

# Stanje energetskeg transformatora nakon prekida faznog vodiča u 10 kV mreži

---

**Pirić, Filip**

**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:200:981559>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike**

**STANJE ENERGETSKOG TRANSFORMATORA  
NAKON PREKIDA FAZNOG VODIČA NA 10 kV  
MREŽI**

**Završni rad**

**Filip Pirić**

**Osijek, 2019**

## Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Zadatak završnog rada .....</b>	<b>2</b>
<b>2. TRANSFORMATORI .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Povijest transformatora.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Općenito o transformatorima.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Princip rada i stanja transformatora .....</b>	<b>8</b>
<b>2.4. Kvarovi transformatora .....</b>	<b>11</b>
<b>3. SIMULACIJE U MATLABU .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Transformator u normalnom stanju rada pod opterećenjem .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. Prazni hod transformatora.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Stanje transformatora nakon prekida faznog vodiča .....</b>	<b>24</b>
<b>3.4. Stanje transformatora nakon prekida faznog vodiča u praznom hodu .....</b>	<b>31</b>
<b>4. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>37</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>38</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>39</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>39</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>40</b>

## 1. UVOD

Transformator je u današnje vrijeme izrazito potreban. Naime, gotova sva elektronika koja nas okružuje sadrži transformatore. Kako je potreban za kućanstva tako i za industriju te bi bez transformatora život u današnje vrijeme bio nezamisliv. Raznolika je primjena energetskih transformatora te se koristi u prijenosnim i distribucijskim mrežama elektroenergetskog sustava, a rabi se za razdiobu, potrošnju i prijenos električne energije. Transformator se dizajnira i projektira tako da izdrži sva naprezanja, koja mogu biti mehanička, električna i toplinska, tijekom svog životnog vijeka. Do povećanih mehaničkih i toplinskih naprezanja dolazi pojavom praćenim većim strujama u odnosu na nazivne to jest nominalne struje, kao što su u stanja kada je transformator u praznom hodu ili kada dođe do kratkog spoja. Također do toplinskih naprezanja dolazi i kada je transformator pod opterećenjem. U postrojenjima i pogonima često dolazi do kvarova. Primjer jednog takvog kvara kojim će se baviti ovaj završni rad je prekid faze transformatora.

Cilj ovog rada je opisati rad energetskog transformatora u normalnom stanju za slučajeve s teretom i bez tereta (prazni hod). Potom će se izbaciti jedna faza u napajanju pri čemu ne dolazi do djelovanja zaštite te će se promatrati što će se dobiti. Također modelirat će se energetski transformator 10/0,4 kV i analizirati stanje na niskonaponskoj strani.

U poglavlju 2. obrađena je povijest transformatora, općenito o transformatorima, princip rada i stanja transformatora, opterećenja i kvarovi transformatora. U poglavlju 3. je obrađena simulacija više stanja transformatora u programu Matlab u kojemu se promatralo stanje transformatora u normalnom stanju rada kada je na sekundaru priključeno trošilo te stanje rada kada je transformator u praznom hodu. Zatim, je prekinuta jedna faza na primaru te se promatralo kako se ponašaju naponi i struje kada je na sekundar transformatora priključen teret i kada je sekundar transformatora u praznom hodu. Također će se dobivena mjerenja usporediti s realnim mjerenjima obavljenim u Elektri, Slavonski Brod na transformatoru marke Končar.

### 1.1 Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je opisati mogućnost prekida faznog vodiča na 10 kV mreži pri kojemu ne dolazi do djelovanja zaštite. Također će se modelirati energetski transformator 10/0,4 kV i analizirati stanje na niskonaponskoj strani. Analizirat će se nekoliko karakterističnih slučajeva tereta i struja kroz nulti vodič.

## 2. TRANSFORMATORI

### 2.1 Povijest transformatora

Transformator je uređaj koji prenosi električnu energiju iz jednog sustava u drugi sustav istih frekvencija putem induktivno spojenih vodiča to jest zavojnica transformatora.

Svojstvo indukcije otkrili su, istovremeno, ali odvojeno Joseph Henry i Michael Faraday, 1830-ih godina.

U vrijeme njihova otkrića električni uređaji istosmjerne struje prema [1] imali su mali doseg (prijenos električne energije niskim naponom istosmjerne struje).

DC napajanje uglavnom se koristilo 1880-ih godina, a preko njega teško je bilo povećati doseg. Za povećanje dosega bilo je potrebno povećanje prijenosnog napona, no istosmjerna struja to nije omogućavala. Visoki napon DC nemoguće je smanjiti kako bi se mogao koristiti na kućnim žaruljama, to jest nemoguće je povećati DC napon na uređajima. Kako bi se gore navedeni problemi riješili ključno je bilo otkriće elektromagnetske indukcije, odnosno transformatora.

1836. godine vlč. Nicholas Callan [2] izumio je induksijsku zavojnicu, te ju je 1876. Pavel Yablochkov iskoristio u svom sustavu rasvjete. U razdoblju od 1880. do 1882. godine Sebastian Ziani de Ferranti dizajnira jedan od najranijih izmjeničnih sustava napajanja zajedno sa Williamom Thomsonom, te su stvorili rani transformator.

William Stanely 1886. godine, izgradio prvi pouzdani komercijalni transformator te je iste godine koristio svoje transformatore za elektrifikaciju središta Velikog Barringtona. Ovo je bila prva demonstracija cjelovitog izmjeničnog sustava napajanja izmjeničnom strujom. Nadalje, George Westinghouse, Albert Schmid, Oliver Shallenberger i Stanely napravili su transformator jeftinim za proizvodnju te jednostavnim za uporabu.

Raniji oblici transformatora korišteni su u Austro-Ugarskoj 1878-1880-ih, a 1882. nadalje u Engleskoj. Godine 1891. majstor Mihail Dobrovsky dizajnirao je i demonstrirao svoje trofazne transformatore na Elektrotehničkoj izložbi u Frankfurtu u Njemačkoj.

## 2.2. Općenito o transformatorima

Rad transformatora zasniva se na Faraday-Lenzovom zakonu elektromagnetske indukcije prema kojem vremenska pojava magnetskog toka ulančanog vodljivom petljom inducira u petlji napon, dok struja uzrokovana tim naponom stvara magnetski tok koji se opire promjeni toka koji je inducirao napon. Prema broju namota razlikuju se dvonamotni i višenamotni transformatori, dok prema broju faza razlikujemo jednofazne i višefazne transformatore.

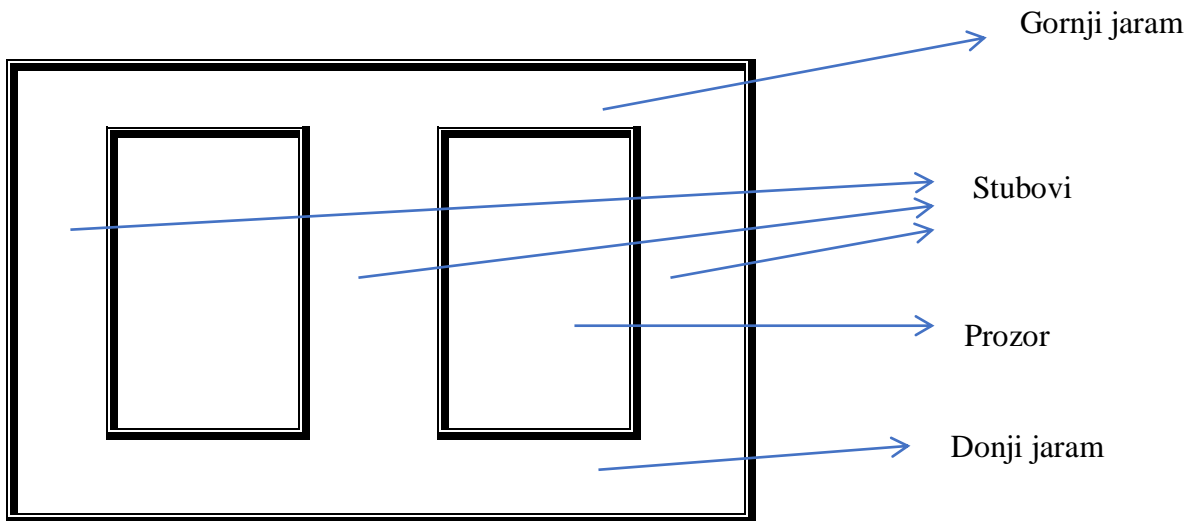
Transformatori općenito imaju brojne funkcije, a najznačajnija je ekonomična, pouzdana i sigurna proizvodnja te prijenos i distribucija električne energije. Primjenom transformatora postiže se smanjenje gubitaka prijenosa u električnoj energetici. Električna energija koja se proizvodi u elektranama transportira se na velike udaljenosti pomoću dalekovoda. Za vrijeme tog transporta energije javljaju se gubici koji nastaju zbog otpora dalekovoda. Postoje gubici energije i gubici (padovi) napona. Gubici napona se nadoknađuju pomoću transformatora u trafostanicama.

Dijelovi transformatora mogu se podijeliti na aktivne i pasivne dijelove. Aktivni dijelovi transformatora su oni koji sudjeluju u direktnoj pretvorbi električne energije. U njih spadaju zavojnice koje su namotane na željeznu jezgru. Pasivni dijelovi transformatora pomažu pri pretvorbi energije. U njih spadaju kondenzator, termometar, kotao, transformatorsko ulje te poklopac kotla s provodnim izolatorom.

Osnovu transformatora čine željezna jezgra i namoti. Razlikujemo dvije vrste namota, a to su primarni i sekundarni namoti. Primarni namot spojen je na električni izvor, dok sekundarni namot napaja trošilo naponom koji se stvara elektromagnetskom indukcijom. Namoti se uglavnom izrađuju od bakra zbog njegove dobre električne vodljivosti i male električne otpornosti. Općenito se koriste dva oblika presjeka žice, okrugli i pravokutni. Za manje presjeke vodiča najčešće se koristi okrugli, a za veće pravokutni. Namoti se postavljaju tako da se onaj namot koji ima manji napon postavlja bliže jezgri kako ne bi došlo do proboja izolacije.

Željezna jezgra ima dvije glave uloge, a to su elektromagnetska, da se kroz nju stvara magnetski tok, i mehanička, da nosi namot. Sastoji se od izoliranih hladno valjanih limova velike magnetske vodljivosti i malih specifičnih gubitaka. Magnetski tok međuinstrukcije prolazi kroz željeznu jezgru te se tako omogućuje smanjenje rasipanja magnetskih silnica. Naime željezo je najbolji magnetski vodič pa željezna jezgra služi za vođenje silnica magnetskog polja. Jezgra mora biti zatvorenog oblika a da se izbjegnu neželjene vrtložne struje sastoji se od više limova međusobno izoliranih. Transformatorski limovi koji tvore jezgru slažu se tako da zračni raspor bude što manji, a magnetska

svojstva najpovoljnija. Željezna jezgra se sastoji od stupova koji nose namot nižeg napona i namot višeg napona, gornjeg i donjeg jarma koji povezuju stupove, a njihova funkcija je zatvaranje magnetskog toka. Prostor jezgre je prostor između stupova i jarmova, a koristi se za smještaj namota.



*Slika 2.2.1. Dijelovi željezne jezgre*

Željezna jezgra može biti različitih oblika pa razlikujemo:

Jezgrasti – dvostupni

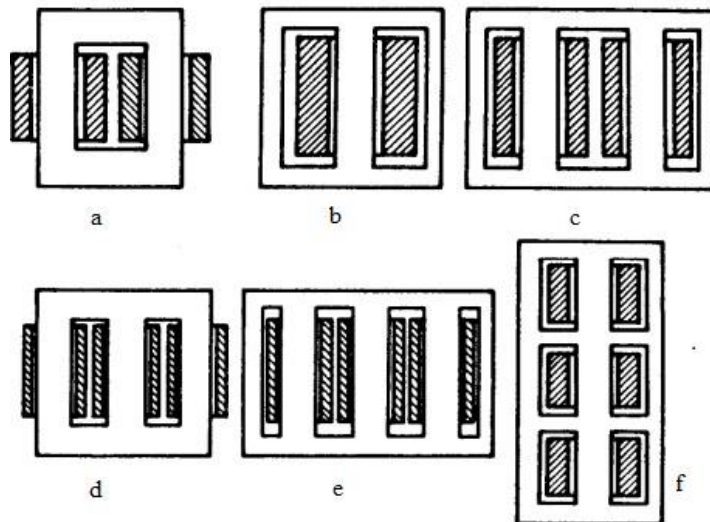
Oklopljeni

Oklopljeni (četverostupni)

Jezgrasti (trostupni)

Oklopljeni (peterostupni)

Oklopljeni (američki tip)



Slika 2.2.2. Oblici željezne jezgre [3]

Kod trofaznih transformatora svi se namoti stavljaju na jednu magnetsku jezgru. Kao što je gore navedeno postoje različiti oblici jezgara, no kod trofaznih transformatora koriste se jezgrasti, ogrnuti i peterostupni jezgrasti oblik.

Jezgrasti oblik najčešće se koristi zbog uštede materijala, a time i veće ekonomičnosti budući da je u srednjem stupu potrebno manje amperzavoja za magnetiziranje, nego kod vanjskih stupova. Ogrnuti oblik se vrlo rijetko koristi zbog prevelikog troška, no njegova prednost je ta da su struje magnetiziranja simetrične u sva tri namota. Zbog toga ogrnuti oblik zahtjeva da se na srednjem svitku zamjene krajevi što mu omogućava da svi dijelovi jarma vode isti magnetski tok.

Transformatorsko ulje zbog svoje velike specifične topline i visoke probojne čvrstoće služi kao rashladno i izolacijsko sredstvo. Na ulju treba pratiti kemijske promjene kako bi se vrijeme starenja ulje povećalo jer starenje ulja utječe na odvođenje topline. Kemijske promjene ulja, količina vlage i nečistoće također mogu utjecati na probojnu čvrstoću. Višak vlage se otklanja zagrijavanjem, a nečistoće se uklanjaju centrifugiranjem i filtriranjem. Strujanje ulja transformatora se može upravljati pomoću pumpi ili se može kretati prirodnim tokom. Postoje dvije vrste transformatorskog ulja:

- a) Transformatorsko ulje na bazi parafina
- b) Transformatorsko ulje na bazi nafte

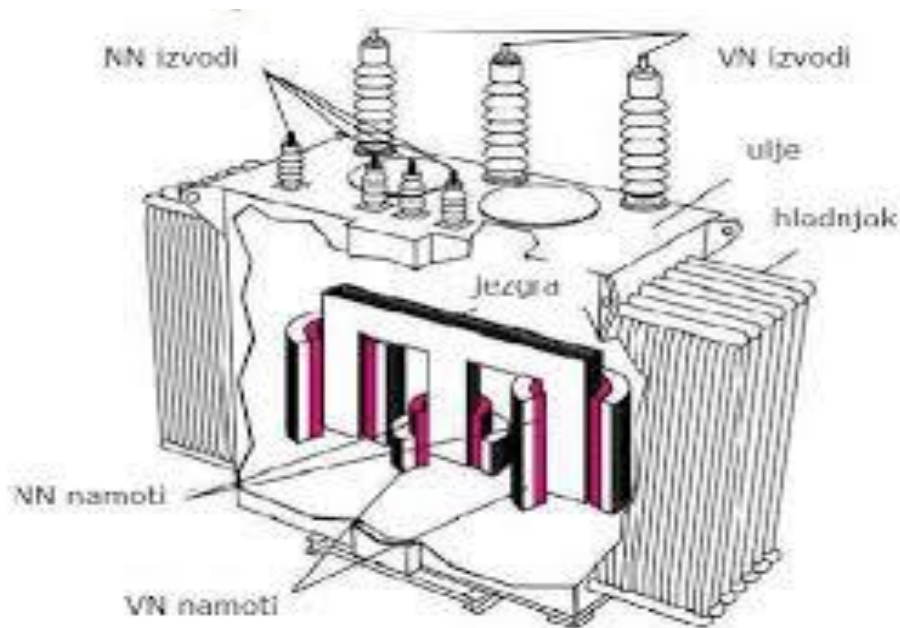
Nafta se lakše oksidira od parafinskog ulja. Produkt oksidacije je mulj koji se u naftnom ulju taloži na dnu transformatora pa ne ometa sustav hlađenja transformatora. Parafinsko ulje ima manju stopu



oksidacije od naftnog ulja pa se tako netopljiv mulj taloži na dnu spremnika koji djeluje kao zapreka pri hlađenju transformatora. Iako je naftno ulje bolje od parafinskog, parafinsko ulje se i dalje koristi u mnogim zemljama zbog visoke dostupnosti. Parametre transformatorskog ulja možemo podijeliti na električne parametre, kemijske parametre i fizikalne parametre.

