

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Nenad M. Belčević

Detekcija prolaznih kvarova na nadzemnim  
vodovima u uslovima zasićenja strujnog  
transformatora

doktorska disertacija

Beograd, 2024

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nenad M. Belčević

Detection of transient faults on overhead lines  
in current transformer saturation conditions

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

## **PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE**

### **Mentor:**

dr Zoran Stojanović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

### **Članovi komisije:**

dr Jelisaveta Krstivojević, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Miodrag Forcan, docent, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet

dr Lazar Saranovac, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Jovan Mikulović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Tomislav Rajić, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

### **Datum odbrane:**

# **Zahvalnica**

*Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, profesoru Zoranu Stojanoviću. Njegovo znanje, profesionalnost i ljudskost bili su moja glavna inspiracija da uopšte započnem doktorske studije i istraživački rad.*

*Posebnu zahvalnost dugujem svojoj voljenoj supruzi Andrijani koja je moja glavna podrška i životni oslonac. Hvala na beskonačnom strpljenju i razumevanju tokom svih ovih godina.*

*Zahvalan sam svojim roditeljima Timi i Milomiru, kao i sestri Tamari, što su mi pružili životni uzor, pomoć i podršku.*

*Zahvaljujem se Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja čiji sam stipendista bio u trajanju od dve godine. Takođe, zahvalnost dugujem kompaniji Go2Power koja je finansirala moje doktorske studije u trajanju od jedne godine.*

*Na kraju, želeo bih da se zahvalim kolegama Dušanu Jakšiću, Draganu Milojeviću i Marku Božilovu koji su pomogli u prikupljanju snimaka sa releja u pogonu, čime su doprineli kvalitetu ove doktorske disertacije.*

# Detekcija prolaznih kvarova na nadzemnim vodovima u uslovima zasićenja strujnog transformatora

## Rezime:

Predmet istraživanja doktorske disertacije je razvoj algoritama koji omogućavaju identifikaciju prirode kvara na nadzemnim vodovima bez obzira na zasićenje strujnog transformatora. Ovom problemu pristupljeno je na dva načina. Prvi pristup podrazumeva razvoj algoritma kojim se otklanjaju negativni efekti zasićenja strujnog transformatora. Nakon primene algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora, identifikacija prirode kvara se realizuje korišćenjem algoritama za detekciju električnog luka koji za svoj rad koriste naponske i strujne signale. Drugi pristup podrazumeva razvoj novog algoritma za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima koji koristi isključivo naponske signale.

Većina kvarova na nadzemnim vodovima je prolaznog karaktera, što omogućava da se kratkotrajnim isključenjem voda kvar eliminiše. Ponovnim dovođenjem voda pod napon nastavlja se normalan rad voda i napajanje potrošača. Pomenuti postupak, poznatiji kao ciklus automatskog ponovnog uključanja, primenjuje se bez obzira na prirodu kvara, što u slučaju trajnog kvara dovodi do nepotrebnog stresa i naprezanja opreme.

Osnovna ideja pametnog sistema automatskog ponovnog uključanja jeste da se unapred identifikuje priroda kvara, te da se u slučaju trajnog kvara blokira sistem automatskog ponovnog uključanja. Jedan od osnovnih problema u radu ovakvog sistema predstavlja nemogućnost njegove primene u uslovima zasićenja strujnog transformatora. Krajnji cilj istraživanja doktorske disertacije jeste razvoj algoritma koji omogućuje identifikaciju prirode kvara na nadzemnim vodovima, bez obzira na eventualno zasićenje strujnog transformatora.

Najvažniji naučni doprinosi disertacije su sledeći:

### ***1. Razvoj novog algoritma za detekciju i kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora***

Primenom novorazvijenog algoritma omogućava se detekcija trenutka nastanka zasićenja strujnog transformatora, detekcija trenutka prestanka zasićenja strujnog transformatora, kao i kompenzacija zasićenja strujnog transformatora, odnosno rekonstrukcija primarne struje strujnog transformatora u fazorskom domenu.

U cilju identifikacije trenutaka nastanka i prestanka zasićenja strujnog transformatora definisane su nove kriterijumske funkcije. Poređenjem vrednosti ovih kriterijumskih funkcija sa unapred definisanim pragom, detektuju se trenuci nagle promene talasnog oblika struje kvara, odnosno trenuci nastanka i prestanka zasićenja strujnog transformatora.

Za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora primenjen je inovativni pristup koji se bazira na obradi razlike vrednosti struje kvara u dva susedna trenutka odabiranja, umesto njihovih pojedinačnih vrednosti. Ovakvim pristupom postignuta je rekonstrukcija fazora primarne struje bez obzira na prisustvo remanentnog fluksa u jezgru strujnog transformatora. Takođe, pomenuti pristup obezbeđuje filtriranje jednosmerne komponente struje kvara. Dodatnu prednost razvijenog algoritma predstavlja činjenica da njegova primena omogućava rekonstrukciju ne samo osnovnog harmonika struje kvara, već i viših harmoničnih komponenti.

Zahvaljujući tome, algoritam se može primeniti u kombinaciji sa algoritmom za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima u cilju identifikacije prirode kvara čak i u uslovima zasićenja strujnog transformatora.

Ispitivanje algoritama izvršeno je na softverskom modelu nadzemnog voda. Obrada signala i prikaz rezultata izvršeni su primenom programskog paketa MATLAB. Pored toga, rad algoritma verifikovan je kroz testiranje na snimcima kvara, preuzetim sa releja u pogonu koji su instalirani na realnim vodovima.

## ***2. Razvoj novog algoritma za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima***

Novi algoritam za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima koji je razvijen u okviru ove doktorske disertacije, za detekciju električnog luka koristi isključivo naponske signale. Na taj način eliminisan je negativan uticaj zasićenja strujnog transformatora na detekciju električnog luka, odnosno dobijen je algoritam neosetljiv na zasićenje strujnog transformatora.

Algoritam se zasniva na obradi signala koji se dobija kao razlika napona na mestu releja i njegovog osnovnog harmonika. U uslovima prolaznog kvara, odnosno kvara sa električnim lukom, pomenuti signal upravo potiče od električnog luka i zahvaljujući tome ima specifične karakteristike koje omogućavaju identifikaciju prirode kvara. Njegovom obradom estimira se napon električnog luka na mestu kvara.

Algoritam zahteva poznavanje signala sa jednog kraja štice vodova što olakšava njegovu implementaciju. Za svoj rad algoritam koristi ne samo fazor napona za vreme kvara, već i fazor napona pre nastanka kvara, odnosno u normalnom radnom stanju.

Testiranje algoritma izvršeno je u programskom paketu MATLAB/Simulink. Pored toga, algoritam je testiran na osnovu strujnih signala zapisanih pomoću releja, koji se nalaze u pogonu elektroenergetskog sistema Srbije.

**Ključne reči:** relejna zaštita, digitalni releji, automatsko ponovno uključanje, nadzemni vod

**Naučna oblast:** Tehničke nauke - Elektrotehnika

**Uža naučna oblast:** Elektroenergetski sistemi

**UDK:** 621.3

# Detection of transient faults on overhead lines in current transformer saturation conditions

## Abstract:

The subject of the doctoral dissertation is the development of algorithms that enable the identification of the nature of faults on overhead lines regardless of the saturation of the current transformer. This problem has been considered in two ways. The first approach involves the development of an algorithm that eliminates the negative effects of current transformer saturation. After applying the algorithm for compensation of current transformer saturation, the identification of the nature of the fault is carried out using arc detection algorithms that use voltage and current signals. The second approach involves the development of a new algorithm for detecting electric arc on overhead lines that uses only voltage signals.

Most of the faults on the overhead lines are of a temporary nature, which allows to eliminate the fault by short-term disconnection. By re-energizing the lines, the normal operation of the lines and the supply of consumers continues. The mentioned procedure, better known as auto-reclosing, is applied regardless of the nature of the fault, which in the case of a permanent fault leads to unnecessary stress of the equipment.

The basic idea of the smart auto-reclosing system is to identify the nature of the fault and block the auto-reclosing system in the event of a permanent fault. One of the main problems in the operation of such a system is the impossibility of its application in conditions of saturation of the current transformer. The final goal of the research of the doctoral dissertation is the development of an algorithm that enables the identification of the nature of the fault on overhead lines, regardless of the possible saturation of the current transformer.

The main scientific contributions of the dissertation are the following:

### ***1. Development of a new algorithm for current transformer saturation detection and compensation***

The application of the developed algorithm enables current transformer saturation onset detection, current transformer saturation ending-point detection, as well as compensation of the saturation of the current transformer, i.e. reconstruction of the primary current of the current transformer in the phasor domain.

To identify the moment of the current transformer saturation onset and saturation ending-point, new criteria functions have been defined. By comparing the values of these criterion functions with a predefined threshold, the moments of sudden change in the waveform of the fault current are detected, i.e. the moments of the saturation onset and saturation ending-point.

