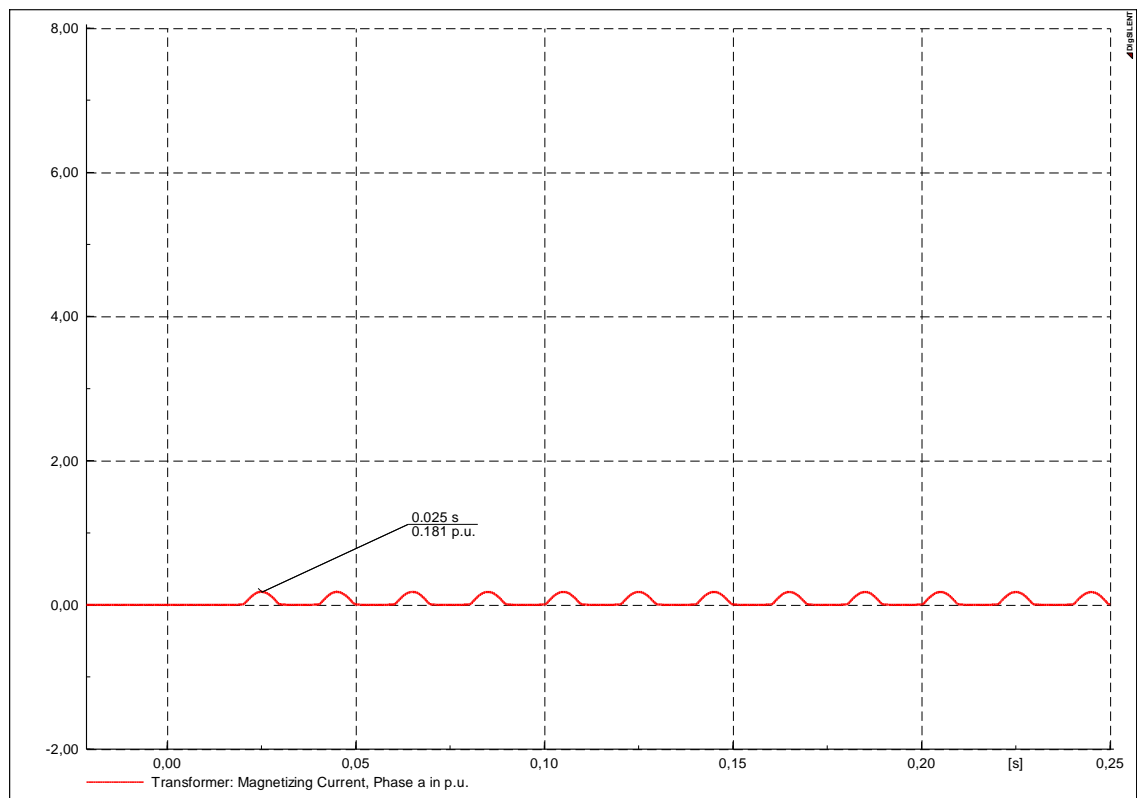
*Slika 4.17 .Fazna struja (faza A) za treći slučaj – visokonaponska strana*



*Slika 4.18. Fazni napon (faza A) na visokonaponskoj strani i magnetski tok za treći slučaj*