Pod električne parametre svrstavamo: dielektričnu čvrstoću, specifični otpor i faktor dielektrične disipacije.

Kemijski parametri su sadržaj vode, kiselost i sadržaj mulja, dok u fizikalne parametre ubrajamo viskoznost, plamište i točke tečenja.



*Slika 2.2.3. Dijelovi transformatora [4]*

### 2.3. Princip rada i stanja transformatora

Princip rada transformatora proizlazi iz zakona elektromagnetske indukcije. To znači da kada kroz primar teče naizmjenična struja koja stvara promjenjivo magnetsko polje, u sekundaru se stvara indukcijska elektromotorna sila.

Na primarni namot se priključuje izvor izmjeničnog napona  $U_1$ , te kroz njega proteče struja  $I_1$ . Ona zatim u jezgri stvara izmjenični magnetski tok  $\Phi$ , te se zbog promjene magnetskog toka u sekundarnom namotu inducira napon  $E_2$ . U slučaju da je sekundarni krug otvoren, to jest na njemu nije priključeno trošilo, te zbog toga njime neće poteći stroja  $I_2$ , napon na stezaljkama iznositi će:

$$U_2 = E_2$$

U slučaju kada se na sekundarni namot transformatora priključi trošilo, to jest strujni krug je zatvoren, kroz njega će poteći struja  $I_2$ .

Osnovne naponske jednadžbe transformatora ukazuju da se u svakom od tih napona, na primaru i sekundaru, inducira napon koji je proporcionalan broju namota.

Jednadžba za inducirani napon primara je:

$$E_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} \times \pi \times \Phi_m \times f \times N_1$$

Jednadžba za inducirani napon sekundara je:

[5]

$$E_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \times \pi \times \Phi_m \times f \times N_2$$

U prethodnim jednadžbama  $\Phi_m$  označava magnetski tok,  $f$  označava frekvenciju,  $N_1$  broj zavoja primara, a  $N_2$  broj zavoja sekundara.

Prva formula glavne jednadžbe dobiva se tako da se pokrate konstante u primarnom i sekundarnom induciranom naponu te ta formula glasi: [6]

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

Druga formula glavne jednadžbe proizlazi iz pretpostavke da transformator nema gubitaka to jest da su prividne ulazne i izlazne snage transformatora jednake pa zbog toga vrijedi:

$$U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$$

Pena tome se dobiva omjer napona i struja iz čega dobivamo formulu koja glasi:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

Prema formuli struje i naponi su proporcionalni pa na posljertku se dobiva i druga glavna jednadžba koja glasi:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Opće naponske jednadžbe transformatora su sljedeće: [7]

$$u_1 = R_1 \times i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = R_1 \times i_1 + L_1 \times \frac{di_1}{dt} - L_{12} \times \frac{di_2}{dt}$$

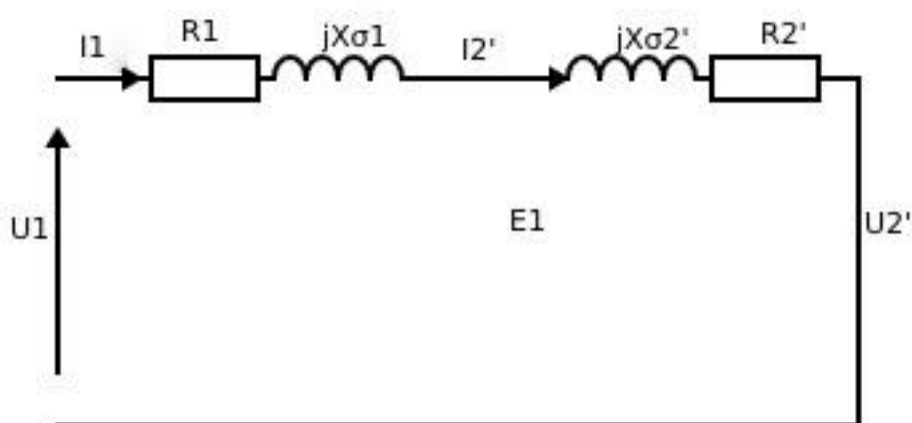
$$-u_2 = -Ri_2 = R_2 \times i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} = R_2 \times i_2 + L_2 \times \frac{di_2}{dt} - L_{12} \times \frac{di_1}{dt}$$

Transformator se promatra u sljedećim stanjima: prazni hod (transformator bez tereta), kada je transformator opterećen i kratki spoj transformatora.

Prazni hod na sekundaru transformatora je stanje u kojemu je sekundarna strana transformatora neopterećena odnosno na sekundarnu stranu nije ništa spojeno dok je primarni namot spojen na izvor izmjeničnog napona. U stanju praznog hoda transformatora struja prolazi kroz primarni namot, a ta struja zove struja praznog hoda. Ona je malog iznosa pa su iz tog razloga padovi napona i gubici u primaru zanemarivi. Prazni hod služi da se izmjeri snaga  $P_0$  koja odgovara  $P_{Fe}$  gubicima u željezu.

U ovom stanju transformatora se mjeri struja primara odnosno struja praznog hoda, napon na sekundaru i snaga transformatora. [6].

Kratki spoj transformatora je stanje u kojemu je primar spojen na izmjenični izvor napona, a stezaljke na sekundaru su kratko spojene te struju koja teče kroz namot sekundara nazivamo struja kratkog spoja. Napon na primaru se zove napon kratkog spoja te ga označavamo sa  $U_k$ . Napon kratkog spoja poprilično je malen u odnosu na nazivni napon  $U_n$  tako da se gubici u željeznoj jezgri uslijed pomalo promijenjenog napona mogu zanemariti. Stoga se očitavanja s vatmetra mogu smatrati jednakim kao i gubici u bakru. Zbog malog napona iznos struje magnetiziranja kod pokusa kratkog spoja će biti zanemariv.



Slika 2.3.1. Shema transformatora

Opterećenje transformatora je pojam koji pokazuje koliku snagu može transformator prenijeti u nekom trenutku. Najveću snagu koju transformator može prenijeti, bez da se jave bilo kakvi kvarovi, je snaga koja ne premašuje nazivnu snagu transformatora to jest opterećenje. Postoje tri vrste opterećenja, to su podopterećenje, nazivno opterećenje i preopterećenje. Transformator je podopterećen kada je nazivna snaga transformatora veća od snage trošila transformatora. Struje su tada male pa se malo zagrijava što znači da podopterećenje produžuje vijek transformatora.

Kada je snaga trošila jednaka nazivnoj snazi tada se radi o opterećenju koje stvara optimalna zagrijavanja za koje je transformator projektiran. Pojava kada je snaga trošila veća od nazivne snage

naziva se preopterećenje gdje su struje koje prolaze kroz namotaje povećane. Preopterećenje je pojava kada je nazivna snaga manja od snage trošila.

## **2.4. Kvarovi transformatora**

Transformator je električni uređaj te je kao takav podložan zagađivanju, vanjskim i unutarnjim kvarovima, te prirodnom starenju. U unutarnje kvarove spadaju loša izolacija, pogreške u namotima, pregrijavanje, te kontaminacija naftom. Fazna greška također se smatra unutarnjim kvarom. U vanjske kvarove spadaju udari munja, preopterećenje sustava te kratki spoj. Općenito vanjski kvarovi događaju se kao što im samo ime kaže izvan transformatora, a sprječavaju se održavanjem, [8].

Održavanje transformatora obuhvaća redovan pregled i popravak transformatora. Kada se ustanovi kvar transformatora nastoji ga se što prije sanirati te osposobiti za ponovni rad. Kada se kvar otklanja potrebno je prvo izvršiti provjeru ispravnosti te zatim popravljati transformator.

Kvarovi mogu biti dielektrični, električni, elektrodinamički, termički i mehanički. U dielektrične kvarove spadaju kvarovi uzrokovani spojem među zavojima te probojem na uzemljenu masu.

Električni kvarovi uzrokovani su lošim kontaktima na priključcima, elektrodinamičke kvarove uzrokuju sile kratkog spoja, dok su mehanički uzrokovani vibracijama ili puknućem kotla. Na posljeticu, termički kvarovi kako im i samo ime kaže uzrokovani su prevelikim zagrijavanjem, te termičkim starenjem ulja i izolacije.

U slučaju kvara ili potpunog gubitka jedne faze transformatora dolazi do potpunog isključivanja jedinice. Do isključivanja dolazi zato što se u trofaznom transformatoru zajednička jezgra dijeli za sve tri jedinice. U slučaju kad je jedna jedinica neispravna, jezgra te neispravne jedinice se zasiti zbog nepostojanja suprotnog magnetskog polja. To uzrokuje veće izlivanje magnetskog toka u metalna kućišta iz jezgre. Izlivanje dodatno povećava zagrijavanje metalnih dijelova, što u nekim slučajevima uzrokuje požar. Iz gore navedenog razloga potrebno je, kada je neka faza neispravna, isključiti transformator.

### 3. SIMULACIJE U MATLABU

Matlab je složeni program koji služi za razvoj algoritama, vizualizaciju podataka, rješavanje niza izračunavanja i simulacija vezanih uz obradu signala te za rješavanje različitih matematičkih problema, automatsko upravljanje, statistiku i drugo. Riječ je o složenom interaktivnom sustavu i programskom jeziku koji služi za opća tehnička i znanstvena izračunavanja. Matlab je jednostavan zato što se u njemu komande izvršavaju bez kompajliranja te ima sve prednosti tradicionalnih programskih jezika kao što su strukture podataka, kontrola toka, objektno orijentirano programiranje i drugo. Neke od tipičnih primjena Matlaba su:

- Razvoj aplikacija
- Razvoj algoritama
- Obrada i vizualizacija podataka
- Modeliranje i simulacija sustava.

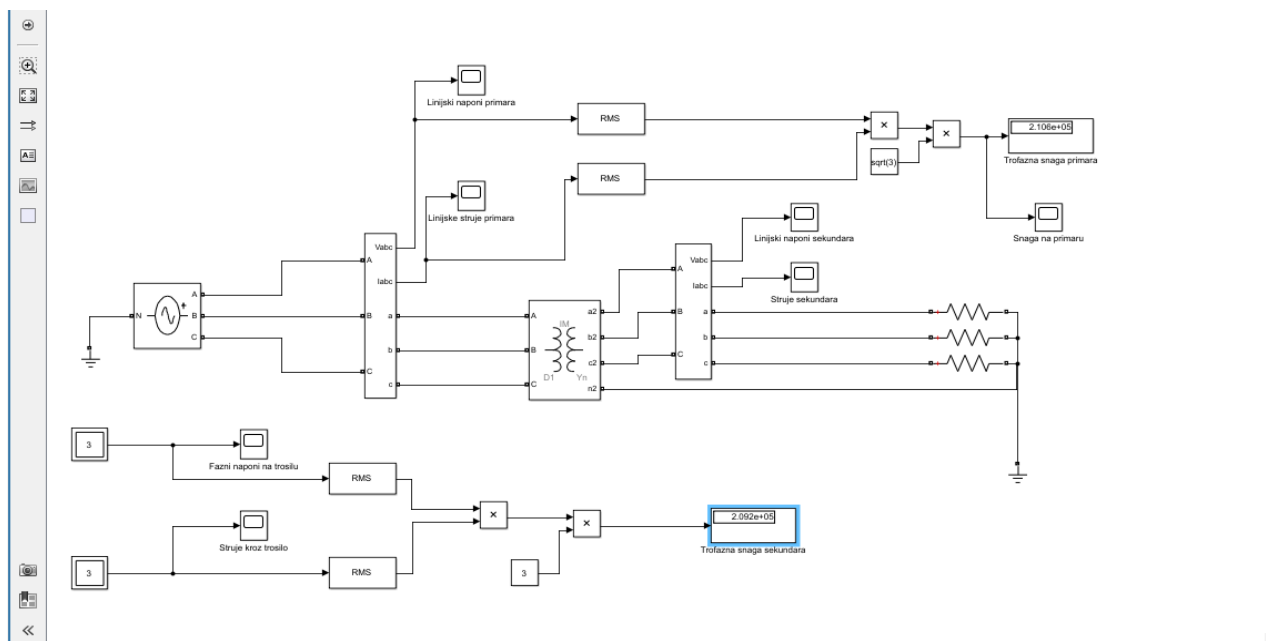
Najbitniji alat za razvoj simulacija na temu ovog završnog rada naziva se Simulink. Simulink je programski alat u sklopu Matlaba pomoću kojeg se opisuje sustav grafički. U sljedećim podnaslovima opisani su slučajevi rada transformatora u različitim stanjima u programskom sustavu Matlab, [9]. Transformator na kojem su provedena realna mjerenja u Elektri Slavonski Brod se može vidjeti na slici 3.1.



*Slika 3.1. Transformator 10 / 0.4 kV, Elektra Slavonski Brod*

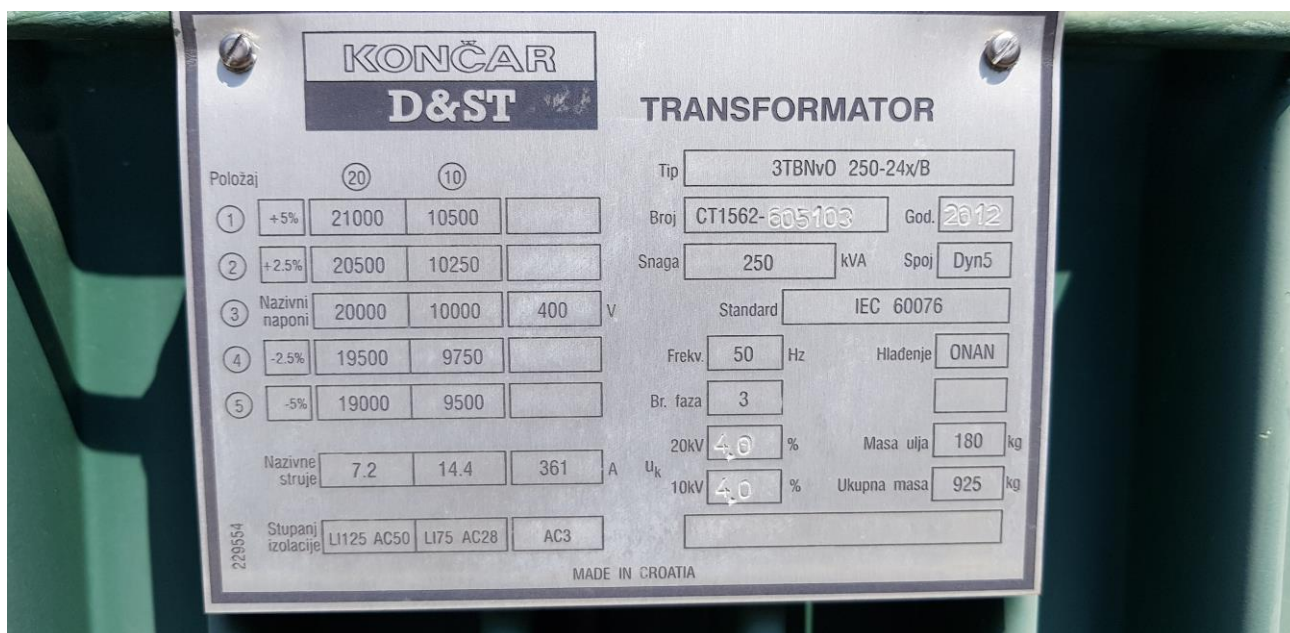
### 3.1. Transformator u normalnom stanju rada pod opterećenjem

Trofazni transformator se sastoji od tri jednofazna što znači da iz tri izmjenična naponska izvora izvire tri napojna voda na primaru, koji se spajaju na transformator te tri voda na sekundaru koji se spajaju na trošilo. Načini spajanja trofaznih transformatora koji se međusobno mogu kombinirati su zvijezda spoj, trokut spoj i cik - cak spoj. Prema [10] trokut – zvijezda spoj, zbog svoje efikasnosti, je najučestaliji u praksi. Kada se na sekundarnu stranu transformatora priključi trošilo tada će transformator biti opterećen. U Matlabu je modeliran trofazni transformator, 10 / 0,4 kV s frekvencijom od 50 Hz, s trokut spojem na izvoru te zvijezda spojem na sekundaru. Na primaru je spojen jedan voltmetar i jedan ampermetar koji mjere linijske struje primara te linijske napone primara. Na sekundaru je spojen također spojen jedan ampermetar i jedan voltmetar koji mjere linijske struje i linijske napone sekundara. Na primaru, kao i na sekundaru je na linije voltmetra i ampermetra spojen blok „multiply“ koji će pomnožiti struje i napone te još jedan blok imenom „multiply“ te još jedan blok imenom „constant“ koji će dodati umnošku struja i napona korijen iz tri te će se tako dobiti snaga. Snaga će biti prikazana u bloku „display“ te se iz tog bloka iščita trofazna snaga. Na slici 3.1.1. možemo vidjeti model transformatora s priključenim trošilom