An innovative approach was used to compensate the saturation of the current transformer, which is based on processing the difference between the values of the fault current at two successive time instants, instead of their individual values. With this approach, the reconstruction of the primary current phasor was achieved regardless of the presence of remanent flux in the core of the current transformer. Also, the mentioned approach provides filtering of DC components of the fault current. An additional advantage of the developed algorithm is the fact that its application enables the reconstruction of not only the basic

harmonic of the fault current, but also higher harmonic components. The algorithm can be applied in combination with the overhead line arc detection algorithm to identify the nature of the fault even under current transformer saturation conditions.

Algorithmic testing was performed on the software model of the overhead line. Signal processing and results presentation were performed using the MATLAB software package. In addition, the operation of the algorithm was verified by testing on fault recordings, taken from operating relays installed on real lines.

## ***2. Development of a new algorithm for the detection of an electric arc on overhead lines***

The new algorithm for the detection of an electric arc on overhead lines, which was developed as part of this doctoral dissertation, uses only voltage signals for the detection of an electric arc. In this way, the negative influence of the saturation of the current transformer on the detection of the electric arc was eliminated, that is, an algorithm insensitive to the saturation of the current transformer was obtained.

The algorithm is based on processing the signal obtained as the difference between the voltage at the relay point and its fundamental harmonic. In the conditions of a transient fault, i.e. a fault with an electric arc, the mentioned signal originates from the electric arc and because of that it has specific characteristics that enable the identification of the nature of the fault. Its processing estimates the arc voltage at the fault location.

The algorithm requires a signal from one end of the protected line, which facilitates its implementation. The algorithm uses not only the voltage phasor during the fault, but also the voltage phasor before the fault occurs, i.e. in the normal operating state.

Algorithmic testing was performed in the MATLAB/Simulink software package. In addition, the algorithm was tested on current signals recorded using relays, which are in the electric power system of Serbia.

**Keywords:** relay protection, digital relay, auto-reclosing, overhead lines

**Scientific field:** Technical engineering – Electrical engineering

**Specific scientific field:** Power Systems

**UDK:** 621.3



# Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Algoritmi za detekciju zasićenja strujnog transformatora</b> .....	4
2.1 Detekcija zasićenja ST na osnovu razlike estimirane vrednosti i stvarne vrednosti strujnog signala.....	4
2.2 Primena filtra ( <i>smoothing</i> filtri).....	5
2.2.1 Savitzky-Golay filter .....	5
2.2.2 Lanczos filter.....	5
2.3 Primena matematičke morfologije .....	6
2.4 Primena izvoda struje .....	9
2.5 Prozor za procenu simetrije.....	9
2.6 Primena transformacije talasićima (Wavelet Transformation) .....	11
<b>3. Algoritmi za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora</b> .....	13
3.1 Kompenzacija zasićenja ST korišćenjem odbiraka strujnog signala iz perioda bez zasićenja ....	13
3.1.1 Metoda najmanjih kvadrata .....	13
3.1.2 Metoda bazirana na malom broju odbiraka .....	15
3.2 Kompenzacija zasićenja ST korišćenjem ekvivalentne šeme ST .....	16
3.2.1 Estimacija inicijalnog fluksa na osnovu perioda bez zasićenja strujnog transformatora .....	18
3.2.2 Estimacija inicijalnog fluksa u trenutku nastanka zasićenja strujnog transformatora .....	18
3.3 Kompenzacija zasićenja ST primenom metode najmanjih kvadrata u intervalu zasićenja .....	22
3.4 Kompenzacija zasićenja strujnog transformatora primenom neuralnih mreža.....	23
<b>4. Algoritmi za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima</b> .....	24
4.1 Algoritmi u fazorskom domenu.....	24
4.1.1 Trofazni kvarovi sa električnim lukom.....	24
4.1.2 Jednofazni kvarovi sa električnim lukom.....	26
4.1.3 Jednofazni kvarovi sa električnim lukom i velikom prelaznom otpornošću na mestu kvara.....	27
4.2 Algoritmi u vremenskom domenu .....	29
4.2.1 Algoritmi bazirani na signalima sa jednog kraja voda.....	29
4.2.2 Algoritmi bazirani na signalima sa oba kraja voda.....	32
<b>5. Predloženi algoritam za detekciju i kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora</b> .....	35
5.1 Izvođenje algoritma .....	35
5.1.1 Eliminacija jednosmerne komponente struje kvara.....	35
5.1.2 Algoritam za detekciju trenutka nastanka zasićenja .....	37
5.1.3 Algoritam za kompenzaciju zasićenja .....	39

5.1.4	Algoritam za detekciju prestanka zasićenja.....	42
5.2	Modelovanje sistema potrebnog za simulaciju pomoću programskog paketa – MATLAB/Simulink.....	43
5.2.1	Modelovanje strujnog transformatora .....	43
5.2.2	Modelovanje električnog luka .....	44
5.2.3	Modelovanje nadzemnog voda i mreže.....	45
5.3	Testiranje algoritma pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink.....	46
5.3.1	Analiza uticaja tipa zasićenja strujnog transformatora .....	46
5.3.2	Analiza uticaja tipa opterećenja strujnog transformatora .....	61
5.3.3	Analiza uticaja remanentnog fluksa.....	68
<b>6.</b>	<b>Predloženi algoritam za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima .....</b>	<b>82</b>
6.1	Izvođenje algoritma .....	82
6.1.1	Početna razmatranja.....	82
6.1.2	Preliminarna estimacija napona luka .....	83
6.1.3	Aproksimativno određivanje lokacije kvara .....	88
6.1.4	Finalna estimacija napona luka .....	90
6.1.5	Određivanje pomoćnog signala u difuziji .....	91
6.2	Testiranje algoritma pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink.....	92
6.2.1	Analiza uticaja lokacije kvara.....	92
6.2.2	Analiza uticaja vrednosti napona luka .....	96
6.2.3	Analiza uticaja trenutka nastanka kvara .....	99
6.2.4	Analiza uticaja otpornosti rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba .....	102
6.2.5	Analiza uticaja impedanse mreže .....	104
6.2.6	Analiza uticaja talasnog oblika električnog luka .....	107
6.2.7	Analiza rada algoritma u slučaju međufaznog kvara.....	111
<b>7.</b>	<b>Testiranje algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora na snimcima kvara.....</b>	<b>127</b>
<b>8.</b>	<b>Testiranje algoritma za detekciju električnog luka na snimcima kvara.....</b>	<b>132</b>
8.1	Snimak kvara na dalekovodu TS Novi Sad 3 – RP Mladost .....	132
8.2	Snimak kvara na dalekovodu TS Bor 2 – TS Niš 2 .....	135
8.3	Snimak kvara na dalekovodu TS Beograd 3 – TS Beograd 16 .....	139
<b>9.</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>142</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>144</b>

# 1. Uvod

Nadzemni vodovi su jedan od osnovnih elemenata elektroenergetskog sistema. Njihova osnovna uloga jeste prenos električne energije. Imajući u vidu njihov značaj i rasprostranjenost, zaštiti nadzemnih vodova posvećena je posebna pažnja.

Neusmerena prekostrujna zaštita predstavlja najjednostavniju zaštitu vodova [1]. Njeno reagovanje uslovljeno je porastom struje usled pojave kvara na šticeu vodu. Primenom neusmerene prekostrujne zaštite moguće je ostvariti selektivnost kod radijalnih mreža, odnosno jednostrano napajanih vodova. Iz tog razloga, neusmerena prekostrujna zaštita predstavlja osnovnu zaštitu vodova u okviru distributivnih sistema.

Uvođenjem usmerenog elementa, reagovanje prekostrujne zaštite se dodatno uslovljava smerom kvara. Naime, kod usmerenih prekostrujnih zaštita pored struje kvara, koristi se i informacija o smeru kvara, odnosno informacija o tome da li je kvar ispred ili iza releja gledao u smeru šticeu voda. Na ovaj način moguće je ostvariti selektivnost zaštite i u slučaju dvostrano napajanih vodova.

Kod petljastih, višestranu napajanih mreža, kakve su mreže prenosnog sistema, selektivnost zaštite postiže se primenom distantne i diferencijalne zaštite. Reagovanje distantne zaštite uslovljeno je vrednošću impedanse petlje kvara, odnosno rastojanjem kvara od releja. Diferencijalna zaštita koristi strujne signale sa oba kraja šticeu elementa i na osnovu njihove razlike donosi odluku o tome da li je kvar unutar ili izvan šticeu zone.

Kvarovi na nadzemnim vodovima po svojoj prirodi mogu biti trajni ili prolazni [2]. Najveći broj kvarova (80 – 90 %) je prolaznog karaktera. Osnovna karakteristika prolaznog kvara jeste pojava električnog luka, kada se struja kvara zatvara kroz jonizovani vazduh. Električni luk gori između rogova ili reketa izolatorskog lanca ili između faznih provodnika i zemlje. Usled kratkotrajnog isključenja voda dolazi do dejonizacije vazduha i gašenja električnog luka. Nakon ponovnog uključenja voda, luk se više ne pali, i vod može nastaviti sa normalnim radom. Trajanje beznaponske pauze je u direktnoj korelaciji sa naponskim nivoom posmatranog nadzemnog voda. Kod 110 kV voda, vreme potrebno za gašenje luka iznosi oko 140 ms, kod 220 kV voda ovo vreme iznosi oko 300 ms, dok kod 400 kV voda iznosi 400 ms. Međutim, bez obzira na naponski nivo, trajanje beznaponske pauze je takvo da se ona ne odražava na kontinuitet napajanja potrošača. Činjenica da se kratkotrajnim isključenjem voda može eliminisati prolazni kvar bez posledica u pogledu kontinuiteta napajanja potrošača, prepoznata je i implementirana u okviru sistema automatskog ponovnog uključenja (APU).