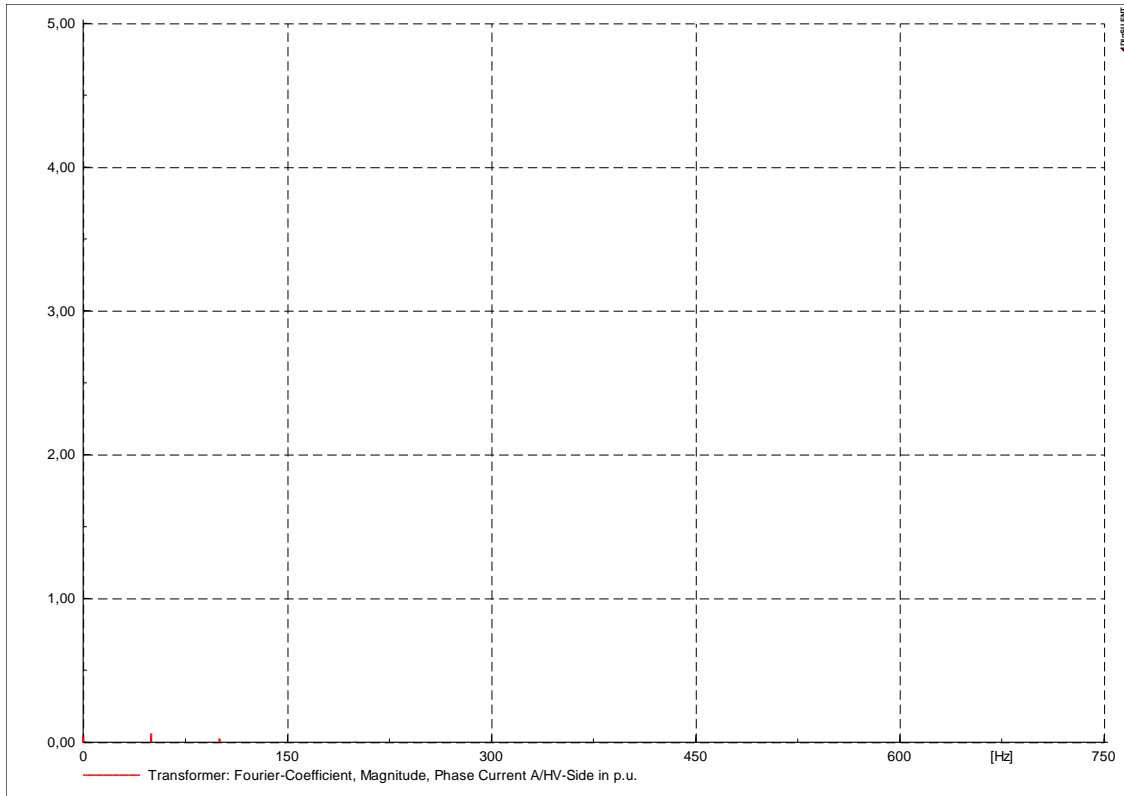


*Slika 4.19. Magnetski tok za treći slučaj*

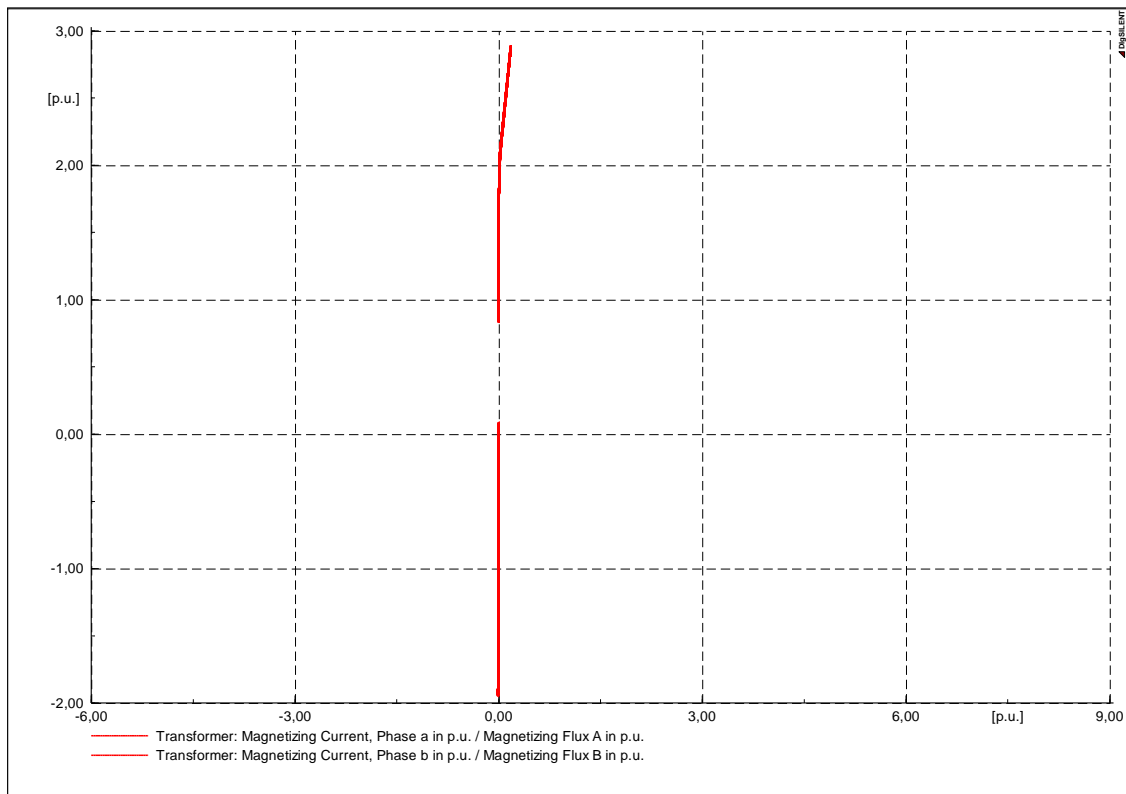


*Slika 4.20. Struja magnetiziranja za treći slučaj*





Slika 4.21. Fourierova analiza struje za treći slučaj



Slika 4.22. Petlja histereze za treći slučaj

## ZAKLJUČAK

Ispitivala se shema mreže koja se sastoji od izvora, dalekovoda, prekidača i transformatora. Mijenjala su se četiri parametra u mreži pri elektromagnetskoj simulaciji i dobila se različita petlja histereze u tri slučaja. Uska petlja histereze dobila se u sva tri slučaja pa to znači da se radi o mekom feromagnetskom materijalu. Ti materijali imaju malu vrijednost koercitivne jakosti magnetskog polja ( $H_c < 800 A/m$ ), a imaju veliki iznos relativne permeabilnosti. Također, zbog uske petlje histereze u svim navedenim slučajevima zaključuje se da su prisutni mali gubici.

## SAŽETAK

Petlja histereze je bitna karakteristika da bi se vidjelo kako se jezgra transformatora ponaša i kako bi reagirala na promjene u transformatoru. Bitno je znati od kojeg materijala je sastavljena jezgra te kojom metodom će se opisati petlja histereze. U radu su se opisale neke metode preko kojih se dobiva petlja histereze. Provodila se elektromagnetska simulacija mijenjajući četiri ključna parametra u transformatoru te se dobila petlja histereze za svaki navedeni slučaj.

**Ključne riječi:** transformator, jezgra, petlja histereze, elektromagnetska simulacija

## SUMMARY

The hysteresis loop is an essential feature to see how the transformer core behaves and to how it will respond to the changes in the transformer. It is important to know the material of the core which method will describe the hysteresis loop. In the paper, few methods by which the hysteresis loop is obtained are described. The electromagnetic simulation was performed changing four key parameters in the transformer and obtained hysteresis loop was presented for an each case.

**Key words:** transformer, core, hysteresis loop, electromagnetic simulation

## LITERATURA

- [1] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, A. J. Moses, and C. M. Arturi, “Static and dynamic hysteresis models for studying transformer transients,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2352–2362, 2011.