Slika 3.1.1. Model transformatora u normalnom stanju rada pod opterećenjem (10/0,4kV)

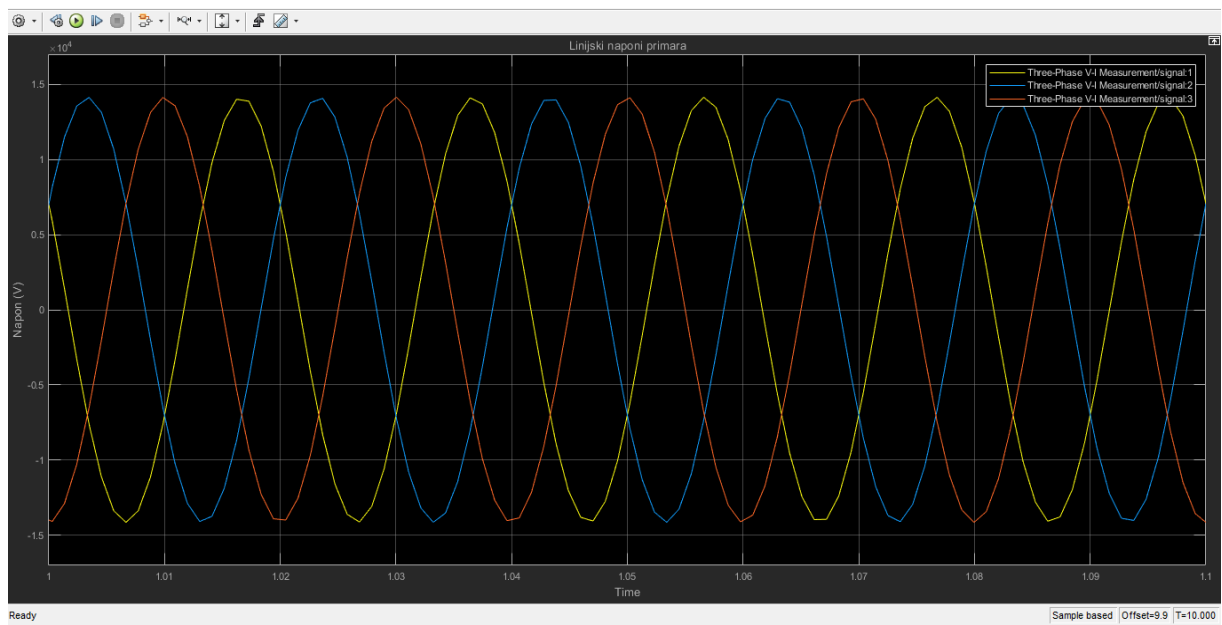




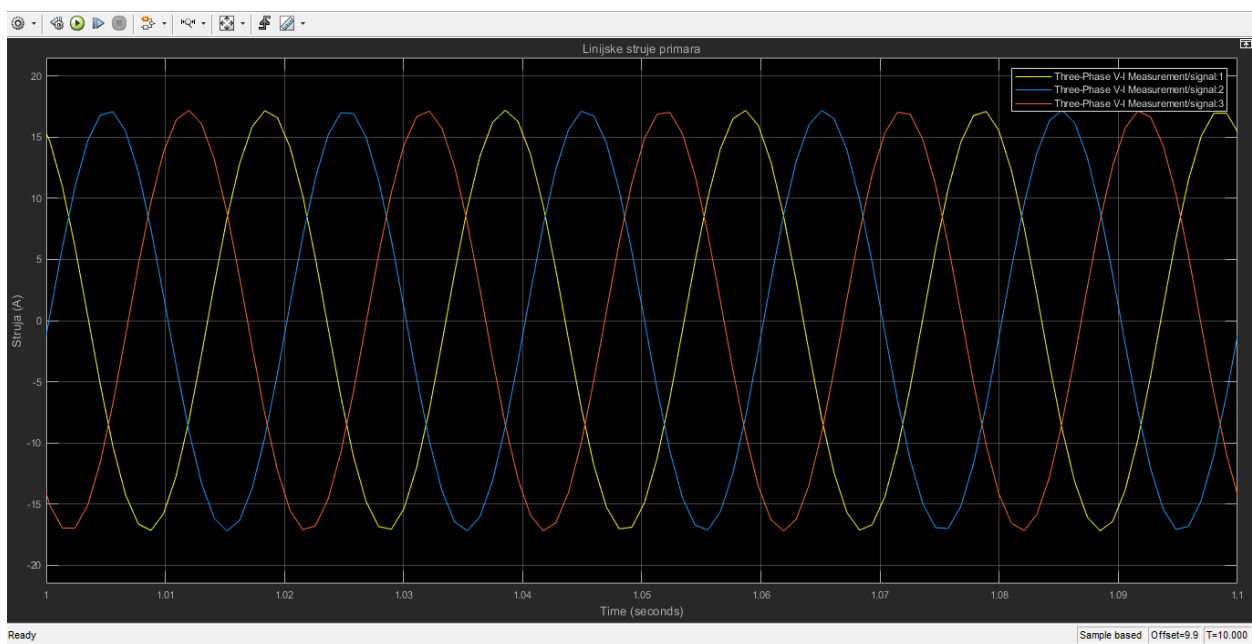
*Slika 3.1.2. Natpisna pločica mjerelog transformatora*

Nakon pokretanja simulacije snaga na primaru iznosi 210 kVA, a snaga na sekundaru 209 kVA. Linijski naponi na primaru bit će jednakog iznosa i pomaknuti za 120 stupnjeva. Žuta linija označava prvu fazu, plava linija označava drugu fazu i crvena linija označava treću fazu kao što možemo vidjeti na slici 3.1.3.



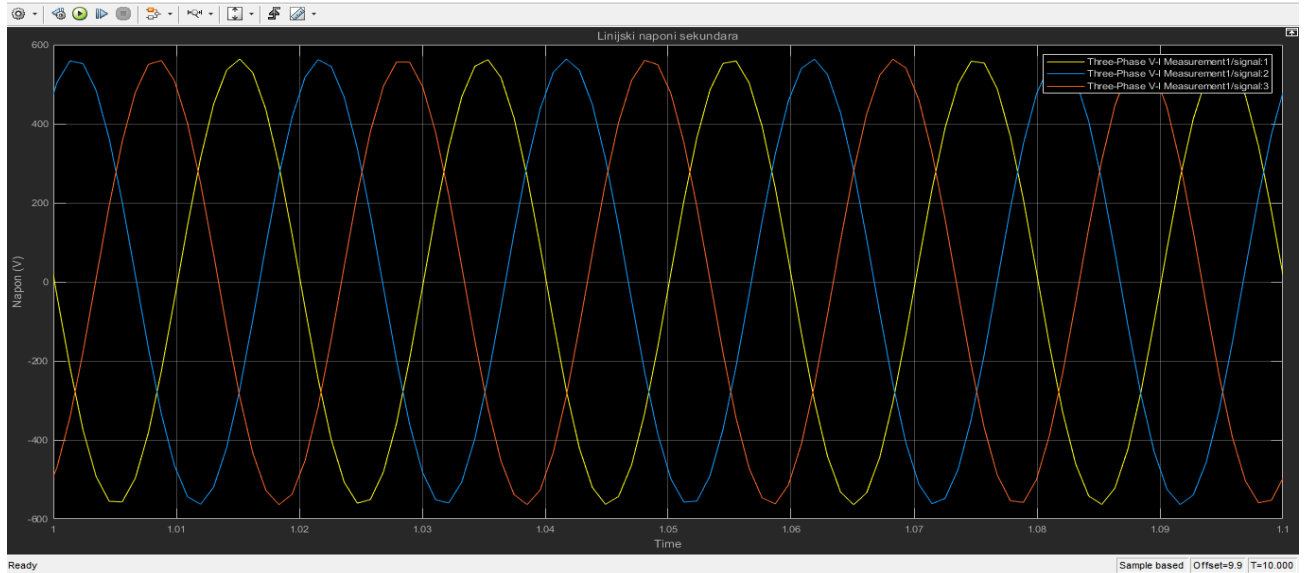


*Slika 3.1.3. Linjski naponi primara*



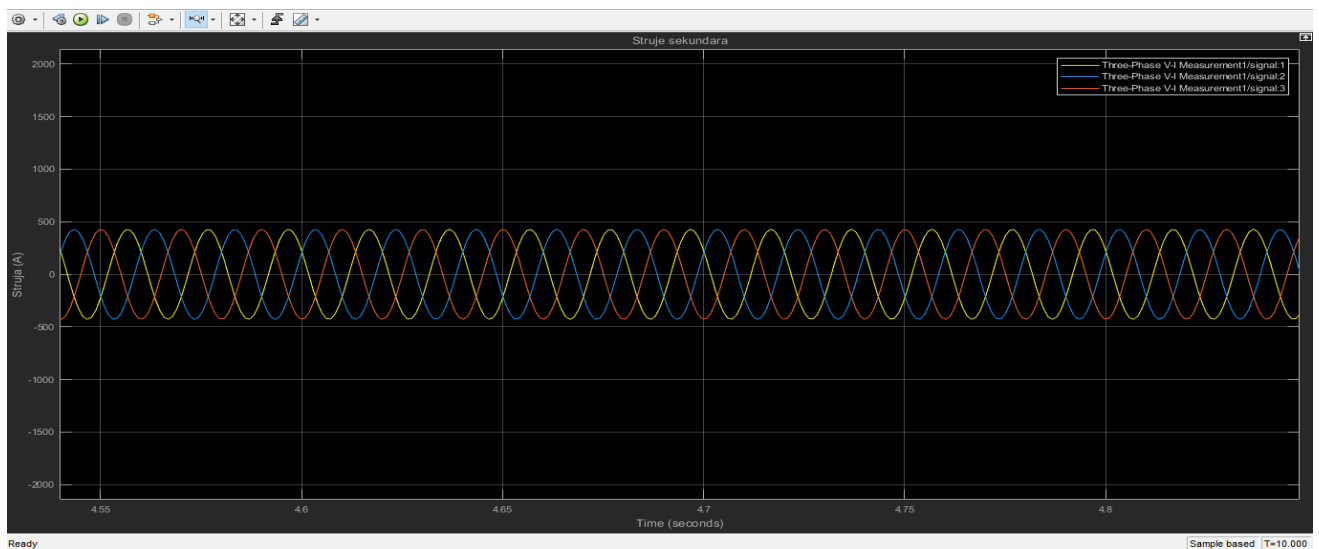
*Slika 3.1.4. Linjske struje primara*

Na slici 3.1.4. se može vidjeti ponašanje struja primara. Naime, struja svake faze je istog iznosa, ali pod različitim kutom. Žuta linija označava struju prve faze, plava linija označava struju druge faze i crvena linija označava struju treće faze. Na sekundarnoj strani transformatora naponi će u sve tri faze biti jednaki s različitim kutom što možemo vidjeti na slici 3.1.5.



*Slika 3.1.5. Linjski naponi sekundara*

Na slici 3.1.6. se mogu vidjeti linijske struje sekundara. Struje sekundara su povećane u odnosu na struje primara te su sve tri struje jednakih iznosa, ali pod različitim kutom. Trošilo je u ovom slučaju spojeno u zvijezda spoj što znači da su linijske struje jednake faznim strujama, a linijski naponi faznim naponima pomnoženim s korijenom iz tri.



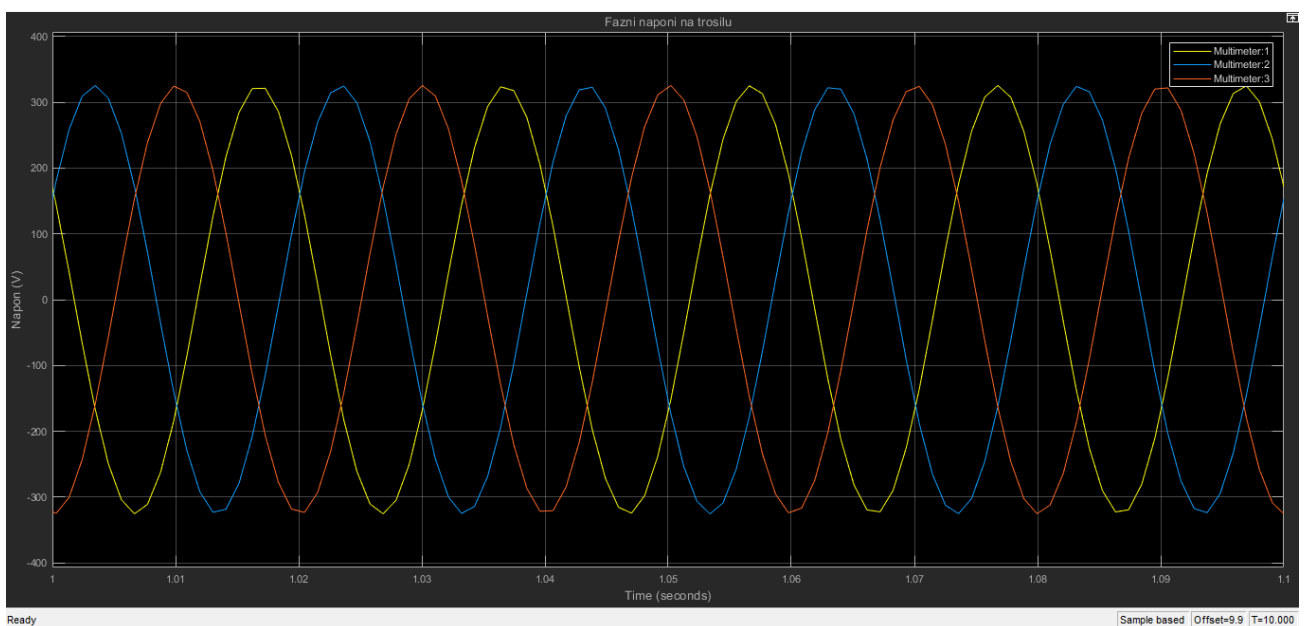
*Slika 3.1.6. Linijske struje sekundara*

Na slici 3.1.7. su prikazana tablična mjerenja napona vršnih i efektivnih vrijednosti. Vrijednosti su očitani s dijagrama simulacija.