Primena sistema APU podrazumeva određenu sekvencu radnji bez obzira na prirodu kvara. Najpre zaštita detektuje kvar na nadzemnom vodu i šalje prekidačima nalog za isključenje, zatim se prekidači otvaraju i isključuju vod, a nakon pauze unapred definisanog trajanja šalje se nalog prekidačima za ponovno uključenje. Na kraju, prekidači se zatvaraju i vod se ponovo dovodi pod napon. U slučaju prolaznog kvara ovakav postupak dovodi do eliminacije kvara (uspešan ciklus APU). U slučaju neuspešnog ciklusa APU (trajan kvar) zaštita ponovo detektuje kvar, šalje prekidačima nalog za isključenje i prekidači trajno isključuju vod. Sistem APU primenjuje se na svim naponskim nivoima. Pri tome, na nižim naponskim nivoima primenjuje se trolni sistem APU, dok se u prenosnim mrežama obično primenjuje jednopolni sistem APU. Jednopolni sistem automatskog ponovnog uključenja podrazumeva da se u slučaju jednofaznog kvara isključuje samo faza pogođena kvarom. Kao posledica toga, ostvaruje se prenos električne energije preko preostale dve faze koje nisu pogođene kvarom (zdrave faze), što se pozitivno odražava na stabilnost elektroenergetskog sistema.

Osnovni nedostatak tradicionalnog sistema APU predstavlja činjenica da sistem ulazi u ponovno uključenje bez obzira na prirodu kvara [2]. Imajući u vidu da su kvarovi na nadzemnim vodovima najčešće prolaznog karaktera (80 – 90 % svih kvarova), u najvećem broju slučajeva ovakav pristup dovodi do željenog efekta, a to je eliminacija kvara. Međutim, u slučaju trajnog kvara, beznaponska pauza ne dovodi do eliminacije kvara i APU sistem inicira ponovno uključenje na kvar. Usled toga, oprema se izlaže nepotrebnom stresu i naprezanju.

Razvoju pametnog sistema automatskog ponovnog uključjenja posvećena je posebna pažnja u naučnoj literaturi. Osnovna ideja jeste da se na osnovu naponskih i strujnih signala na početku voda identifikuje prisustvo luka na mestu kvara i na osnovu toga odluči o prirodi kvara. Ukoliko algoritam detektuje električni luk, kvar je prolaznog karaktera i ulazi se u ciklus APU. U suprotnom, kvar je trajan i APU sistem se blokira. Pri tome, polazi se od činjenice da je električni luk nelinearna pojava, odnosno da je talasni oblik napona luka veoma blizak pravougaonoj četvrtci koja je u fazi sa strujom luka. Algoritmi pametnog sistema APU mogu se grubo podeliti na algoritme razvijene u fazorskom domenu [3-6] i algoritme u vremenskom domenu [7-12]. Algoritmi u fazorskom domenu koriste činjenicu da se kao posledica nelinearnosti električnog luka javljaju određena naponska i strujna harmonijska izobličenja. Algoritmi u vremenskom domenu zasnivaju se na primeni metode najmanjih kvadrata u cilju estimacije parametara električnog luka. Bez obzira na primenjeni pristup, algoritmi pametnog sistema APU za svoj rad zahtevaju poznavanje naponskih i strujnih signala na mestu releja.

Činjenica da u određenim okolnostima tokom kvara može doći do zasićenja strujnog transformatora, otežava primenu pametnog sistema APU. Naime, u normalnim radnim uslovima greška koju strujni transformator unosi može se smatrati zanemarljivom. Međutim, tokom kvara dolazi do naglog porasta struje što u određenim okolnostima može dovesti do zasićenja strujnog transformatora. Ulazak u zasićenje dovodi do naglog porasta struje magnećenja strujnog transformatora, što izaziva značajnu razliku između struje primara i sekundara. Posledično, struja sekundara postaje deformisana i ne može se upotrebiti za detekciju električnog luka. Dimenzionisanje strujnog transformatora na način kojim se obezbeđuje da ni pod kakvim uslovima ne dođe do njegovog zasićenja, nije praktično i ekonomski opravdano.

Cilj ove doktorske disertacije jeste razvoj algoritma za detekciju električnog luka koji je primenljiv i u uslovima zasićenja strujnog transformatora. Ovom problemu pristupljeno je na dva načina. Prvi pristup podrazumeva razvoj novog algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora [13]. Njegovom primenom otklanjaju se negativne posledice zasićenja strujnog transformatora, odnosno vrši se rekonstrukcija struje primara strujnog transformatora. Činjenica da algoritam omogućava rekonstrukciju ne samo osnovnog harmonika, već i viših harmoničnih komponenti struje kvara, omogućava njegovu primenu u kombinaciji sa postojećim algoritmima za detekciju električnog luka koji za svoj rad koriste naponske i strujne signale. U okviru drugog pristupa, razvijen je algoritam za detekciju električnog luka koji koristi isključivo naponske signale. Na taj način eliminisan je negativan uticaj zasićenja strujnog transformatora na detekciju električnog luka, odnosno dobijen je algoritam neosetljiv na zasićenje strujnog transformatora [14].

Još jedan od ciljeva ove doktorske disertacije jeste detaljan pregled literature iz oblasti detekcije zasićenja strujnog transformatora, kompenzacije zasićenja strujnog transformatora i detekcije električnog luka na nadzemnim vodovima.

Doktorska disertacija je organizovana u devet poglavlja. U prvom poglavlju data su uvodna razmatranja i istaknuti su osnovni ciljevi istraživanja doktorske disertacije. Drugo poglavlje obuhvata pregled naučne literature iz oblasti detekcije zasićenja strujnog

transformatora, dok treće poglavlje predstavlja pregled najznačajnijih naučnih radova publikovanih na temu kompenzacije zasićenja strujnog transformatora. Četvrto poglavlje predstavlja analizu algoritama publikovanih u naučnoj literaturi iz oblasti detekcije električnog luka na nadzemnim vodovima. U petom poglavlju izložen je novi algoritam za detekciju i kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora. Takođe, prikazan je i model formiran u MATLAB/Simulink programskom paketu koji je korišćen za testiranje algoritama razvijenih u okviru ove doktorske disertacije. Poseban deo petog poglavlja predstavlja testiranje predloženog algoritma i analiza mogućnosti njegove primene zajedno sa algoritmom za detekciju električnog luka, a u cilju identifikacije prirode kvara u uslovima zasićenja strujnog transformatora. U šestom poglavlju predložen je novi algoritam za detekciju električnog luka korišćenjem isključivo naponskih signala. Poseban deo ovog poglavlja predstavlja analiza uticaja različitih veličina na rad algoritma. Sedmo poglavlje obuhvata testiranje algoritma za detekciju i kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora na signalima preuzetim sa releja u pogonu. U osmom poglavlju dato je testiranje algoritma za detekciju električnog luka koje je izvršeno na signalima prikupljenih sa releja koji se nalaze u pogonu, čime je algoritam verifikovan i pri kvarovima u realnoj mreži. U devetom poglavlju su istaknuti najvažniji zaključci u pogledu ostvarenih doprinosa ove doktorske disertacije.

## 2. Algoritmi za detekciju zasićenja strujnog transformatora

U naučnoj literaturi publikovan je značajan broj radova na temu detekcije zasićenja strujnog transformatora (ST). Ovi radovi grubo se mogu podeliti u sledeće kategorije:

- detekcija zasićenja ST na osnovu razlike estimirane vrednosti i stvarne vrednosti strujnog signala,
- detekcija zasićenja ST primenom filtra,
- detekcija zasićenja ST primenom matematičke morfologije,
- detekcija zasićenja ST primenom izvoda,
- detekcija zasićenja ST primenom prozora za procenu simetrije,
- detekcija zasićenja ST primenom transformacije talasićima.

Više reči o ovim pojedinačnim pristupima dato je u narednom tekstu.

### 2.1 Detekcija zasićenja ST na osnovu razlike estimirane vrednosti i stvarne vrednosti strujnog signala

Kao kriterijumska funkcija za detekciju trenutka nastanka zasićenja strujnog transformatora koristi se razlika između estimirane vrednosti strujnog signala u određenom trenutku i stvarne vrednosti strujnog signala (tj. struje na sekundaru ST) u tom trenutku. Estimacija vrednosti strujnog signala vrši se pod pretpostavkom da strujni transformator u tom trenutku nije u režimu zasićenja. Posledično, ukoliko u posmatranom trenutku nije došlo do zasićenja ST, razlika između estimirane vrednosti i stvarne vrednosti signala ima malu vrednost. S druge strane, ukoliko dođe do zasićenja ST vrednost posmatrane razlike naglo raste.