- [2] R. Matussek, C. Dzienis, J. Blumschein, and H. Schulte, “Current transformer model with hysteresis for improving the protection response in electrical transmission systems,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 570, 2014.
- [3] S. A. Mousavi, *Electromagnetic Modelling of Power Transformers for Study and Mitigation of Effects of GICs*. 2015.
- [4] R. Berglund, “Frequency Dependence of Transformer Losses Master of Science Thesis in the Programme Electric Power Engineering,” no. December, 2009.
- [5] S. A. Mousavi, *Electromagnetic Modelling of Power Transformers with DC Magnetization, Licentiate Thesis KTH*. 2012.
- [6] S. D. Cho, “Parameter Estimation for Transformer Modeling,” *PhD Thesis*, no. December, 2002.
- [7] J. J. Winders, *Transformers Principles and Applications*. 2002.
- [8] O. Technologies, “Real-Time Power System Simulation : EMT vs . Phasor,” no. September, pp. 1–15, 2016.
- [9] P. Grid, P. Tech, and D. Version, “during the energizing of the Public Grid after a major Calculation of Transformer Inrush Currents occurring during the Energizing of the Public Grid after a major Black Out,” no. 2005, 2019.
- [10] Lumencandela, s interneta, <https://courses.lumenlearning.com/boundless-physics/chapter/magnetism-and-magnetic-fields/>
- [11] ResearchGate, s interneta, [https://www.researchgate.net/publication/237299063\\_Magnetic\\_properties\\_of\\_stainless\\_steels\\_at\\_room\\_and\\_cryogenic\\_temperatures/figures](https://www.researchgate.net/publication/237299063_Magnetic_properties_of_stainless_steels_at_room_and_cryogenic_temperatures/figures)
- [12] DIgSILENT, s interneta, <https://www.digsilent.de/en/>

- [13] LinkedIn, s interneta, <https://www.linkedin.com/pulse/transients-power-system-hasan-tariq/>
- [14] IEEE Xplore Digital Library, s interneta, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6539669>
- [15] ScienceDirect, s interneta, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/saturation-exponent>

## **ŽIVOTOPIS**

Ena Grahovac rođena je u Osijeku 17. rujna 1996.godine. Živi u Osijeku gdje je i pohađala osnovnu školu. Nakon završene osnovne škole upisuje Jezičnu gimnaziju u Osijeku.

Polaganjem mature 2015.godine i završetkom srednje škole, upisuje preddiplomski sveučilišni smjer elektrotehnike na nekadašnjem Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, sada Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera. Prije upisa u drugu godinu preddiplomskog smjera elektrotehnike odabire smjer elektroenergetika.