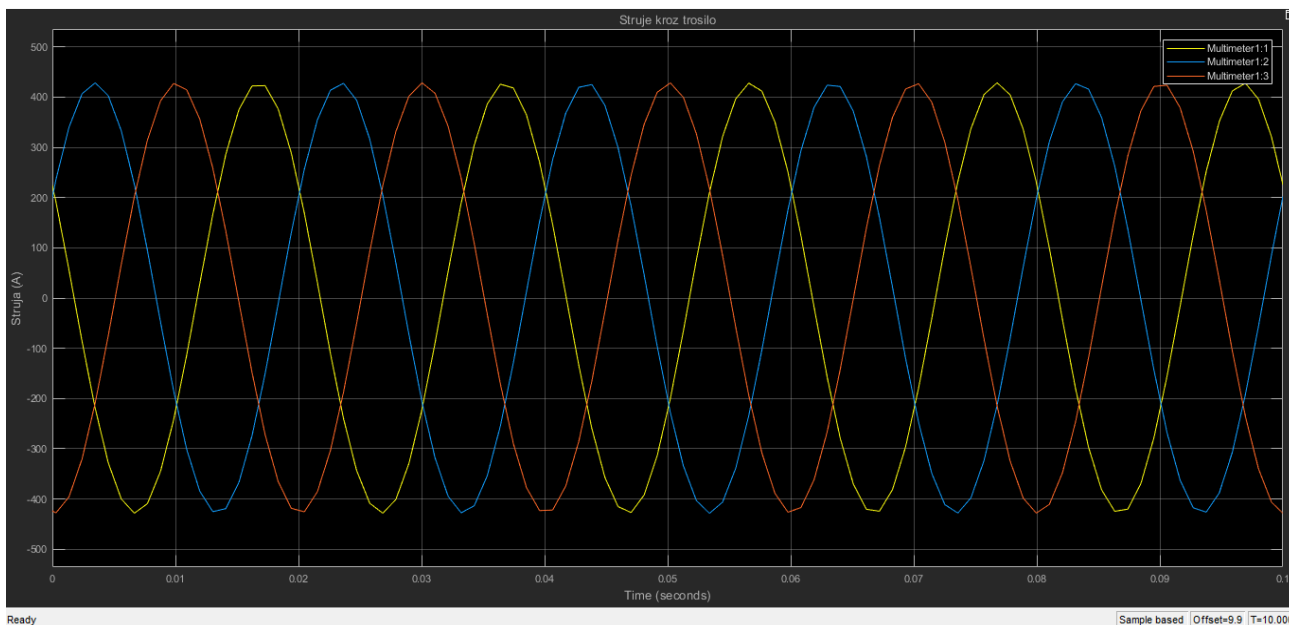
Naponi primara - vršne vrijednosti				Naponi sekundara - vršne vrijednosti				Fazni naponi - vršne vrijednosti			
U1	14000V			U1	564V			U1	321V		
U2	14127.5V			U2	563V			U2	321V		
U3	14100V			U3	557V			U3	324V		
Naponi primara - efektivne vrijednosti				Naponi sekundara - efektivne vrijednosti (međufazni)				Fazni naponi - efektivne vrijednosti			
U1	9899.5V			U1	398.81V			U1	226.98V		
U2	9989.7V			U2	398.1V			U2	226.98V		
U3	9970.2V			U3	393.86V			U3	229.1V		

Slika 3.1.7. Tablično mjerenje napona u normalnom stanju rada transformatora

Na slici 3.1.8. su prikazani fazni naponi sekundara te na slici 3.1.9. su prikazane fazne struje sekundara.

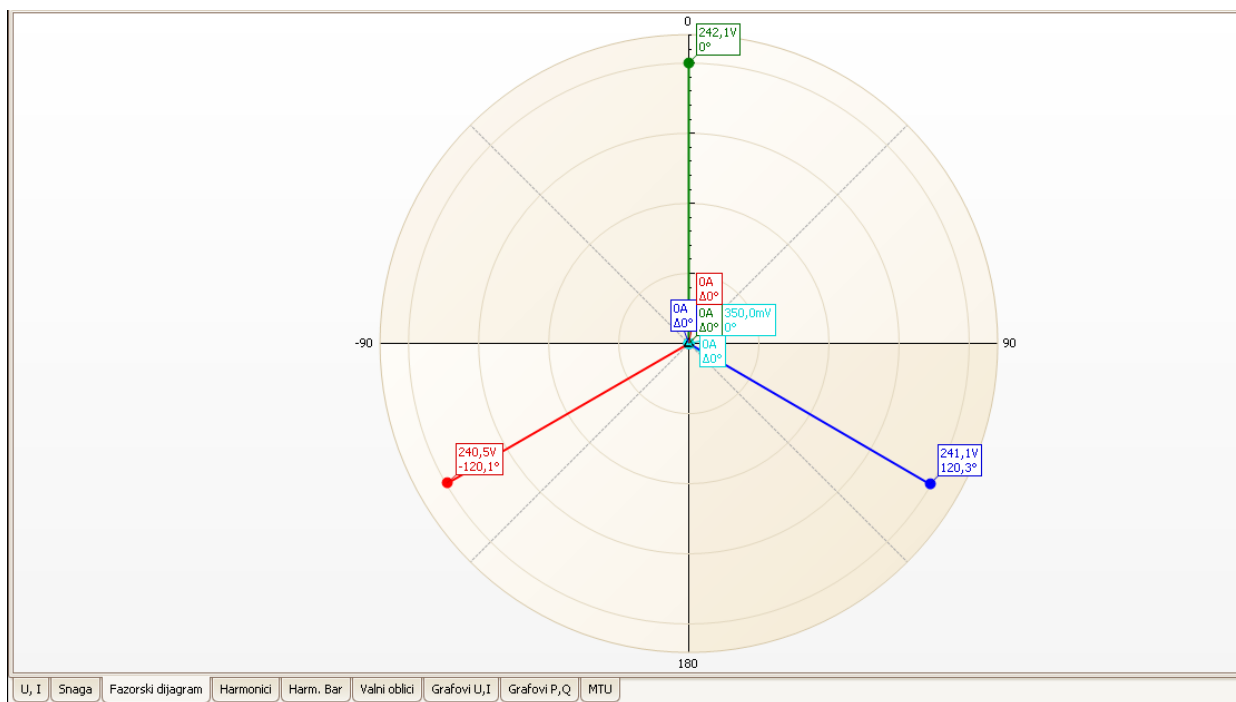


Slika 3.1.8. Fazni naponi sekundara



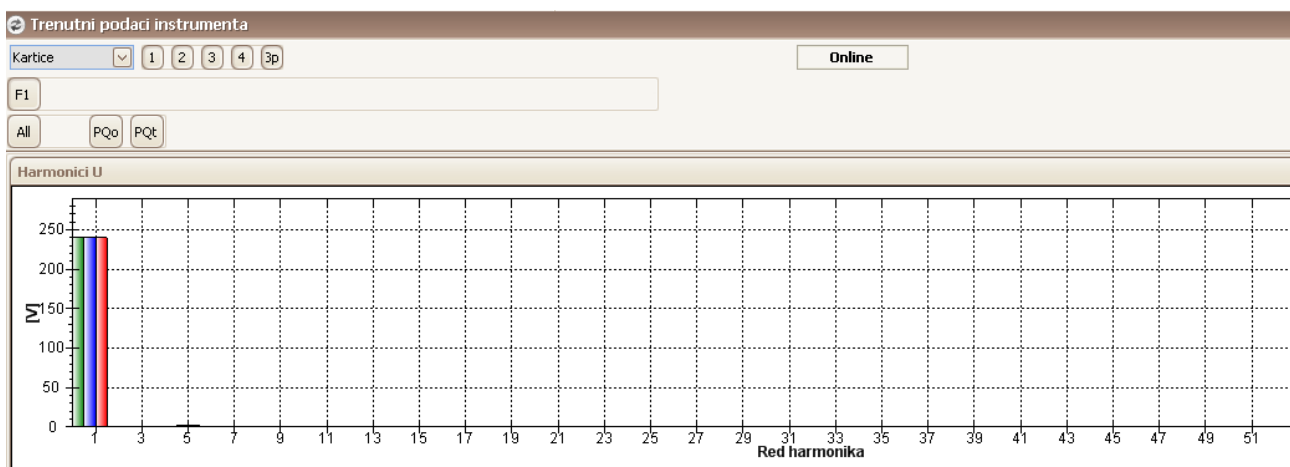
Slika 3.1.9. Fazne struje sekundara

Mjerenja su obavljena i u Elektri Slavonski Brod kako bi se usporedili rezultati sa simulacijama iz Matlaba. Provedeno je mjerenje za način rada u normalnom stanju transformatora te na slici 3.1.10. je prikazan fazorski dijagram napona.



Slika 3.1.10. Fazorski dijagram napona

Na slici 3.1.11. se mogu vidjeti harmonici napona kada je transformator u normalnom stanju rada.



Slika 3.1.11. Harmonici napona za transformator u normalnom stanju rada

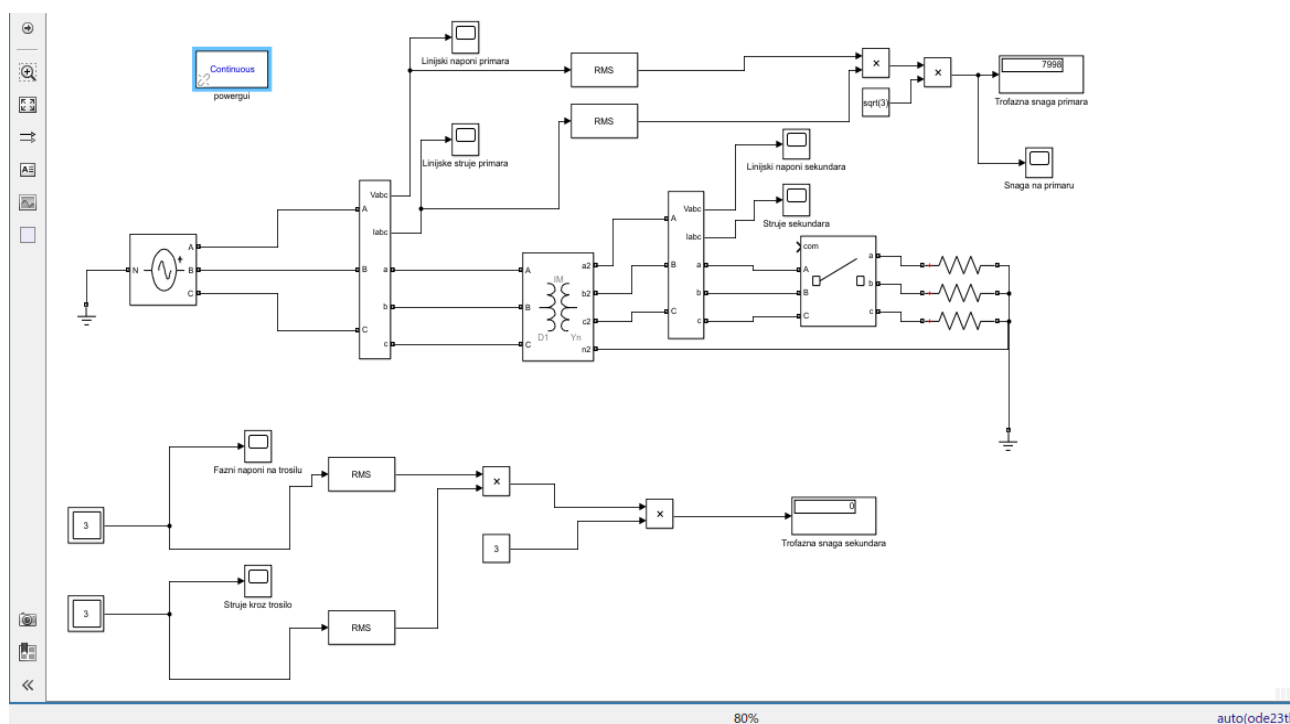
Slika 3.1.12. prikazuje mjerenje napona u normalnom stanju rada transformatora.

	uLL[V]	uLN[V]	I[A]	uTHD[%]	iTHD[%]
1	419,1	242,1	0	1,040	0
2	416,6	241,2	0	1,000	0
3	418,2	240,6	0	1,140	0
4		0	0	0	0
f[Hz]	49,98		UnbU[%]	0,021	
Temp	32773		UnbI[%]		
underfl.	U4,I1,I2,I3		fiUnbI[°]		
ovefl.	OK				
IO	OFF				
Greška	(0)				

Slika 3.1.12. Mjerenja napona

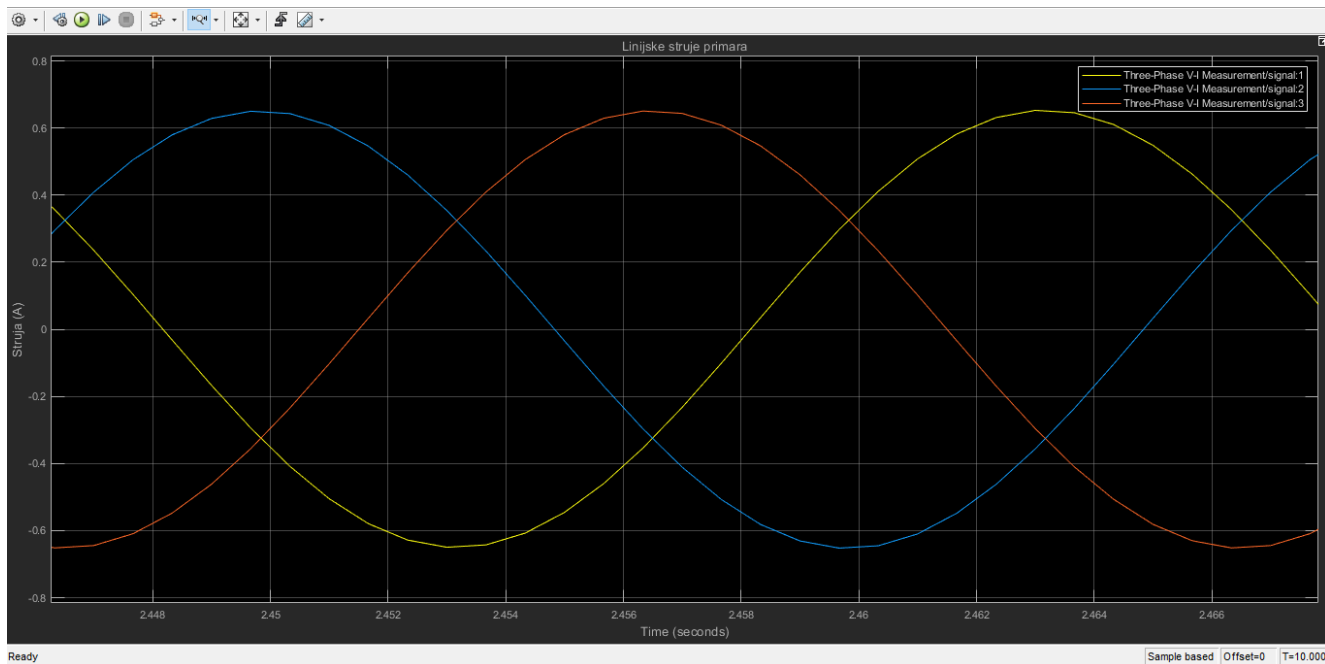
## 3.2. Prazni hod transformatora

Transformator je u praznom hodu kada je primarni namot priključen na izmjenični izvor, a stezaljke na sekundaru su odspojene. Kada je transformator u praznom hodu, tada je neopterećen jer na stezaljkama sekundara nije priključeno trošilo. Dakle, u Matlabu je modelirana shema transformatora u praznom hodu to jest kada on nije opterećen trošilom kao što možemo vidjeti na slici 3.2.1.



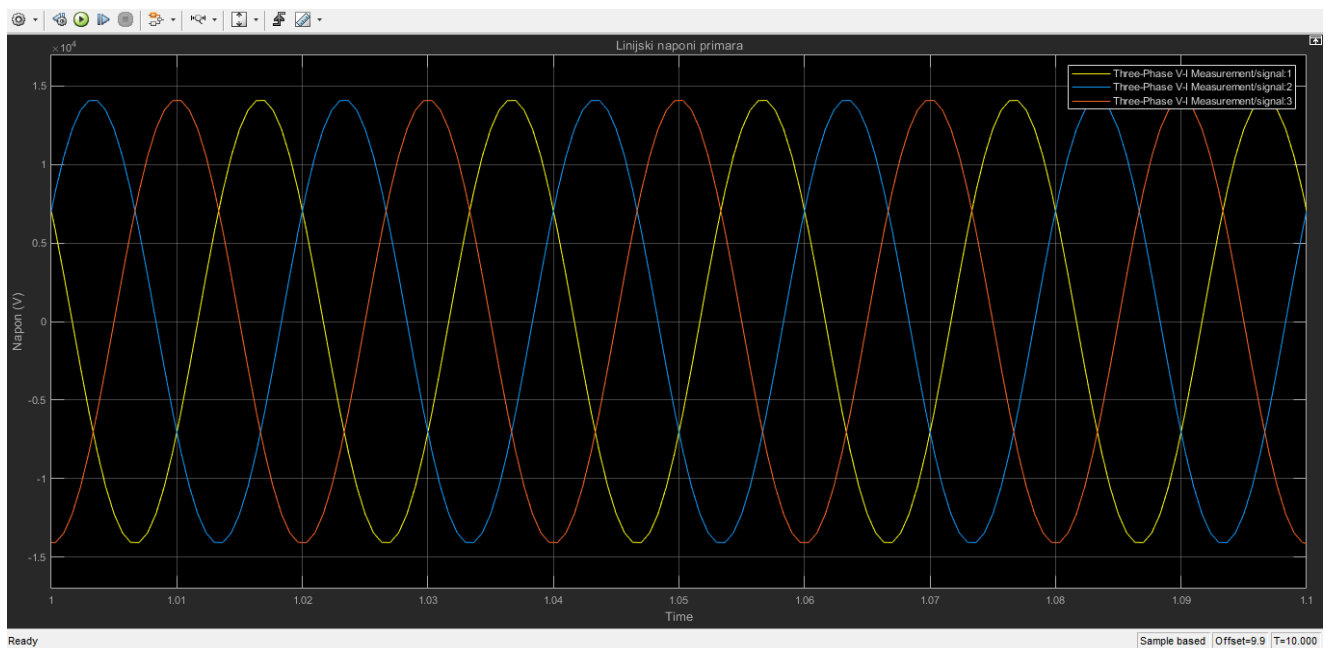
Slika 3.2.1. Model transformatora u praznom hodu

Na primarnoj strani transformatora sada teče struja koja se naziva struja praznog hoda. U svakoj fazi će struja biti istog iznosa, ali s različitim kutom. Budući da ni na jednoj fazi nema opterećenja to jest da su opterećenja vrlo mala, otpor namotaja se zanemaruje. Stoga se bez ikakvog opterećenja energija izvučena iz izvora raspršuje kao toplina u jezgri. Karakteristika struja sve tri faze na primaru je prikazana na slici 3.2.2.