Estimacija vrednosti strujnog signala u određenom trenutku, može se izvršiti primenom metode najmanjih kvadrata na set odbiraka koji su vremenski ispred razmatranog trenutka [15], [16]. Naime, primenom metode najmanjih kvadrata na set odbiraka koji su vremenski ispred razmatranog trenutka mogu se odrediti parametri unapred usvojenog talasnog oblika strujnog signala. Iako ovakav pristup ima prednosti u pogledu tačnosti estimacije, njegova primena je računarski zahtevna (neophodno izračunavanje pseudoinverzne matrice za svaki odbirak) i ne može se primeniti u slučaju ranog zasićenja ST kada algoritam nema dovoljno odbiraka na raspolaganju kako bi se pouzdano odredili parametri usvojenog talasnog oblika strujnog signala.

Drugi pristup za estimaciju vrednosti strujnog signala u određenom trenutku zasniva se na pretpostavci da usled visoke frekvencije odabiranja (tj. malog koraka odabiranja) kod savremenih mikroprocesorskih releja, dolazi do male promene vrednosti signala u dva susedna intervala odabiranja [17], [18]. Drugim rečima, može se pretpostaviti da je vrednost izvoda struje u intervalu između odbiraka  $n-2$  i  $n-1$  približno jednaka vrednosti izvoda struje u intervalu između odbiraka  $n-1$  i  $n$ . Tačnost ove pretpostavke se povećava sa povećanjem reda izvoda koji se posmatra. Tako se za estimaciju vrednosti strujnog signala koristi treći izvod struje. Polazeći od pretpostavke da je vrednost trećeg izvoda strujnog signala na intervalu između odbiraka  $n-2$

i  $n-1$  jednaka vrednosti trećeg izvoda strujnog signala na intervalu između odbiraka  $n-1$  i  $n$ , može se izvesti sledeća relacija za estimaciju vrednosti strujnog signala u posmatranom trenutku ( $n$ ):

$$i_s[n] \approx 4i_s[n-1] - 6i_s[n-2] + i_s[n-3] - i_s[n-4] \quad (2.1)$$

## 2.2 Primena filtra (*smoothing* filtri)

### 2.2.1 Savitzky-Golay filter

Polazna pretpostavka je da se filtrirana vrednost signala u određenom vremenskom trenutku može odrediti kao vrednost polinoma u tom trenutku, pri čemu se koeficijenti polinoma mogu dobiti primenom metode najmanjih kvadrata na prozor odbiraka signala određene dužine. Međutim, Savitzki i Golay su pokazali da za posmatrani vremenski trenutak, filtrirana vrednost signala (vrednost polinoma u posmatranom trenutku) odgovara linearnoj kombinaciji vrednosti odbiraka signala iz posmatranog prozora [19]. Drugim rečima, vrednost polinoma kojim se filtrira (aproksimira) signal u posmatranom trenutku, ne mora se određivati primenom metode najmanjih kvadrata na prozor odbiraka ulaznog signala – njegova vrednost može se odrediti kao proizvod određenih koeficijenata i odbirka signala iz posmatranog prozora. Pri tome, težinski koeficijenti imaju fiksne vrednosti za definisani red polinoma i dužinu posmatranog prozora odbiraka (ne moraju se izračunavati za svaki novi set ulaznih podataka).

Za detekciju intervala zasićenja ST predlaže se polinom trećeg stepena i prozor dužine sedam odbiraka [20]. Za ovako definisane parametre, filtrirana vrednost signala, koja se koristi i kao kriterijumska funkcija za detekciju trenutka nastanka/prestanka zasićenja strujnog transformatora, data je sledećim izrazom:

$$\text{del } 2sg[n] = \{5i_s[n] - 3i_s[n-2] - 4i_s[n-3] - 3i_s[n-4] + 5i_s[n-6]\}/42 \quad (2.2)$$

U prethodnoj relaciji, sa  $i_s$  označena je struja sekundara strujnog transformatora.

### 2.2.2 Lanczos filter

Lanczos filter našao je osnovnu primenu kod ublažavanja Gibsovog fenomena (oscilacija) [21]. Gibsov fenomen je oscilatorno ponašanje Furijeovog reda u okolini skokovite promene (diskontinuiteta) originalnog signala. Naime, pri skokovitoj promeni signala, vrednost Furijeovog reda kojim se aproksimira posmatrani signal premašuje vrednost originalnog signala (posmatrana greška iznosi približno 9% u odnosu na vrednost skokovite promene signala). Ova greška ostaje prisutna i sa povećanjem broja članova Furijeovog reda.

Lanczos je predložio uvođenje takozvanih Sigma faktora. Množenjem originalnih Furijeovih koeficijenata sa predloženim Sigma faktorima, dolazi do smanjenja greške pri skokovitoj promeni (diskontinuitetu) signala.

Ovaj filter može se primeniti i u domenu detekcije intervala zasićenja ST [22]. Primenom niskopropusnog Lanczosovog filtra na dva susedna odbirka, a potom oduzimanjem ovako dobijenih vrednosti, dobija se sledeća kriterijumska funkcija kojom se mogu detektovati trenuci nastanka/prestanka zasićenja ST:

$$\begin{aligned} \text{dellan}[n] = & i_S[n] - 9i_S[n-1] + 8i_S[n-2] + 8i_S[n-3] - 9i_S[n-4] \\ & + i_S[n-5] \end{aligned} \quad (2.3)$$

Generalna prednost algoritama koji za detekciju zasićenja ST koriste izlaze iz različitih filtera jeste u njihovoj jednostavnosti i lakoj implementaciji. Takođe, ovi algoritmi pokazuju značajnu robusnost u odnosu na prisustvo suma u strujnom signalu.

## 2.3 Primena matematičke morfologije

Matematička morfologija je metoda obrade signala koja se prvenstveno primenjuje u domenu obrade slike, ali je svoju primenu našla i u drugim oblastima. Matematička morfologija zasniva se na obradi originalnog signala pomoćnom funkcijom, koja se najčešće naziva strukturni element. Kontinuiranim pomeranjem strukturnog elementa duž signala, eliminiše se šum, pri čemu se zadržavaju korisni detalji sadržani u originalnom signalu. Dve osnovne operacije matematičke morfologije su dilatacija ( $\oplus$ ) i erozija ( $\ominus$ ). Njihovim kombinovanjem izvodi se operacija otvaranja ( $\circ$ ) i operacija zatvaranja ( $\bullet$ ), koje se najčešće primenjuju u matematičkoj morfologiji.

Neka je  $f(z)$  originalni signal, a  $g(x)$  strukturni element. Operacije matematičke morfologije mogu se definisati sledećim relacijama:

- Dilatacija:

$$(f \oplus g)(z) = \max(f(z-x) + g(x) \mid x \in g, (z-x) \in f) \quad (2.4)$$

- Erozija:

$$(f \ominus g)(z) = \min(f(z+x) - g(x) \mid x \in g, (z+x) \in f) \quad (2.5)$$

- Otvaranje (Opening):

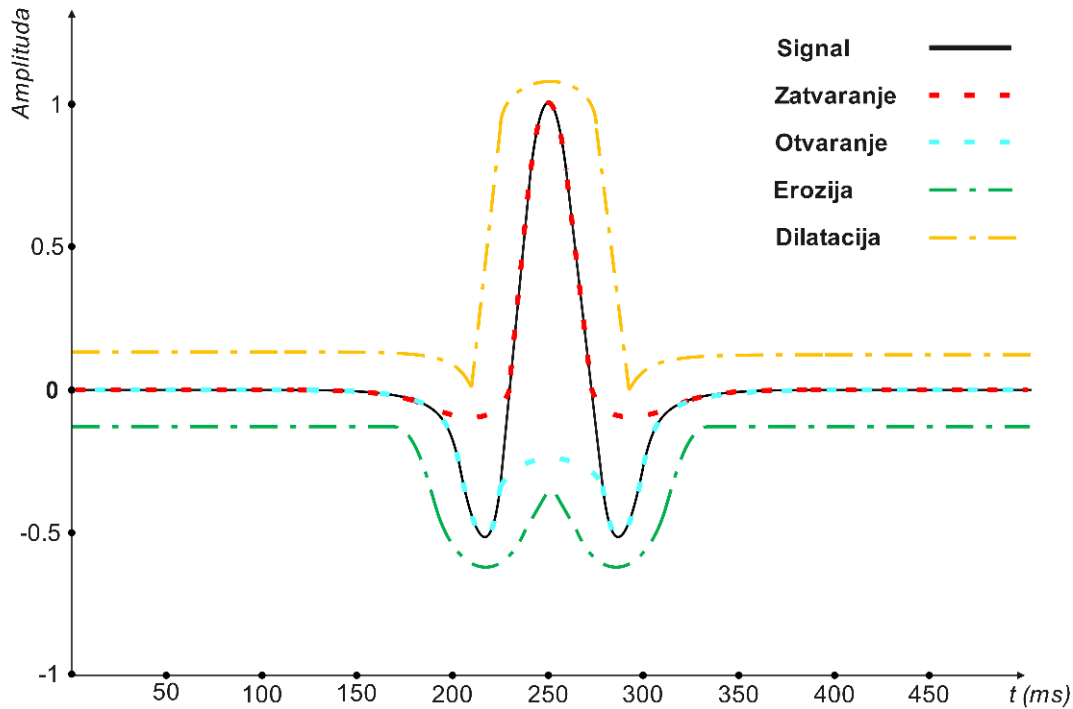
$$(f \circ g) = (f \ominus g) \oplus g \quad (2.6)$$

- Zatvaranje (Closing):

$$(f \bullet g) = (f \oplus g) \ominus g \quad (2.7)$$

Može se zaključiti da su vrednosti koje se dobijaju primenom erozije uvek ispod originalnog signala (spuštanje signala), dok su vrednosti koje se dobijaju primenom dilatacije uvek iznad originalnog signala (podizanje signala). S druge strane, operacijom otvaranja potiskuju se pozitivni pikovi u signalu, dok se operacijom zatvaranja potiskuju negativni pikovi u signalu. Ilustrativni primer ponašanja pojedinih operacija matematičke morfologije dat je na slici ispod:





Slika 1 Operacije matematičke morfologije – dilatacija, erozija, otvaranje i zatvaranje (ilustracija preuzeta iz [23])

U narednom tekstu dati su primeri primene matematičke morfologije u cilju detekcije zasićenja strujnog transformatora.