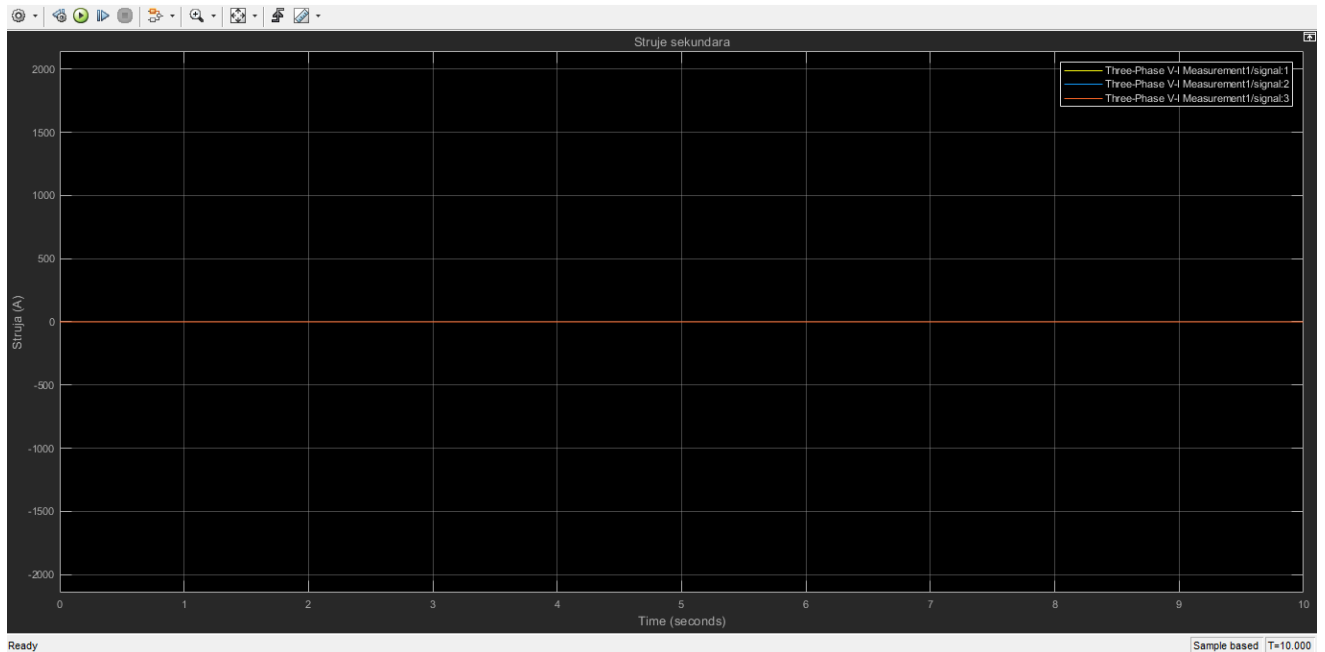
Slika 3.2.2. Linjske struje primara

Naponi na primaru bit će isti kao i naponi na primaru kada je transformator u normalnom stanju rada. Na primaru su sve tri faze priključene na trofazni izmjenični izvor te će linijski naponi primara biti jednaki u sve tri faze, ali pod različitim kutom kao što možemo vidjeti na slici 3.2.3.



Slika 3.2.3. Linjski naponi primara

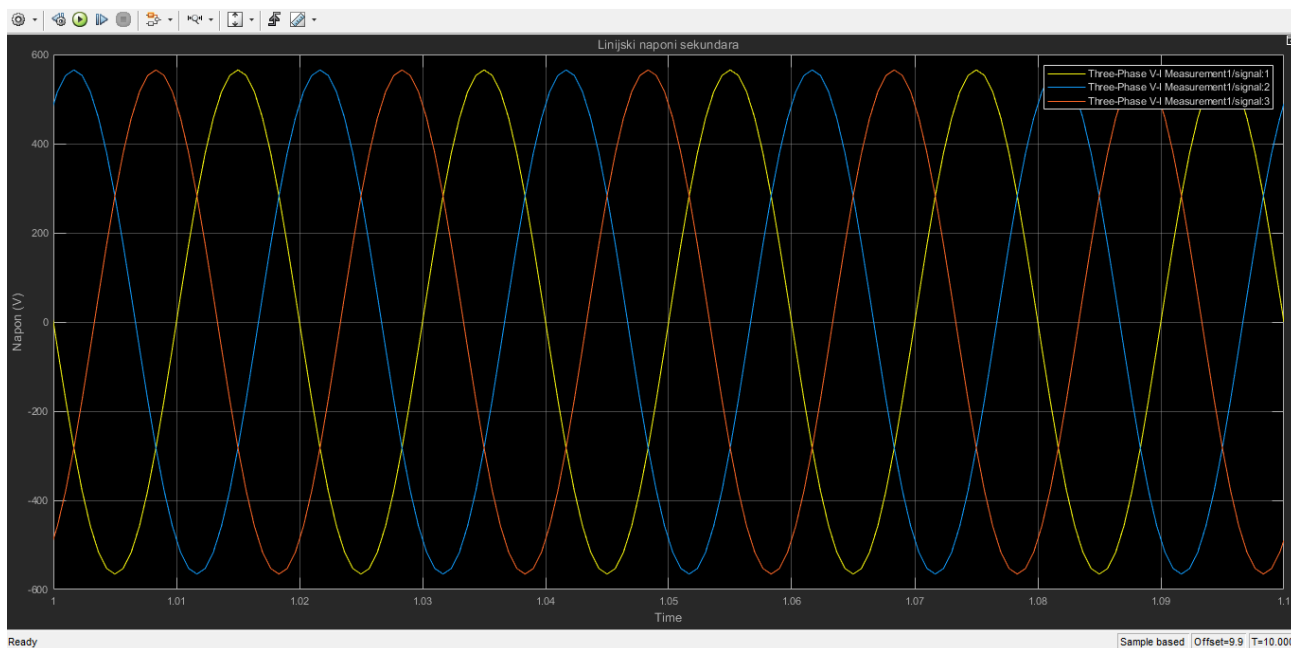
Na sekundarnoj strani se odspoje sve tri faze pa trošila nema te je na sekundaru prazan hod. Pošto su fazni vodiči odspojeni struja kroz njih više ne može prolaziti pa će iznosi struja u sve tri faze biti nula. Kada se pokrene simulacija sve tri faze će biti pod istom bojom jer se preklapaju. U ovom primjeru struje u sve tri faze označava crvena boja. Na slici 3.2.4. se nalaze struje sekundara.



*Slika 3.2.4. Linijske struje sekundara*

Na slici 3.2.5. je prikazan dijagram napona na sekundaru u sve tri faze. Na slici 3.2.6. je prikazana tablica vrijednosti napona na primaru i na sekundaru.





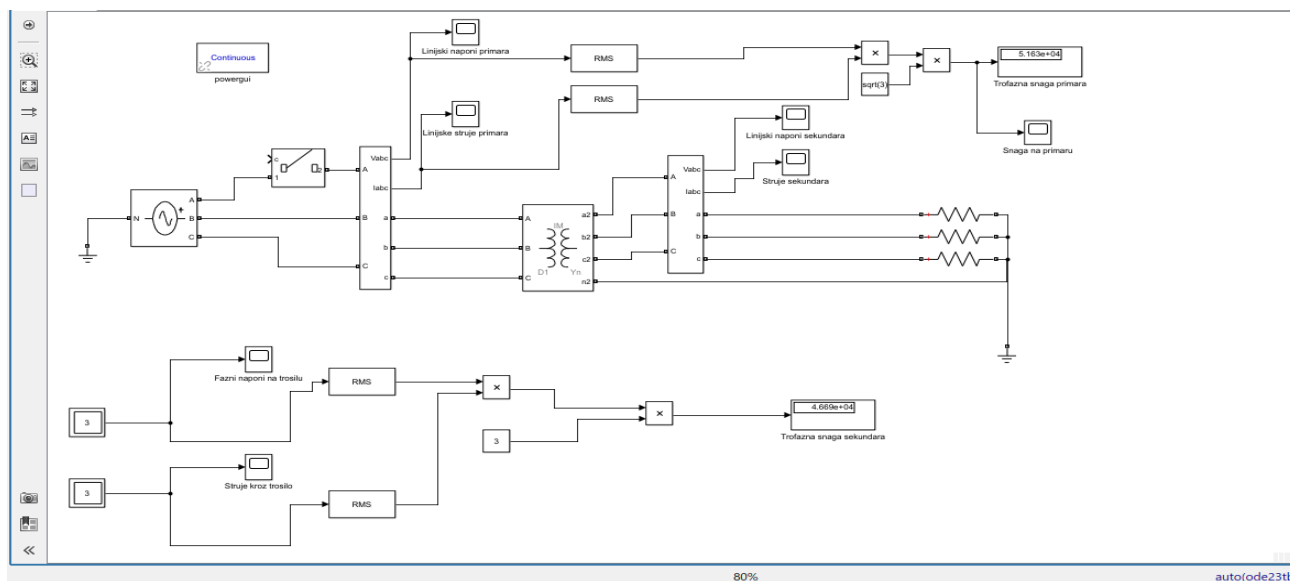
Slika 3.2.5. Linijski naponi sekundara

Naponi primara - vršne vrijednosti				Naponi sekundara - vršne vrijednosti			
U1	14200V			U1	565V		
U2	14100V			U2	561.9V		
U3	14200V			U3	563V		
Naponi primara - efektivne vrijednosti				Naponi sekundara - efektivne vrijednosti(međufazni)			
U1	10090.9V			U1	399.5V		
U2	9970.2V			U2	397.3V		
U3	9970.2V			U3	398.1V		

Slika 3.2.5. Tablično mjerenje napona u praznom hodu transformatora

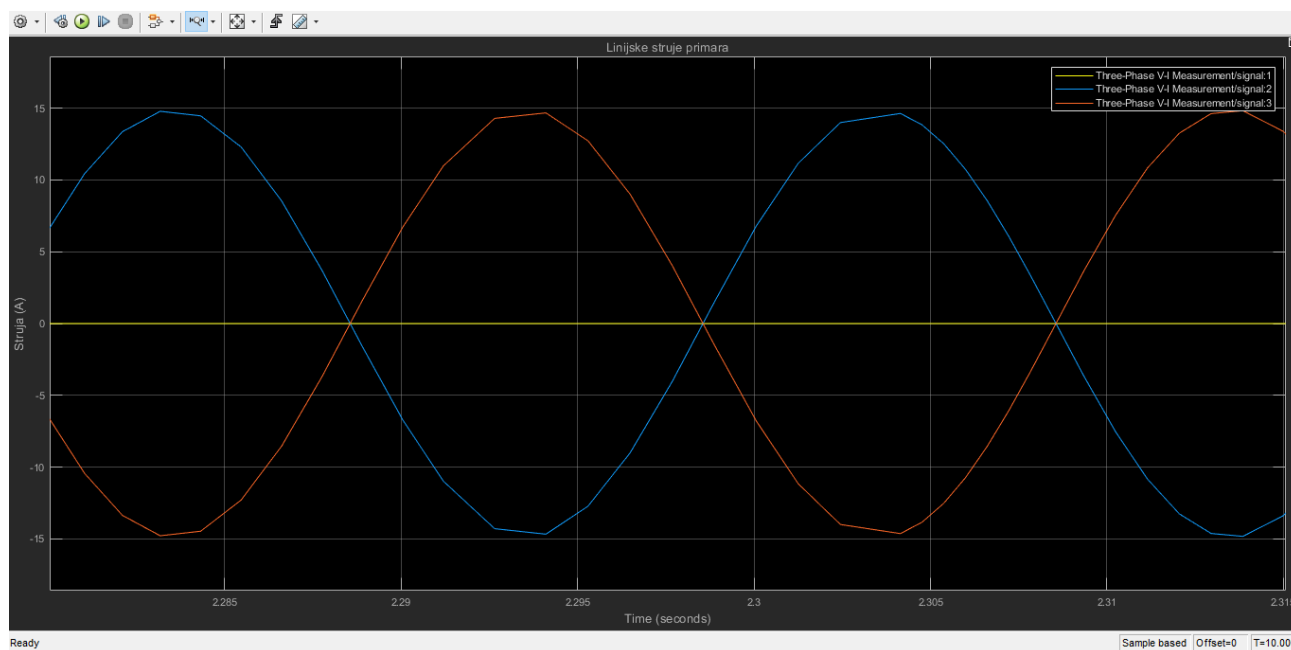
### 3.3. Stanje transformatora nakon prekida faznog vodiča

Stanje transformatora nakon prekida faznog vodiča je stanje u kojem dolazi do prekida napojnog voda. Prekid faznog vodiča se smatra kvarom koji može nastati iz dva razloga, a oni mogu biti vanjski ili unutarnji. Vanjski uzroci su mehanička preopterećenja ili intervencija treće osobe to jest nastaju nepažnjom korisnika, dok su unutarnje nezadovoljavajuća montaža, uporaba pogrešne tehnologije i neodgovarajući materijal. Također se prekid može dogoditi zbog visokog otpora na mjestu kvara. Prekid nul-vodiča može nastati nepažljivim spajanjem ili fizičkim prekidom nul-vodiča, jedan od uzroka prekida nul-vodiča su vremenske nepogode te prekidom istog može doći do većih poremećaja u fazama trošila. Kada napon pojedine faze trošila prijeđe nazivni napon dolazi do oštećenja trošila ili pregaranja osigurača, a kada napon pojedine faze trošila padne ispod nazivnog napona trošilo će raditi neispravno. U ovom slučaju je riječ o prekidu napojnog voda transformatora te je simulacija sheme ovog stanja transformatora prikazana na slici 3.3.1. [11]



Slika 3.3.1. Stanje transformatora nakon prekida faznog vodiča

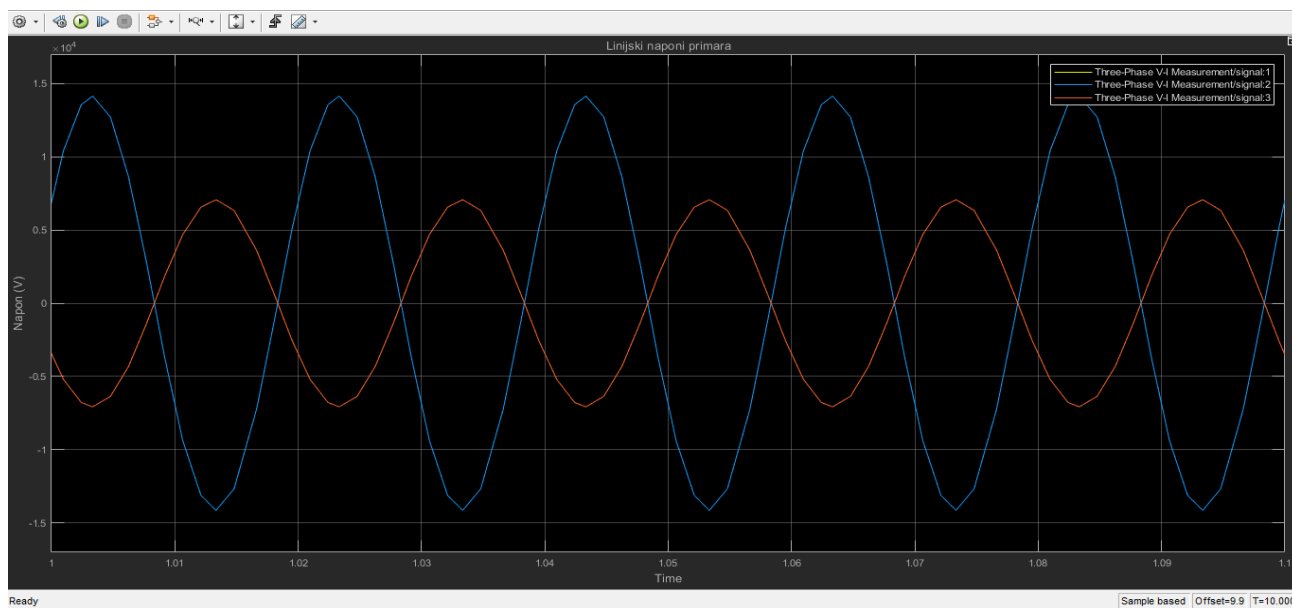
Ako se jedna faza primara prekine tada će u toj fazi struja biti nula, a u ostale dvije faze struje će biti nešto manje nego u normalnom stanju rada transformatora kada su sve tri faze spojene, ali iste u smislu da su struje u te dvije faze jednake kao što se može primijetiti na slici 3.3.2. Zbog gubitka jedne faze opterećenje na ostale dvije faze će biti za otprilike pedeset posto veće zato što sada dvije faze moraju opskrbiti sekundarnu stranu. Zavojnice na primarnoj strani ne nose nikakvu struju, osim vrlo male struje magnetiziranja i gubitke koji su zanemarivi. [12]



*Slika 3.3.2. Linjske struje primara*

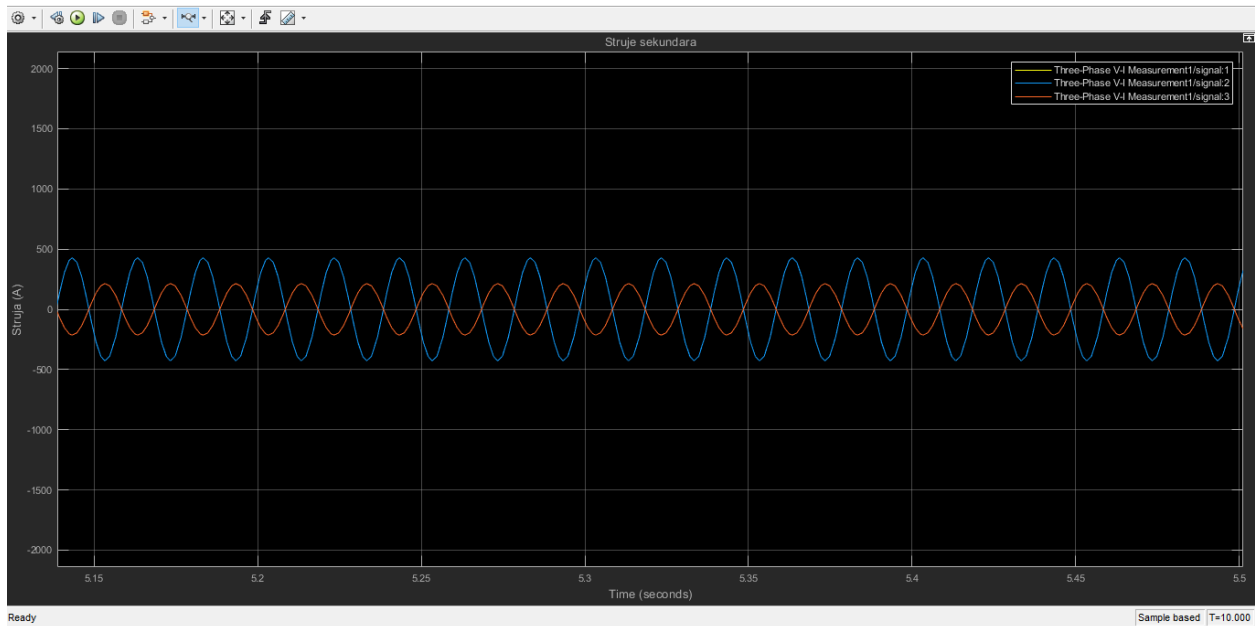
Zbog prekinute jedne faze primara linijski napon jedne faze će biti isti dok će se naponi u ostale dvije faze smanjiti za otprilike pedeset posto. Snaga će također opasti te se smanjiti jer je jedna faza prekinuta pa sad postoje samo dvije faze, a ne više tri. Energija će se dopremati do sekundara na koje je priključeno trošilo iz dvije faze to jest iz druge i treće jer je prva faza prekinuta. Izvor će i dalje generirati isti napon s faznim kutom od sto dvadeset stupnjeva, a linijski naponi će postati još više neuravnoteženi te će se amplitude napona prve i treće faze smanjiti za pola, a napon druge faze će ostati pod istim iznosom amplitude. Fazni kutovi između napona sve tri faze će biti jednaki.

Na slici 3.3.3. se može vidjeti ponašanje linijskih napona primara.



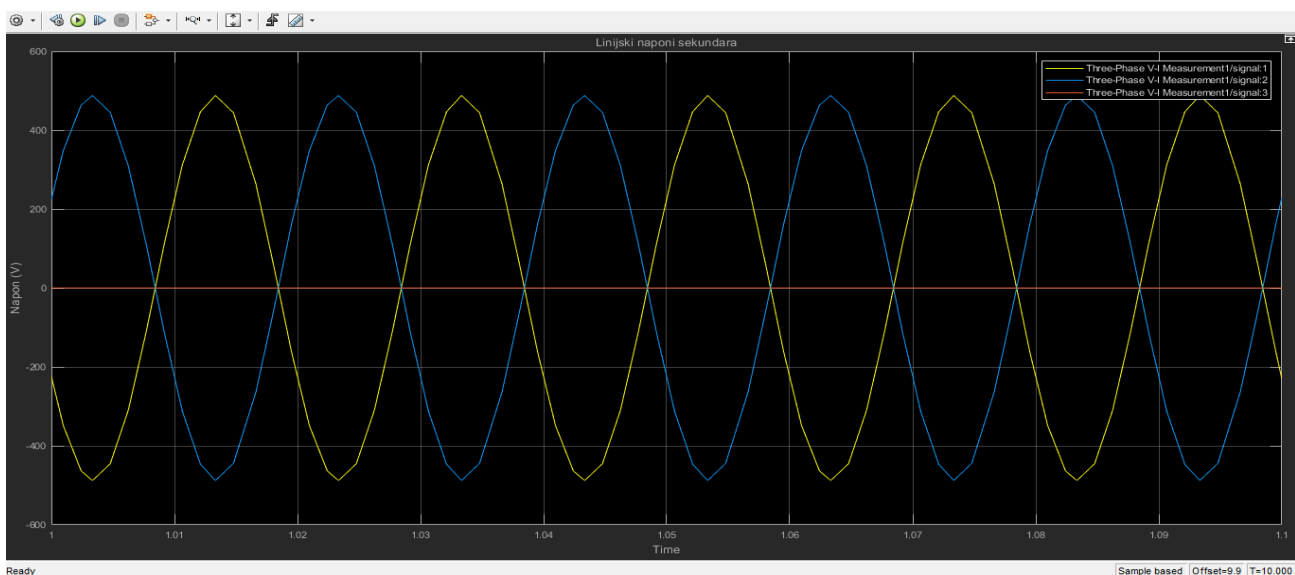
*Slika 3.3.3. Linjski naponi primara*

Budući da trofazni sustav na primaru više nije trofazni nego postoje samo dvije faze, uspostavljena je nova faza kutova. Dakle, jedna struja će ostati ista, a ostale dvije će se smanjiti po amplitudi te više neće biti razmaknute za 120 stupnjeva kao u normalnom stanju rada transformatora već će se fazni kut između preostale dvije struje smanjiti kao što se može primjetiti na slici 3.3.5. Na slici je prva faza označena žutom bojom, a treća faza je označena crvenom bojom. Pošto se te dvije faze preklapaju označene su kao jedna faza crvenom bojom. Struja prve i treće faze su jednakih iznosa amplituda te su po iznosu amplituda manje od struje u drugoj fazi. Fazni kutovi u sve tri faze su jednaki, ali su se znatno smanjili u odnosu na fazne pomake struja kada su spojene sve tri faze te kada je transformator u normalnom stanju rada pod opterećenjem.



*Slika 3.3.5. Linijske struje sekundara*

Naponi sekundara će se ponašati tako da će naponi prve faze i druge faze imati istu vršnu vrijednost što znači da će imati istu i efektivnu vrijednost koja iznosi 346 V. Napon treće faze će biti približno jednak nuli jer je razlika u naponima između faza jednaka nuli. U praksi ovo nije čest slučaj, jer se teško mogu dobiti idealni uvjeti. Dijagram napona na sekundaru prikazuje slika 3.3.6. te tablična mjerenja napona nakon prekida faznog vodiča prikazuje slika 3.3.7.

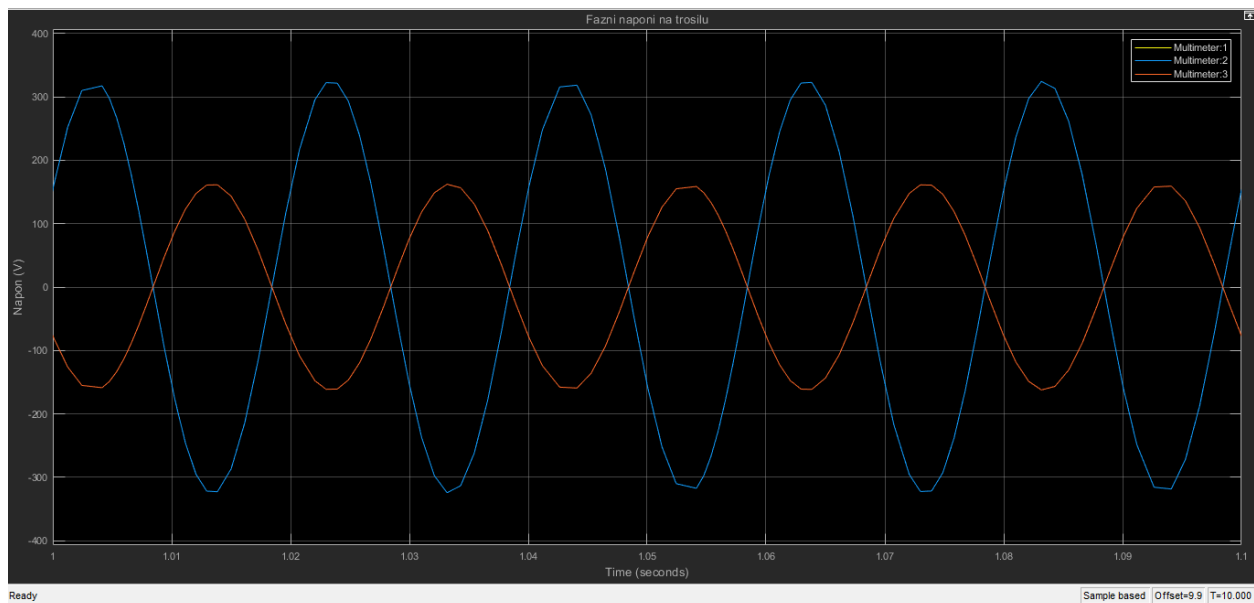


*Slika 3.3.6. Naponi sekundara*

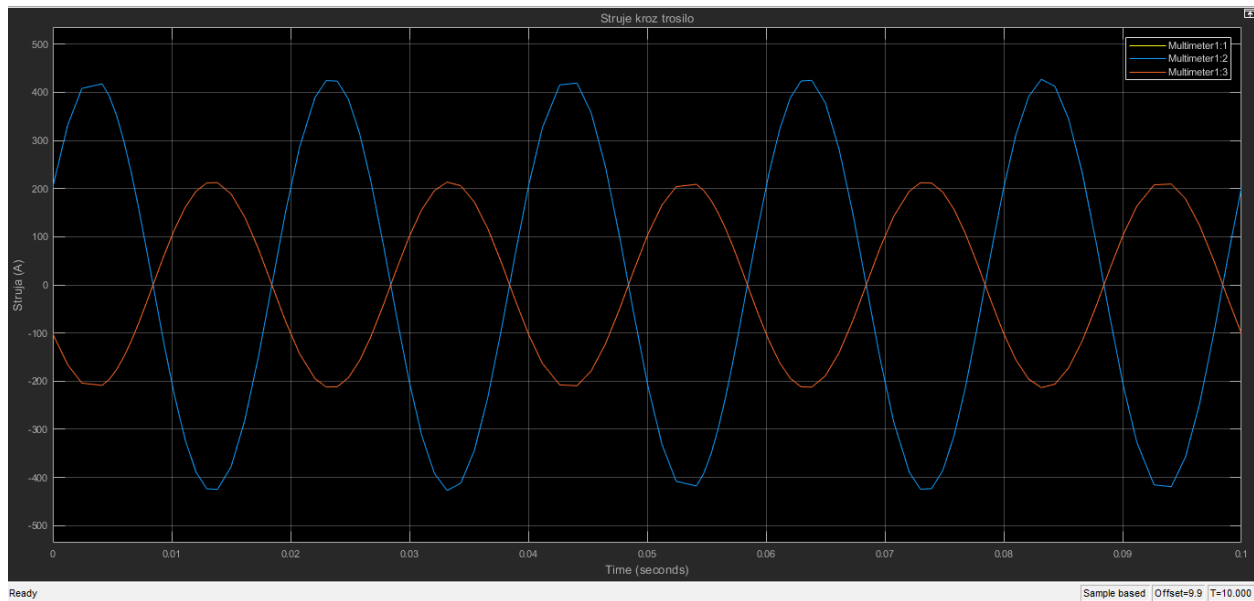
Naponi primara - vršne vrijednosti				Naponi sekundara - vršne vrijednosti				Fazni naponi - vršne vrijednosti			
U1	7000V			U1	484V			U1	161V		
U2	13700V			U2	483V			U2	317V		
U3	7000V			U3	0V			U3	161V		
Naponi primara - efektivne vrijednosti				Naponi sekundara - efektivne vrijednosti(međufazni)				Fazni naponi - efektivne vrijednosti			
U1	4949.7V			U1	342.2V			U1	113.8V		
U2	9687.4V			U2	341.5V			U2	224.15V		
U3	4949.7V			U3	0V			U3	113.8V		

*Slika 3.3.7. Tablično mjerenje napona nakon prekida faznog vodiča*

Na slici 3.3.8. su prikazani fazni naponi sekundara, a na slici 3.3.9. su prikazane fazne struje sekundara.