### 1. Top-hat transformacija [24]

Kod ovog algoritma polazi se od sledećih relacija:

$$x_1(n) = \text{med} \{x_0(2n-1), x_0(2n), x_0(2n+1)\} \quad (2.8)$$

$$y_1(n) = x_0(2n+k) - 2x_1(n) + x_0(2n-k) \quad (2.9)$$

U prethodnim relacijama, sa  $x_0$  označen je originalni strujni signal.

Dalje se na signal  $y_1$  primenjuju operacije otvaranja i zatvaranja:

$$f = (y_1 \circ g + y_1 \bullet g) / 2 \quad (2.10)$$

U relaciji (2.10)  $g$  označava strukturni element.

Na kraju, za detekciju zasićenja koristi se sledeća funkcija (Top-hat operacija):

$$T_{TH}(f) = f - f \circ g \quad (2.11)$$

### 2. Morfološki gradijent [26]

Algoritam za detekciju zasićenja strujnog transformatora koji se bazira na morfološkom gradijentu, polazi od sledećih relacija:

$$x_1(n) = \text{med} \{x_0(2n-1), x_0(2n), x_0(2n+1)\} \quad (2.12)$$

$$\text{del}(n) = x_1(n) - x_h(n) \quad (2.13)$$

Morfološki gradijent može se definisati sledećom relacijom:

$$\text{MG} = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x) \quad (2.14)$$

U cilju detekcije intervala zasićenja ST (trenutka nastanka i trenutka prestanka zasićenja), koristi se izvesna modifikacija morfološkog gradijenta koja se primenjuje na signal  $del(n)$ :

$$y^+(n) = (del \circ g^+ \oplus g^+)(n) - (del \bullet g^+ \ominus g^+)(n) \quad (2.15)$$

$$y^-(n) = (del \circ g^- \oplus g^-)(n) - (del \bullet g^- \ominus g^-)(n) \quad (2.16)$$

$$y = y^+ + y^- \quad (2.17)$$

U prethodnim relacijama oznake imaju sledeće značenje:

- $x_0$  - originalni strujni signal.
- $x_h$  - signal dobijen primenom Hilbertove transformacije na originalni strujni signal
- $g^+$  i  $g^-$  - strukturni elementi. Primenom strukturnog elementa  $g^+$  naglašavaju se pozitivni pikovi u signalu koji se obrađuje, dok se primenom strukturnog elementa  $g^-$  naglašavaju negativni pikovi u signalu koji se obrađuje.

### 3. Dekompozicija [25]

Morfološka dekompozicija je još jedan princip matematičke morfologije koji se može koristiti u cilju detekcije intervala zasićenja strujnog transformatora.

Kao i kod prethodna dva algoritma, polazi se od signala  $x_l$  definisanog sledećom relacijom:

$$x_1(n) = \text{med} \{x_0(2n - 1), x_0(2n), x_0(2n + 1)\} \quad (2.18)$$

Dalje se na signal  $x_l$  primenjuju operacije dilatacije i erozije:

$$x_1^d(n) = x_1(n) \oplus g^+(n) \quad (2.19)$$

$$x_1^e(n) = x_1(n) \ominus g^-(n) \quad (2.20)$$

Na kraju se za detekciju zasićenja strujnog transformatora koristi signal  $y_l$ , koji je definisan sledećim relacijama:

$$y_1^d(n) = x_0(2n + k) - 2x_1^d(n) + x_0(2n + k) \quad (2.21)$$

$$y_1^e(n) = x_0(2n + k) - 2x_1^e(n) + x_0(2n + k) \quad (2.22)$$

$$y_1(n) = y_1^e(n) - y_1^d(n) \quad (2.23)$$

Može se konstatovati da su algoritmi za detekciju zasićenja strujnog transformatora zasnovani na principima matematičke morfologije, složeni i računarski zahtevni. Takođe, primena ovih algoritama unosi određeno kašnjenje pri detekciji zasićenja strujnog transformatora, što direktno zavisi od izabranog strukturnog elementa. S druge strane, njihovom primenom efikasno se potiskuje šum u strujnom signalu koji predstavlja osnovni problem u radu drugih algoritama za detekciju zasićenja strujnog transformatora. Iz tog razloga, može se konstatovati da algoritme bazirane na matematičkoj morfologiji karakteriše viši nivo pouzdanosti.

## 2.4 Primena izvoda struje

Najjednostavniji pristup za detekciju zasićenja ST podrazumeva izračunavanje izvoda struje i njegovo poređenje sa unapred definisanim pragom. Ukoliko u posmatranom trenutku nije došlo do zasićenja ST, vrednost izvoda struje je mala. S druge strane, u trenutku nastanka zasićenja ST dolazi do nagle promene izvoda struje – njegova vrednost prevazilazi vrednost definisanog praga reagovanja i na taj način se detektuje zasićenje. Kako bi se zasićenje što tačnije identifikovalo, umesto prvog izvoda, koriste se drugi [27, 28] i treći izvod strujnog signala [29-32].

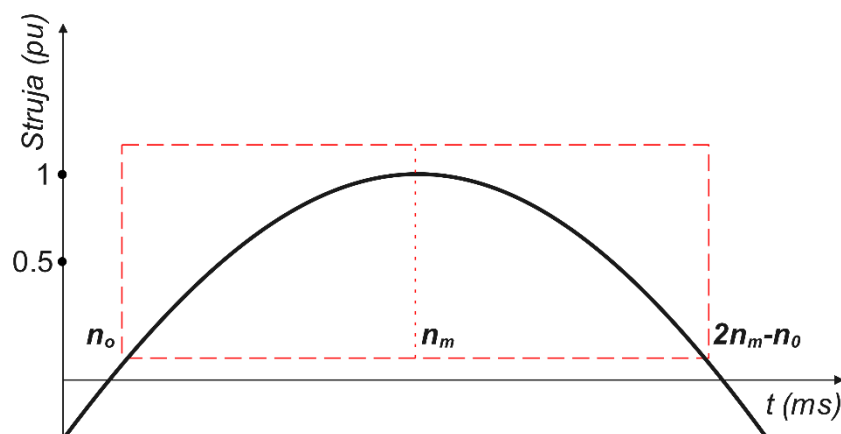
Osnovna prednost ovog koncepta ogleda se u njegovoj jednostavnosti. Algoritmi nisu računarski zahtevni i mogu se jednostavno implementirati. Međutim, značajna manjkavost algoritama iz ove grupacije ogleda se u njihovoj naročitoj osetljivosti na prisustvo šuma u strujnom signalu (tj. struji sekundara ST).

Pored toga, treba imati u vidu da blaga zasićenja ST ne dovode do značajnih promena u posmatranom izvodu struje. Iz tog razloga, algoritmi često nisu u mogućnosti da detektuju blaga zasićenja, jer bi definisanje suviše niskog praga moglo dovesti do lažnog reagovanja algoritma.

## 2.5 Prozor za procenu simetrije

Polazna pretpostavka kod algoritama koji za detekciju zasićenja strujnog transformatora koriste prozor za procenu simetrije (*symmetry assessment window* - SAW) jeste da je u uslovima bez zasićenja ST moguće uočiti takav prozor podataka u kome su vrednosti strujnog signala osno simetrične. U okviru ovog prozora podataka odbirci signala iz leve i desne polovine prozora, koji su podjednako udaljeni u odnosu na sredinu prozora, imaju približno jednake vrednosti.

Ukoliko se struja kvara u prvoj aproksimaciji predstavi kao čista sinusoida, posmatrani prozor podataka ima izgled kao na Slici 2.