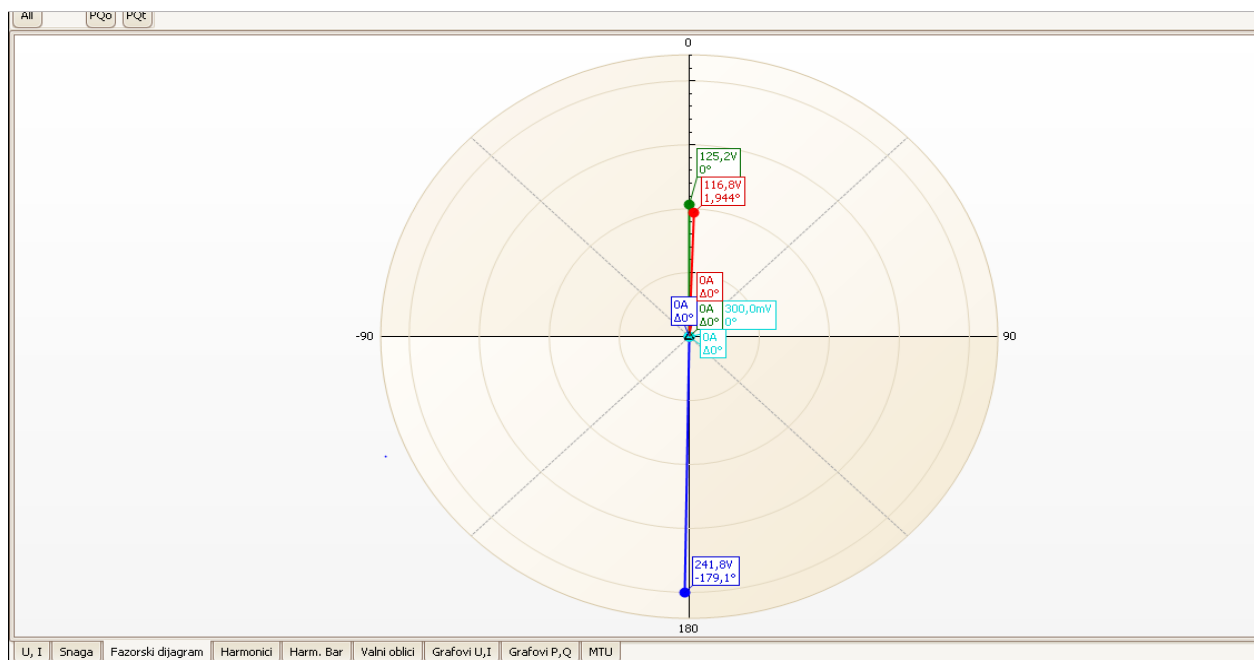


*Slika 3.3.8. Fazni naponi sekundara*



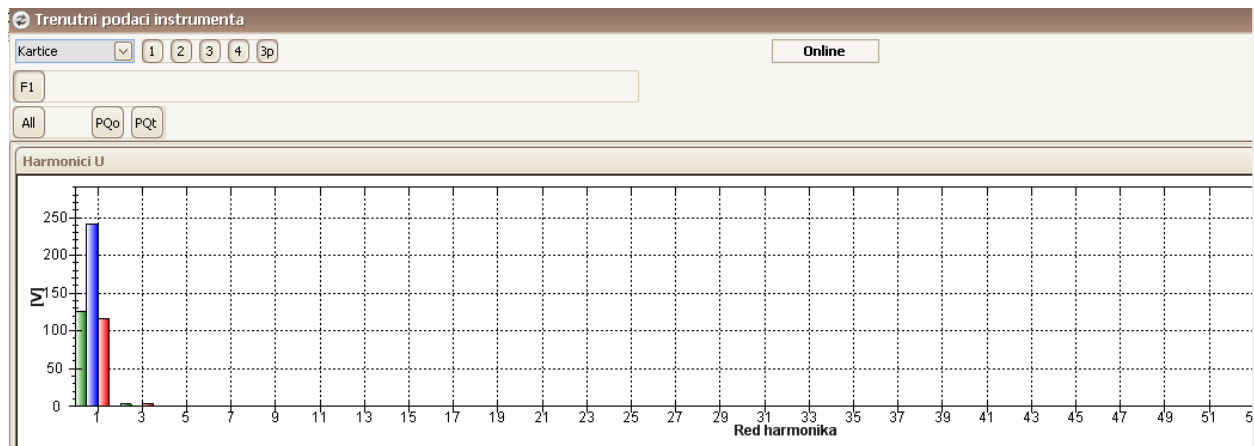
Slika 3.3.9. Fazne struje sekundara

Usporedno sa simulacijama iz Matlaba, sljedeće slike prikazuju mjerenja koja su se obavili u Elektri, Slavonski Brod. Slika 3.3.10. prikazuje fazorski dijagram napona nakon prekida faznog vodiča.



Slika 3.3.10. Fazorski dijagram napona

Slika 3.3.11. prikazuje harmonike napona kada je prekinut jedan fazni vodič.



Slika 3.3.11. Harmonici napona

Slika 3.3.12. prikazuje mjerenja napona nakon prekida jednog faznog vodiča.

Trenutni podaci instrumenta

Kartice: 1 2 3 4 3p

F1

All PQo PQt

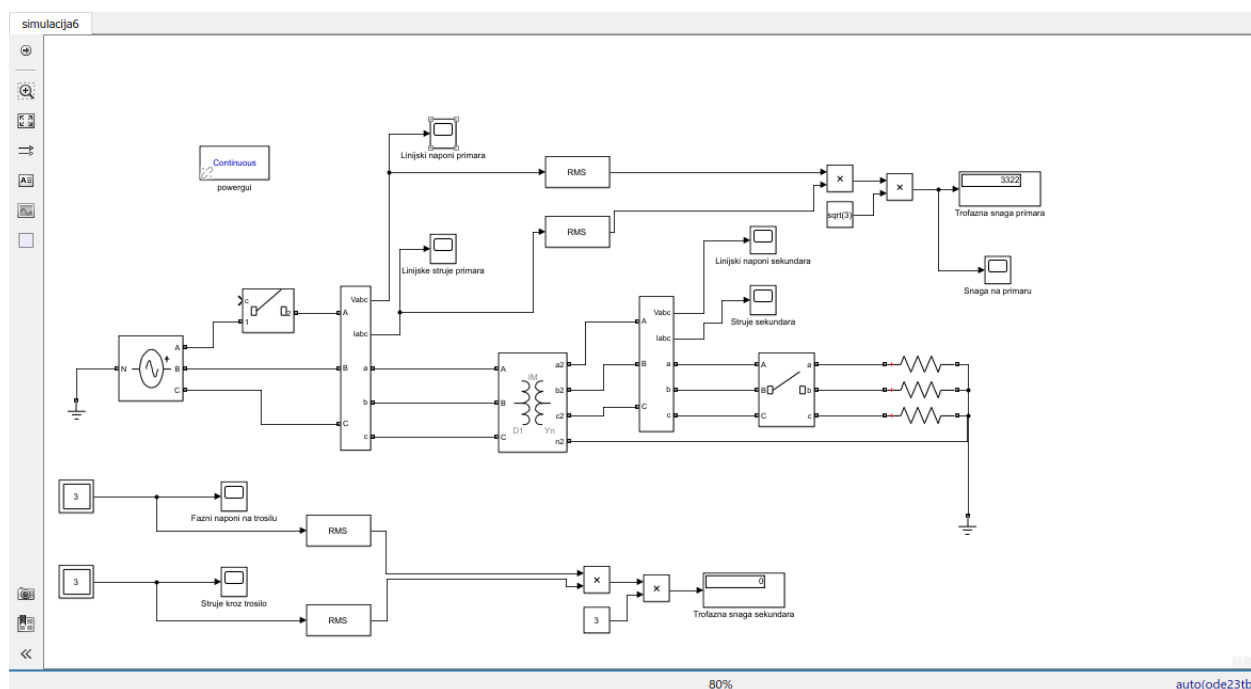
	uLL[V]	uLN[V]	I[A]	uTHD[%]	iTHD[%]
1	367,6	125,4	0	2,710	0
2	359,2	242,2	0	1,080	0
3	11,40	117,1	0	3,170	0
4		0	0	0	0
f[Hz]	49,99		UnbU[%]	0,045	
Temp	32775		UnbI[%]		
underfl.	U4,I1,I2,I3		fiUnbI[°]		
ovefl.	OK				
IO	OFF				
Greška	(0)				

Slika 3.3.12. Mjerenja napona



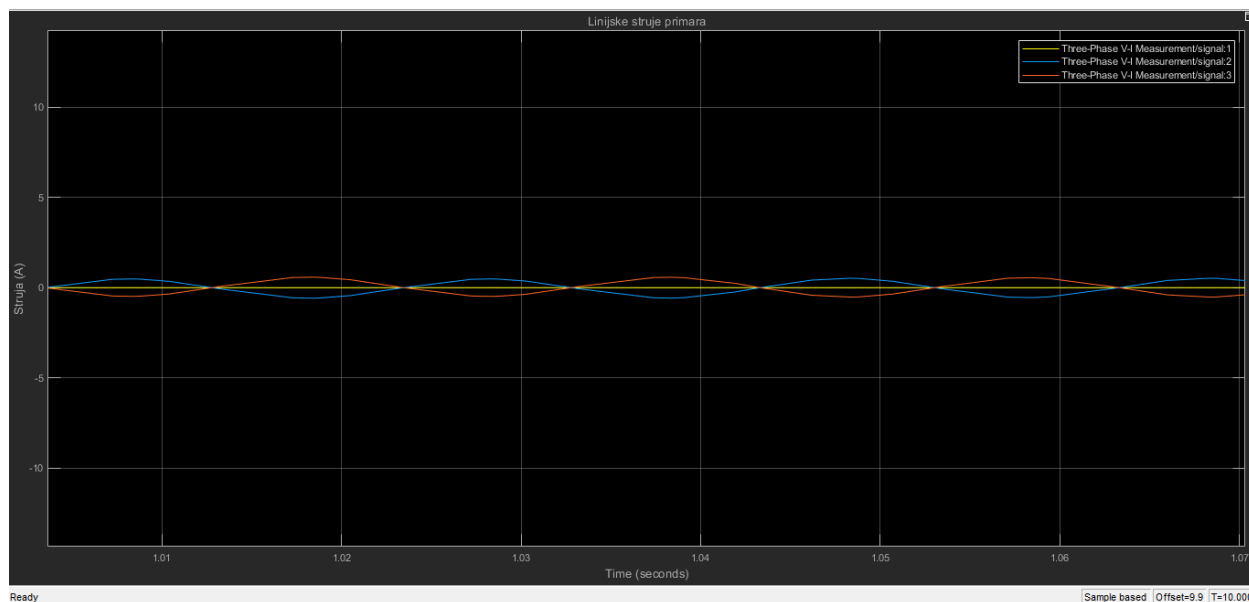
### 3.4. Stanje transformatora nakon prekida faznog vodiča u praznom hodu

Stanje transformatora nakon prekida faznog vodiča na primaru za vrijeme praznog hoda na sekundaru će se razmatrati na sljedeći način. Na primaru transformatora se odspoji prva faza te se na sekundaru odspoje sve tri faze to jest na sekundaru se dobiva prazni hod. U Matlabu je modelirana shema transformatora u stanju nakon prekida faznog vodiča na primaru te kada je neopterećen na sekundaru. Shema se može vidjeti na slici 3.4.1. Naime, pomoću komponente “breaker” se odspojila prva faza na primaru te pomoću iste te komponente samo za sve tri faze se na sekundaru napravio prazni hod. Budući da na sekundaru vlada prazni hod na primaru teče struja praznog hoda, ali samo u dvije faze jer prve faze više nema. Otpori vodiča su zanemarivih vrijednosti te se ne uzimaju u obzir.



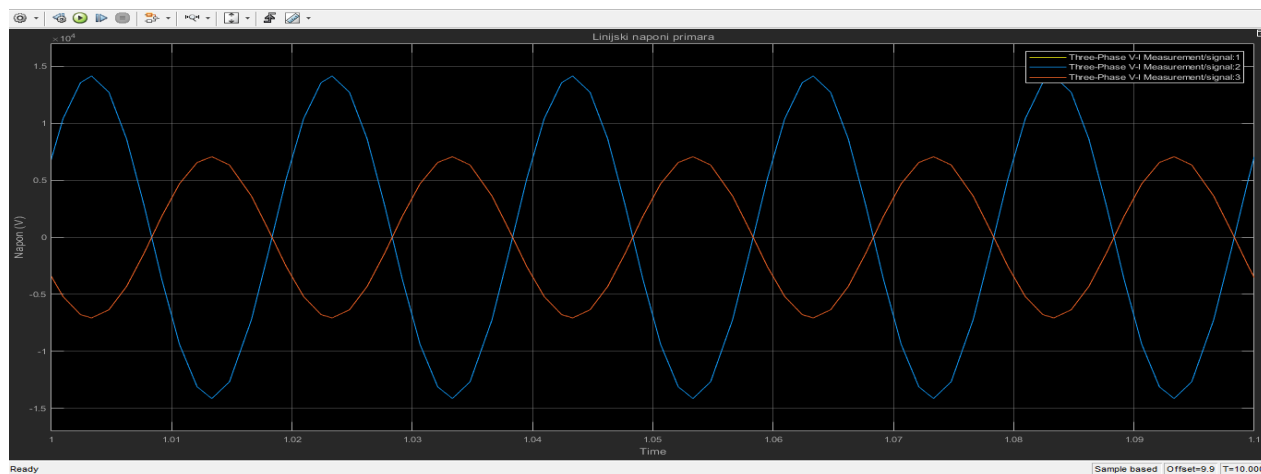
Slika 3.4.1. Shema transformatora nakon prekida faznog vodiča za vrijeme praznog hoda

Struje na primaru će se ponašati na sljedeći način. Struja prve faze to jest faze koja je odspojena će biti nula. Struje druge i treće faze će se znatno smanjiti u odnosu na struje primara kada je transformator u zdravom stanju rada te će biti jednakih iznosa amplituda, ali će im se fazni kutovi razlikovati. U odnosu na normalno stanje transformatora amplitude struja će biti znatno manje te će se fazni kutovi smanjiti. Struja prve faze je označena žutom bojom, struja druge faze je označena plavom bojom te je struja treće faze označena crvenom bojom. Na slici broj 3.4.2. se mogu vidjeti karakteristike struja primara nakon prekida faznog vodiča za vrijeme praznog hoda.



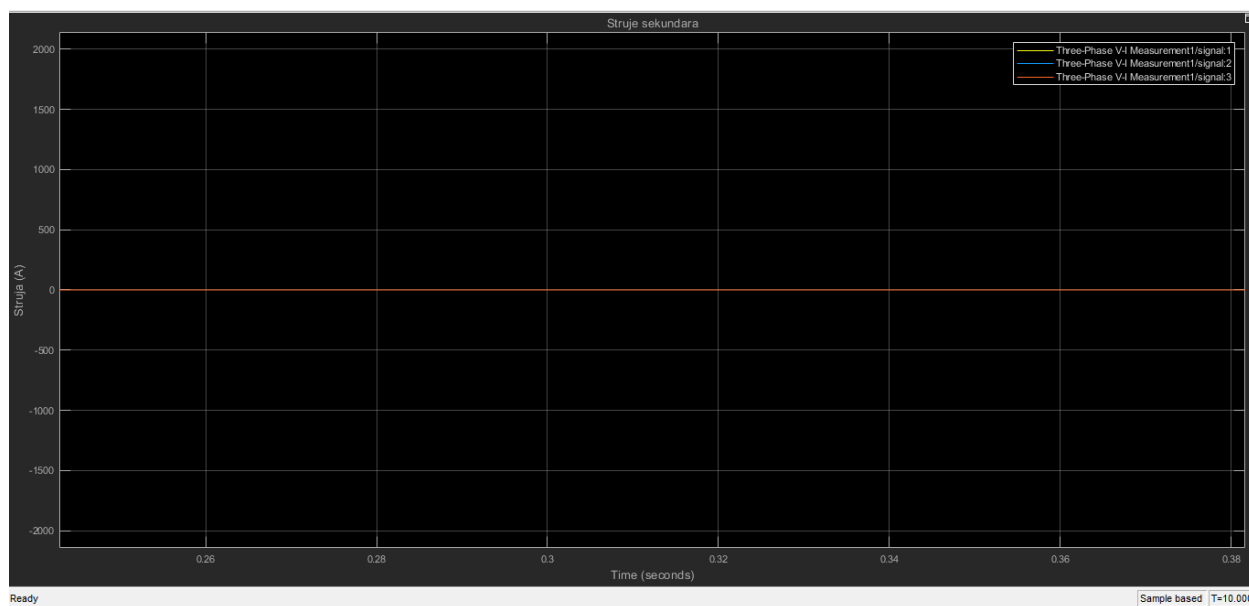
*Slika 3.4.2. Linjske struje primara*

Naponi na primaru će se ponašati isto kao i u slučaju kada je prekinuta jedna faza na primaru, a na sekundaru je opterećen. Napon druge faze će biti isti kao i kad je transformator u zdravom stanju rada. Naponi prve i treće faze su jednaki pa će se na karakteristici preklapati i bit će označeni crvenom bojom. Karakteristika linijskih napona primara se mogu vidjeti na slici 3.4.3.