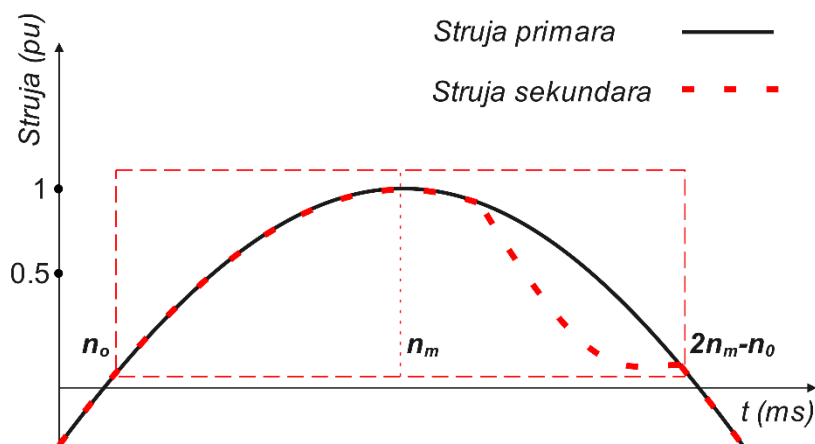


Slika 2 SAW – nezasićen strujni transformator (ilustracija preuzeta iz [33])

Usled uticaja jednosmerne komponente struje kvara, simetrija u okviru posmatranog prozora je u određenoj meri narušena i u uslovima bez zasićenja ST. S obzirom na eksponencijalnu prirodu jednosmerne komponente struje kvara, ona se nejednako odražava na levu i desnu polovinu posmatranog prozora podataka. Međutim, imajući u vidu da na posmatranom intervalu (maksimalno jedna polovina periode) jednosmerna komponenta relativno sporo opada, ovaj negativan uticaj se može zanemariti.

U slučaju zasićenja ST, odbirci signala iz leve i desne polovine posmatranog prozora podataka, koji su podjednako udaljeni u odnosi na sredinu prozora, imaju značajno različite vrednosti. Prema tome, detekcija zasićenja ST svodi se na detekciju trenutka kada je simetrija u okviru posmatranog prozora podataka narušena.

U slučaju zasićenja strujnog transformatora, posmatrani prozor podataka ima oblik kao na Slici 3:



Slika 3 SAW – zasićen strujni transformator (ilustracija preuzeta iz [33])

Primena algoritama iz ove kategorije zahteva da se najpre detektuje trenutak početka kvara, a zatim i prvi ekstremum - trenutak u kome strujni signal dostiže maksimalnu vrednost, koji se onda proglašava za trenutak koji odgovara osi simetrije posmatranog prozora.

U narednom tekstu data su dva različita algoritma za detekciju zasićenja strujnog transformatora, bazirana na principu primene prozora za procenu simetrije.

1. Korišćenje drugog izvoda struje [33]

Kod ovog pristupa, koristi se sledeća kriterijumska funkcija:

$$\delta_2[n_m + n] = \left[ \frac{d_2[n_m + n] - d_2[n_m - n]}{i_m} \right] \times 100 \quad (2.24)$$

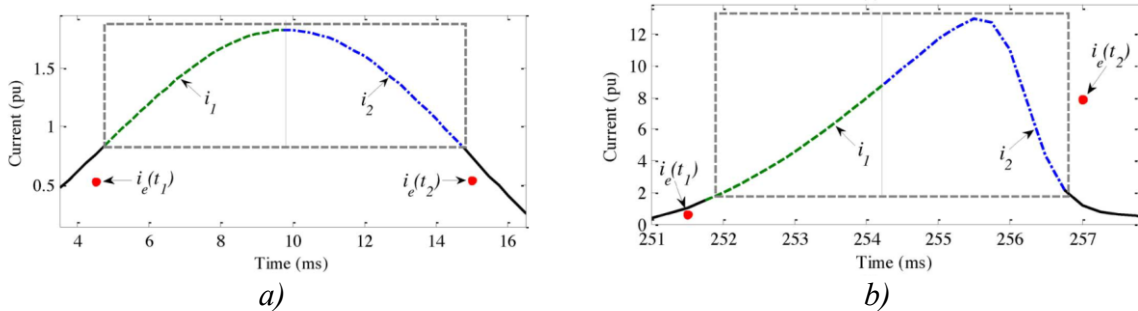
U prethodnoj relaciji sa  $d_2$  označen je drugi izvod struje sekundara ST. Oznaka  $n_m$  označava trenutak koji odgovara sredini prozora podataka, a  $i_m$  vrednost strujnog signala u trenutku  $n_m$ .

## 2. Korišćenje metode najmanjih kvadrata [34]

Kao kriterijumska funkcija, predlaže se sledeća relacija:

$$\delta_e = \left| \frac{i_e(t_1) - i_e(t_2)}{i_m} \right| \times 100 \quad (2.25)$$

U prethodnoj relaciji sa  $i_e(t_1)$  i  $i_e(t_2)$  označene su estimirane vrednosti strujnog signala u trenucima  $t_1$  i  $t_2$ . Trenuci  $t_1$  i  $t_2$  odnose se na prvi trenutak ispred, odnosno iza, posmatranog prozora podataka. Estimacija vrednosti  $i_e(t_1)$  i  $i_e(t_2)$  zahteva da se na odбирke strujnog signala u okviru posmatranog prozora podataka najpre primeni metoda najmanjih kvadrata, kojom se određuju parametri unapred usvojenog oblika strujnog signala. Ilustracija primene ovog algoritma data je na Slici 4:



Slika 4 SAW – korišćenje metode najmanjih kvadrata: a) nezasićen ST; b) zasićen ST (ilustracija preuzeta iz [34])

Metode za detekciju zasićenja strujnog transformatora zasnovane na primeni prozora za procenu simetrije mogu detektovati nastanak zasićenja strujnog transformatora, ali ne i trenutak prestanka zasićenja ST (ne pružaju informaciju o trajanju intervala zasićenja ST).

## 2.6 Primena transformacije talasićima (Wavelet Transformation)

Transformacija talasićima (Wavelet Transformation) razvijena je kao unapređenje Furijeove transformacije, u cilju prevazilaženja njenih nedostataka i ograničenja. Imajući u vidu neograničeno trajanje sinusoide, Fourijeova analiza nije pogodna za obradu nestacionarnih signala. U cilju prevazilaženja ovog nedostatka, najpre je razvijena kratkotrajna Furijeova transformacija (*Short Time Fourier Transformation*), kojom se nestacionaran signal deli na manje vremenske intervale na kojima je signal približno stacionaran. Osnovni nedostatak pomenute tehnike ogleda se u fiksnoj dužini prozora, odnosno fiksnoj dužini vremenskih segmenata na koje se signal deli.

Transformacija talasićima prevazilazi ovaj problem korišćenjem prozora promenljive dužine. Kako i sam naziv kaže, osnovna funkcija ove transformacije je talasić:

$$\psi_{a,b}(x) = \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2.26)$$

Talasić je je oscilatorna funkcija (ima srednju vrednost nula), različita od nule na konačnom intervalu (ograničenog trajanja). U prethodnoj relaciji, sa  $a$  označen je parametar dilatacije (njegovom promenom talasić se skuplja ili širi), a sa  $b$  označen je parametar translacije (njegovom promenom talasić se pomera duž vremenske ose).

Svoju praktičnu primenu, našli su pre svega diskretni talasići, koji su određeni diskretnim vrednostima parametara dilatacije  $a$  i translacije  $b$ . Najčešće se koriste stepeni broja 2:  $a = 2^j$ ,  $b = k 2^j$ .

Može se reći da je osnovna ideja kod primene diskretne transformacije talasićima da se uski talasići koriste za opisivanje brzo promenljivog dela signala, a da se razvučeni talasići koriste za opisivanje sporo promenljivog dela signala. U tom cilju uvodi se funkcija skaliranja  $\varphi(x)$ , te se signal može prikazati na sledeći način:

$$f(x) \approx \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_{j,k} \varphi_{j,k}(x) + \sum_{j=1}^J \sum_{k \in \mathbb{Z}} b_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (2.27)$$

U prethodnoj relaciji, prva suma u kojoj figurira funkcija skaliranja  $\varphi(x)$  (koja se često naziva i „talasić otac“), predstavlja osrednjenu vrednost signala, dok druga suma, u kojoj figurira talasić  $\psi(x)$  (koji se često naziva i „talasić majka“), predstavlja odstupanja od srednje vrednosti na različitim nivoima rezolucije.

Za detekciju zasićenja strujnog transformatora može se koristiti parametar  $b$  koji figurira u drugoj sumi relacije (2.27), nakon što se transformacija talasićima primeni na struju sekundara strujnog transformatora [35-37]. Naime, u trenutku nastanka/prestanka zasićenja, amplituda visokofrekventnih komponenti signala naglo raste, što izaziva naglu promenu koeficijenta  $b$  iz prethodne relacije. Ova činjenica koristi se za detekciju trenutka nastanka/prestanka zasićenja ST.

Osnovni nedostatak primene transformacije talasićima u detekciji zasićenja strujnog transformatora ogleda se u osetljivosti ove metode na prisustvo šuma u strujnom signalu.

### 3. Algoritmi za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora

Algoritmi za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora koji su publikovani u naučnoj literaturi, grubo se mogu klasifikovati na sledeći način:

- algoritmi zasnovani na korišćenju odbiraka strujnog signala iz perioda bez zasićenja,
- algoritmi zasnovani na korišćenju ekvivalentne šeme strujnog transformatora,
- algoritmi zasnovani na primeni metode najmanjih kvadrata u intervalu zasićenja strujnog transformatora,
- algoritmi zasnovani na primeni neuralnih mreža.

#### 3.1 Kompenzacija zasićenja ST korišćenjem odbiraka strujnog signala iz perioda bez zasićenja

Osnovna ideja kod algoritmi za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora koji pripadaju ovoj kategoriji, jeste da se parametri unapred usvojenog talasnog oblika struje kvara mogu estimirati korišćenjem odbiraka iz perioda bez zasićenja strujnog transformatora. Ukoliko se prepostavi da su trenuci nastanka/prestanka zasićenja poznati (mogu se odrediti nekom od metoda za detekciju intervala zasićenja ST), onda se parametri struje kvara mogu odrediti korišćenjem isključivo “zdravih” odbiraka strujnog signala, odnosno odbiraka iz intervala bez zasićenja. Za estimaciju potrebnih parametara predlaže se metoda najmanjih kvadrata [39-41], kao i metoda bazirana na malom broju odbiraka [42, 43].

##### 3.1.1 Metoda najmanjih kvadrata

Kod algoritama za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora baziranih na primeni metode najmanjih kvadrata [39-41], polazna pretpostavka jeste da se struja kvara može predstaviti kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente:

$$i(t) = A \sin(\omega t + \theta) + B e^{-t/\tau} \quad (3.1)$$

U prethodnom izrazu oznake imaju sledeće značenje:

- $A$  – amplituda prostoperiodične komponente struje kvara.
- $\theta$  – faza prostoperiodične komponente struje kvara.
- $B$  – maksimalna vrednost eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente struje kvara.
- $\tau$  – vremenska konstanta eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente struje kvara.

Ukoliko se eksponencijalno opadajuća jednosmerna komponenta predstavi Tejlrorovim redom trećeg stepena, izraz za struju kvara može se prikazati u sledećem obliku:

$$i_s(t) = A \sin \omega t \cos \theta + A \cos \omega t \sin \theta + B - BCt + 0.5Bt^2C^2 - \frac{1}{6}Bt^3C^3 \quad (3.2)$$

gde je  $C=1/\tau$ .

Postavljanjem prethodnog izraza za  $m$  uzastopnih odbiraka struje kvara, dolazi se do sledeće relacije:

$$[Z(k)] = [H(k)][X(k)] + [e(k)] \quad (3.3)$$

U prethodnom izrazu oznake imaju sledeće značenje:

- $[Z(k)]$ - vektor odbiraka strujnog signala ( $m \times 1$ )
- $[H(k)]$  - matrica koeficijenata ( $m \times 6$ ) definisanih sledećim izrazima:
  - $H(k, 1) = \sin \omega t$
  - $H(k, 2) = \cos \omega t$
  - $H(k, 3) = 1$
  - $H(k, 4) = -t$
  - $H(k, 5) = 0.5t^2$
  - $H(k, 6) = -\left(\frac{1}{6}\right)t^3$
- $[X(k)]$  - vektor nepoznatih ( $6 \times 1$ ). Nepoznate koje figuriraju u ovom vektoru date su sledećim izrazima:
  - $X_1 = \{A\} \cos \theta$
  - $X_2 = \{A\} \sin \theta$
  - $X_3 = B$
  - $X_4 = BC$
  - $X_5 = BC^2$
  - $X_6 = BC^3$

Primenom metode najmanjih kvadrata dolazi se do izraza kojim se proračunavaju elementi vektora  $[X]$ :

$$[X] = [A]^\dagger [Z] \quad (3.4)$$

Gde je  $[A]^\dagger$  pseudoinverzna matrica matrice koeficijenata  $[H]$ .

Nakon što se elementi vektora  $[X]$  odrede primenom gore opisanog postupka, nepoznati parametri strujnog signala mogu se proračunati primenom sledećih relacija:

$$A = \sqrt{X_1^2 + X_2^2} \quad (3.5)$$

$$B = X_3 \quad (3.6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X_2}{X_1} \right) \quad (3.7)$$

$$\tau = \frac{X_3}{X_4} = \frac{X_4}{X_5} = \frac{X_5}{X_6} \quad (3.8)$$

Osnovni nedostatak algoritama za kompenzacija zasićenja strujnog transformatora primenom metode najmanjih kvadrata, ogleda se u njihovoj računarskoj zahtevnosti, imajući u vidu da algoritmi zahtevaju izračunavanje pseudoinverzne matrice koeficijenata u svakom koraku odabiranja. Pored toga, ovi algoritmi zahtevaju visoku frekvenciju odbiranja s obzirom je za izračunavanje nepoznatih parametara potrebno najmanje 6 uzastopnih odbiraka strujnog signala, a da se zasićenje može javiti već posle 1/6 periode nakon trenutka nastanka kvara. S druge strane, ovakvi algoritmi ne zahtevaju poznavanje parametara strujnog transformatora što predstavlja njihovu osnovnu prednost.



### 3.1.2 Metoda bazirana na malom broju odbiraka

Metoda za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora korišćenjem malog broja odbiraka [42-43], takođe polazi od pretpostavke da se struja kvara može predstaviti kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente. Ukoliko se izraz za struju kvara dat relacijom (3.1) postavi za četiri uzastopna trenutka iz perioda bez zasićenja, dobijaju se sledeći izrazi:

$$i(n-4) = B - A \cos(\omega t + \theta - \varepsilon) \quad (3.9)$$

$$i(n-3) = B e^{-\tau} - A \cos(\omega t + \theta) \quad (3.10)$$

$$i(n-2) = B e^{-2\tau} - A \cos(\omega t + \theta + \varepsilon) \quad (3.11)$$

$$i(n-1) = B e^{-3\tau} - A \cos(\omega t + \theta + 2\varepsilon) \quad (3.12)$$

U prethodnim relacijama sa  $\varepsilon$  označen je jedan interval odabiranja, dok ostale oznake imaju isto značenje kao u relaciji (3.1).

Na osnovu izraza koji važe za tri uzastopna trenutka ( $n-4$ ,  $n-3$  i  $n-2$ ), može se izvesti sledeća relacija:

$$i(n-2) + i(n-4) = B[(1+e^{-2\tau}) - 2e^{-\tau} \cos \varepsilon] + 2i_2(n-3) \cos \varepsilon \quad (3.13)$$

Autori u [43] predlažu uvođenje sledećeg pojednostavljenja:

$$1 + e^{-2\tau} \approx 2e^{-\tau} \quad (3.14)$$

Na osnovu relacija (3.13) i (3.14) može se izvesti izraz za eksponencijalno opadajuću jednosmernu komponentu struje kvara u trenutku označenom sa ( $n-3$ ):

$$B e^{-\tau} \approx \frac{i(n-2) - 2i(n-3) \cos(\varepsilon) + i(n-4)}{2(1 - \cos(\varepsilon))} \quad (3.15)$$

Ponavljanjem istog postupka za tri uzastopna trenutka ( $n-3$ ,  $n-2$  i  $n-1$ ), dolazi se do relacije za eksponencijalno opadajuću jednosmernu komponentu struje kvara u trenutku označenom sa ( $n-2$ ):

$$B e^{-2\tau} \approx \frac{i(n-1) - 2i(n-2) \cos(\varepsilon) + i(n-3)}{2(1 - \cos(\varepsilon))} \quad (3.16)$$

Vrednosti prostoperiodične komponente struje kvara u trenutcima označenim sa ( $n-2$ ) i ( $n-3$ ), mogu se odrediti oduzimanjem eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente od originalnog signala:

$$i_p(n-2) = i(n-2) - B e^{-2\tau} = -A \cos(\omega t + \theta + \varepsilon) \quad (3.17)$$

$$i_p(n-3) = i(n-3) - B e^{-\tau} = -A \cos(\omega t + \theta) \quad (3.18)$$

Na kraju, za estimaciju amplitude prostoperiodične komponente struje kvara može se primeniti sledeći izraz:

$$A \approx \sqrt{\left(\frac{i_p(n-2) - i_p(n-3)}{2 \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}\right)^2 + \left(\frac{i_p(n-2) + i_p(n-3)}{2 \cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}\right)^2} \quad (3.19)$$

Prednost opisanog algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora u odnosu na algoritme bazirane na primeni metode najmanjih kvadrata, ogleda se u smanjenoj računarskoj zahtevnosti i smanjenim zahtevima u pogledu frekvencije odabiranja. S druge strane, pouzdanost i tačnost ovakvog algoritma značajno su niže.

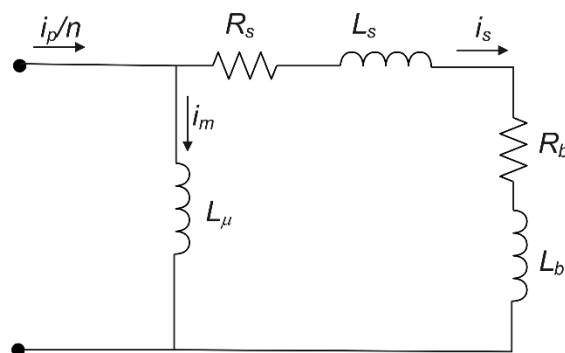
## 3.2 Kompenzacija zasićenja ST korišćenjem ekvivalentne šeme ST

Polazna pretpostavka kod algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora iz ove grupacije je da su parametri ekvivalentne šeme razmatranog strujnog transformatora poznati. Takođe, pretpostavlja se i da je kriva magnećenja razmatranog strujnog transformatora poznata.