*Slika 3.4.3. Linjski naponi primara*

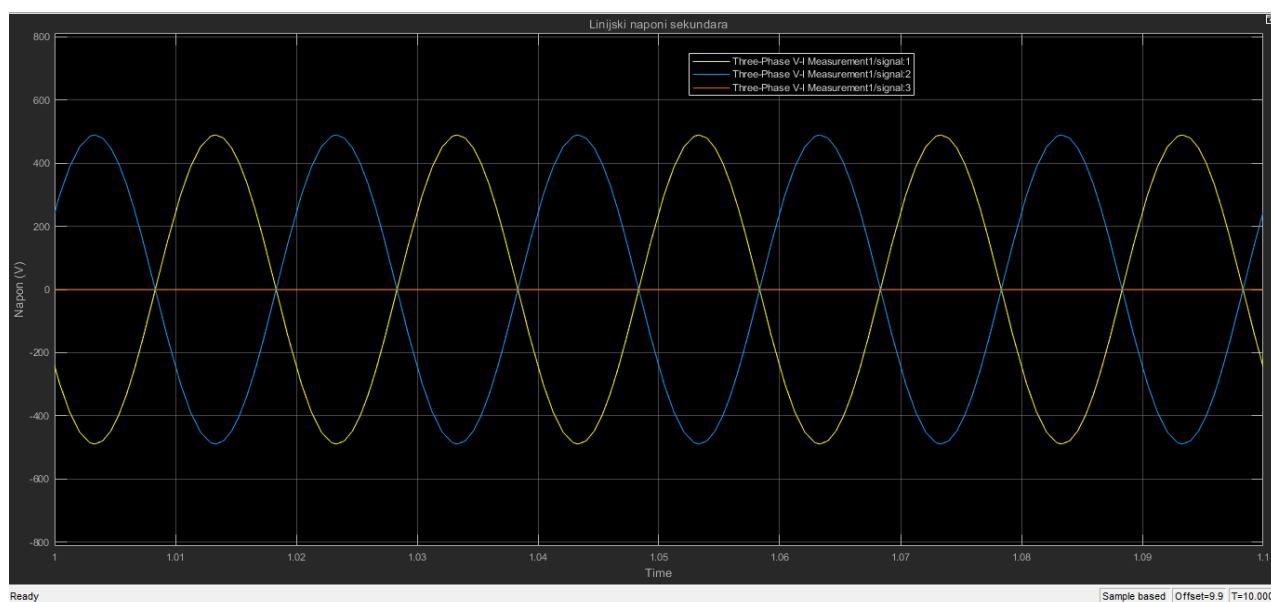
Struje na sekundaru, obzirom da je sekundar u praznom hodu to jest da na sekundaru nema opterećenja, će biti nula u sve tri faze. Budući, da se sve tri struje na karakteristici preklapaju bit će označene crvenom bojom i bit će jednake nuli. Struje na sekundaru se mogu vidjeti na slici 3.4.4.



*Slika 3.4.4. Linjske struje sekundara*

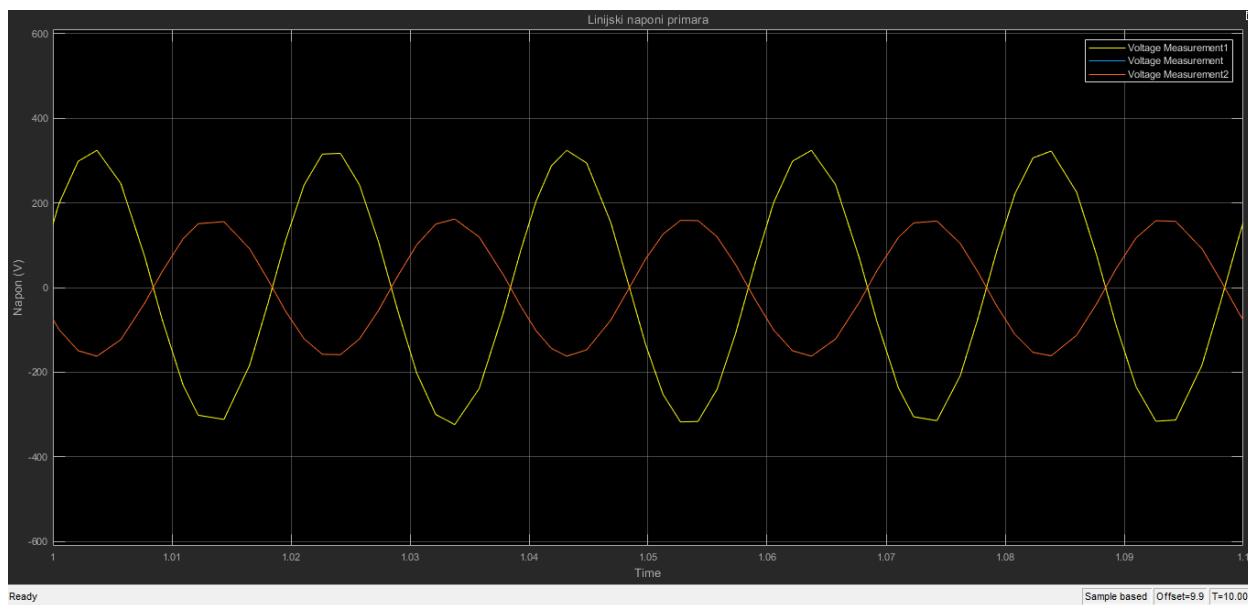
Na slici 3.4.5. su prikazane vršne vrijednosti međufaznih napona na sekundarnoj strani. Naponi prve

i druge faze će biti amplitudno jednaki. U praksi naponi u te dvije faze se razlikuju nešto sitno zbog nesimetrije napona. U ovom slučaju su idealni pa su istih vrijednosti. Pošto su naponi prve i druge faze jednaki, napon treće faze će biti približno jednak nuli. U praksi će taj napon biti nešto malo veći od nule. Naime, vršna vrijednost napona prve faze iznosi 490 V te kada se podijeli s korijenom iz dva će se dobiti efektivna vrijednost koja će iznositi 346 V. Napon druge faze će u ovom slučaju iznositi isti kao i u prvoj fazi, pa će napon treće faze zbog razlike napona prve i druge faze iznositi nula što nije slučaj u praksi jer će u praksi napon treće faze biti puno manji od napona prve i druge faze to jest u idealnom slučaju nula.



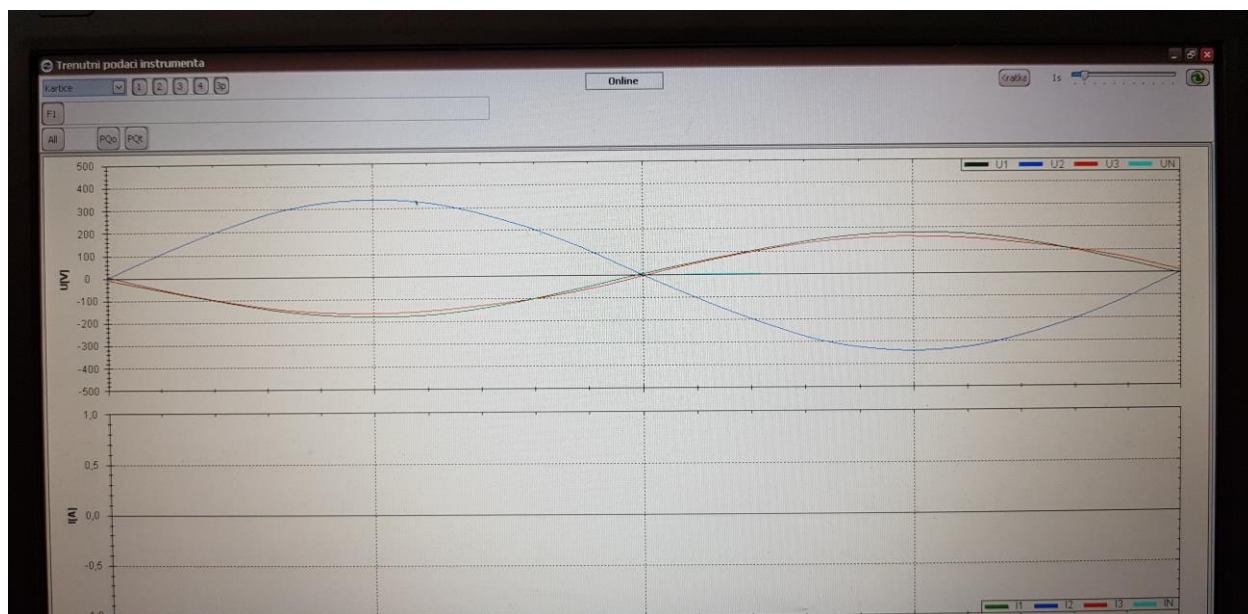
*Slika 3.4.5. Međufazni naponi sekundara*

Na slici 3.4.6. se mogu vidjeti fazni naponi sekundara. Napon prve faze će iznositi 280 V vršno te kada se podijeli s korijenom iz dva dobit će se efektivna vrijednost napona prve faze koja će iznositi 161 V. Naponi druge i treće faze će biti jednakih iznosa što u praksi nije slučaj jer u praksi naponi te dvije faze budu približnih vrijednosti, ali samo u idealnim slučajevima istih. Naponi druge i treće faze će iznositi 128 V efektivne vrijednosti. Tablična mjerenja napona, izmjerena pomoću dijagrama su prikazana na slici 3.4.8.



Slika 3.4.6. Fazni naponi sekundara

Dijagram na slici 3.4.6. koji prikazuje fazne napone sekundara dobivenih simulacijom u Matlabu, mogu se usporediti s dijagramom faznih napona dobivenih mjerenjem na transformatoru Končar u Elektri, Slavonski Brod. Stvarna mjerenja napona se mogu vidjeti na slici 3.4.7.

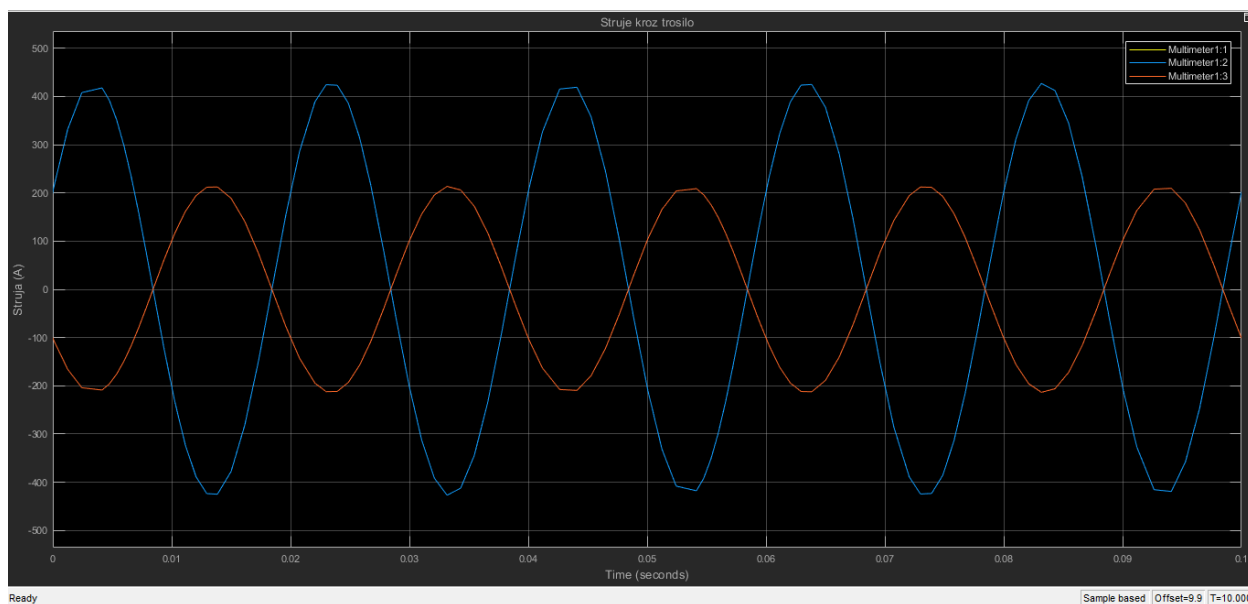


Slika 3.4.7. Fazni naponi sekundara

Naponi primara - vršne vrijednosti				Naponi sekundara - vršne vrijednosti				Fazni naponi - vršne vrijednosti			
U11	6000V			U11	490V			U11	280V		
U12	14000V			U12	491.1V			U12	181.01V		
U13	6000V			U13	0V			U13	181.01V		
Naponi primara - efektivne vrijednosti				Naponi sekundara - efektivne vrijednosti(međufazni)				Fazni naponi - efektivne vrijednosti			
U1	4242.6V			U1	346V			U1	161V		
U2	9899.5V			U2	347.26V			U2	128V		
U3	4242.6V			U3	0V			U3	128V		

Slika 3.4.8. Tablično mjerenje napona nakon prekida faznog vodiča u praznom hodu transformatora

Na slici 3.4.9. su prikazane fazne struje sekundara.



Slika 3.4.9. Fazne struje sekundara

## 4. ZAKLJUČAK

Transformator je uređaj kojim se električna energija prenosi iz jednog sustava u drugi sustav istih frekvencija putem induktivno spojenih vodiča to jest zavojnica transformatora. Rad transformatora zasnovan je na Faraday – Lenzovom zakonu elektromagnetske indukcije. Pojava transformatora je znatno olakšala svakodnevni život te rad postrojenja i pogona. Kako bi transformator imao što bolju funkciju potrebno je poznavati njegove nedostatke i kvarove te načine kako se na što efikasniji i brži način riješiti kvarova. U praksi često dođe do kratkih spojeva transformatora te do prekida pojedine faze iz više razloga kao što su ljudska nepažnja ili uvjeti iz okoline. Kada dođe do prekida faze na primarnoj strani trofaznog transformatora naponi na sekundarnoj strani postanu nesimetrični te različiti u odnosu na normalno stanje transformatora. U idealnim slučajevima napon jedne faze na sekundarnoj strani će pasti na nulu dok će u praksi biti puno manji u odnosu na ostale dvije faze.

## LITERATURA

- [1] *Edison Tech Center, The miracle of Electricity and Engineering*
- [2] *D. Ivanić, završni rad, Teslin transformator, Rijeka, 2015.*
- [3] *J. Knezović, završni rad, Simuliranje dinamičkog ponašanja jednofaznog transformatora u simpowersystemu, Osijek, 2016.*
- [4] *Dijelovi transformatora, Wikipedia, 2019. dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dijeovi\\_transformatora](https://en.wikipedia.org/wiki/Dijeovi_transformatora)*
- [5] *J. Knezović, završni rad, Simuliranje dinamičkog ponašanja jednofaznog transformatora u simpowersystemu, Osijek, 2016.*
- [6] *Električni strojevi, Transformatori, 2019. dostupno na: <https://element.hr/artikli/file/2457>*
- [7] *M. Morić, diplomski rad, Konstrukcija stroja za savijanje potpornih profila namota transformatora, Zagreb, 2017.*
- [8] *Kvarovi transformatora, 2015, dostupno na: [https://issuu.com/davor44/docs/kvarovi\\_transformatora](https://issuu.com/davor44/docs/kvarovi_transformatora)*
- [9] *T. Petković, Kratke upute za korištenje matlaba, Zagreb, 2005.*
- [10] *D. Radovanović, Predavanja iz predmeta električni strojevi, Industrijsko obrtnička škola, Metlačka 3, Pula*
- [11] *Hrvatski ogranak Međunarodne Elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Opatija, 2018.*
- [12] *Amir Norouzi, Open Phase Conditions in Transformers Analysis and Protection Algorithm, Georgia, 2013.*



## SAŽETAK

U ovom završnom radu su modelirana više stanja rada transformatora 10/0,4 kV. Prvo je modeliran transformator u normalnom stanju rada kada je na sekundaru priključen teret te se promatralo kako izgledaju karakteristike napona i struja na visokonaponskoj i niskonaponskoj strani. Zatim se prekinuo napojni vod na primaru te se promatralo stanje nakon kvara. Došlo je do nesimetrije napona na sekundaru i kada je na sekundar bio priključen teret i kada je sekundar bio u praznom hodu. Sve simulacije su napravljene u programu matlab te je svaka karakteristika pojedinih veličina opisana zasebno. Također su obavljena mjerenja u Elektri, Slavonski Brod na transformatoru marke Končar. Dobivena stvarna mjerenja su uspoređena s mjerenjima iz Matlaba.

Ključne riječi: energetski transformator, prazni hod transformatora, prekid faznog vodiča transformatora, rad transformatora, kvarovi transformatora.

## ABSTRACT

In this final paper, several operating modes of the 10 / 0,4 kV transformer were modeled. The transformer in the normal operating state was first modeled when the load was connected to the secondary side, and the characteristics of the voltage and current on the high and low voltage side were observed. Next state of the power transformer observed is one primary phase disconnected and the voltage and current conditions were observed after failure. There was a voltage asymmetry on the secondary in both cases: when the load was connected to the secondary side and when the secondary side was without load (idle). All simulations were made in Matlab and each feature of each voltage-current variables is described separately. Measurements were also taken at Elektra, Slavonski Brod on the Končar brand transformer. The actual measurements obtained were compared with those from the matlab.

Key words: power transformer, transformer idle, transformer phase conductor interruption, transformer operation, transformer failures.

## **ŽIVOTOPIS**

Filip Pirić rođen je 3.8.1996.godine u Osijeku. U Osijeku završava osnovnu školu Mladost te 2011.godine upisuje 2. jezičnu gimnaziju Osijek. 2015.godine ostvaruje upis na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, smjer elektrotehnika. Od 15.11. do 31.21.2018. godine radi kao praktikant u zavodu za urbanizam i izgradnju d.o.o.