Polazeći od navedenih pretpostavki, postupak kompenzacije zasićenja strujnog transformatora podrazumeva da se na osnovu ekvivalentne šeme strujnog transformatora odredi fluks unutar strujnog transformatora u posmatranom trenutku  $t$ . Na osnovu poznatog fluksa, dalje se korišćenjem krive magnećenja strujnog transformatora može odrediti struja magnećenja strujnog transformatora. Sabiranjem ovako proračunate struje magnećenja sa strujom sekundara strujnog transformatora dolazi se do (skalirane) struje primara.

Algoritmi iz ove grupacije koriste iste bazične relacije, dok se razlika između pojedinih algoritama ogleda u različitim pristupima proračuna inicijalnog fluksa, što će se detaljnije analizirati u narednim poglavljima.

Na slici ispod prikazana je ekvivalentna šema ST:



Slika 5 Ekvivalentna šema strujnog transformatora

Na prethodnoj slici oznake imaju sledeće značenje:

- $R_s, L_s$  – parametri (otpornost i induktivnost) sekundara strujnog transformatora,
- $R_b, L_b$  – parametri (otpornost i induktivnost) opterećenja strujnog transformatora,
- $L_\mu$  – induktivnost magnećenja strujnog transformatora,
- $i_p$  – struja primara strujnog transformatora,
- $i_m$  – struja magnećenja strujnog transformatora,
- $i_s$  – struja sekundara strujnog transformatora,
- $n$  – prenosni odnos strujnog transformatora.

Za ekvivalentnu šemu strujnog transformatora (Slika 5) može se postaviti sledeća relacija:

$$\frac{1}{n} i_p(t) = i_m(t) + i_s(t) \quad (3.20)$$

U periodu pre zasićenja strujnog transformatora, struja magnećenja je mala i praktično se može zanemariti. Međutim, prilikom nastanka zasićenja dolazi do naglog porasta struje magnećenja, usled čega dolazi do značajnog odstupanja struje sekundara strujnog transformatora u odnosu na struju primara.

Na osnovu ekvivalentne šeme strujnog transformatora može se postaviti i relacija koja važi za fluks u jezgu strujnog transformatora:

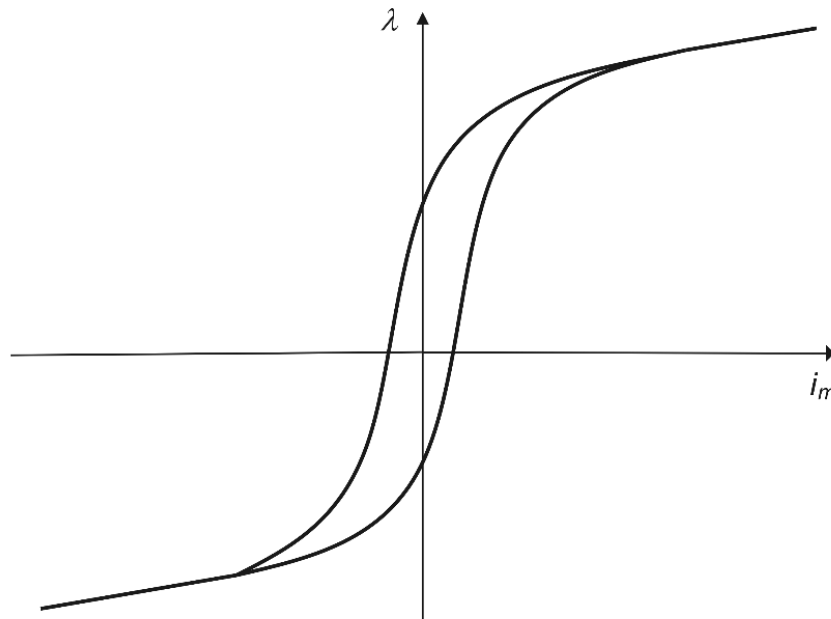
$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = (R_s + R_b)i_s(t) + (L_s + L_b) \frac{di_s(t)}{dt} \quad (3.21)$$

Potrebno je napomenuti da prethodna relacija važi kako za period bez zasićenja strujnog transformatora, tako i za period zasićenja.

Integracijom prethodnog izraza na intervalu od  $t_0$  od  $t$ , dobija se sledeća relacija:

$$\lambda(t) - \lambda(t_0) = (R_s + R_b) \int_{t_0}^t i_s(t) dt + (L_s + L_b) \{i_s(t) - i_s(t_0)\} \quad (3.22)$$

Korišćenjem prethodne relacije proračunava se fluks u posmatranom trenutku  $t$ . Dalje se primenom krive magnećenja (Slika 6) može odrediti struja magnećenja. Sabiranjem tako određene struje magnećenja sa strujom sekundara strujnog transformatora, dolazi se do (skalirane) struje primara.



Slika 6 Kriva magnećenja strujnog transformatora

Potrebno je primetiti da je u relaciji (3.22) jedina nepoznata inicijalni fluks – fluks u trenutku  $t_0$  ( $\lambda(t_0)$ ).

Razlika između pojedinih algoritama iz ove grupacije upravo se ogleda u različitim načinima estimacije inicijalnog fluksa.

### 3.2.1 Estimacija inicijalnog fluksa na osnovu perioda bez zasićenja strujnog transformatora

Algoritmi za kompenzaciju zasićenja ST prezentovani u radovima [44-47] za estimaciju inicijalnog fluksa ( $\lambda(t_0)$ ) koriste režim pre nastanka zasićenja ST. Drugim rečima, za početak integracije u relaciji (3.22) uzima se trenutak iz perioda pre zasićenja ST.

Pri tome se polazi od sledećih pretpostavki:

- U periodu pre zasićenja strujnog transformatora, fluks je prostoperiodična veličina:  

$$\lambda(t) = \lambda(t + N\Delta T) \quad (3.23)$$

- U periodu pre zasićenja strujnog transformatora, srednja vrednost fluksa posmatrano na jednoj periodu jednaka je nuli:

$$\sum_{k=1}^N \lambda(t_0 + k\Delta T) = 0 \quad (3.24)$$

Razlika između vrednosti fluksa u trenutku ( $t_0 + k\Delta T$ ) i fluksa u trenutku  $t_0$ , može se izraziti na sledeći način:

$$\tilde{\lambda}(t_0 + k\Delta T) = \lambda(t_0 + k\Delta T) - \lambda(t_0) \quad (3.25)$$

Sumiranjem prethodnog izraza na jednoj osnovnoj periodu, dobija se sledeća relacija:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N \tilde{\lambda}(t_0 + k\Delta T) &= \{\lambda(t_0 + \Delta T) - \lambda(t_0)\} + \dots + \{\lambda(t_0 + N\Delta T) - \lambda(t_0)\} \\ &= \sum_{k=1}^N \lambda(t_0 + k\Delta T) - N\lambda(t_0) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Imajući u vidu uvedenu pretpostavku da je srednja vrednost fluksa posmatrano na jednoj osnovnoj periodu jednaka nuli, dobija se sledeći izraz za estimaciju inicijalnog fluksa:

$$\lambda(t_0) = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{\lambda}(t_0 + k\Delta T) \quad (3.27)$$

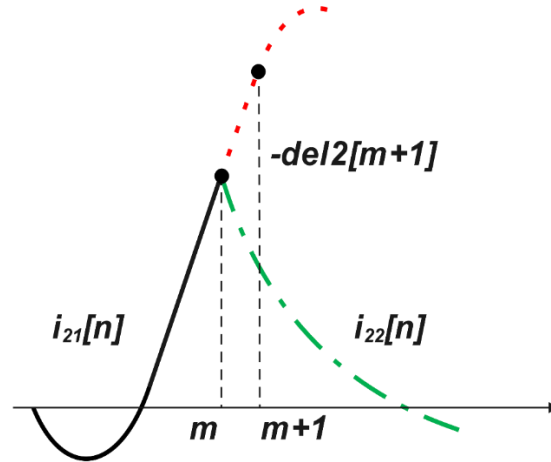
Osnovni nedostatak prethodno izloženog postupka za estimaciju inicijalnog fluksa, ogleda se u činjenici da polazna pretpostavka kojom se srednja vrednost fluksa (posmatranom na jednoj osnovnoj periodu) izjednačava sa nulom, ne važi ukoliko u strujnom transformatoru postoji zaostali (remanentni) fluks. Ukoliko remanentni fluks postoji, srednja vrednost fluksa na jednoj periodu (u periodu pre zasićenja) nije jednaka nuli, već upravo odgovara vrednosti remanentnog fluksa.

### 3.2.2 Estimacija inicijalnog fluksa u trenutku nastanka zasićenja strujnog transformatora

Kako bi se prevazišao nedostatak prethodno opisanog algoritma, koji se ogleda u zanemarivanju remanentnog fluksa u strujnom transformatoru, u algoritmima prezentovanim u [48-51], predlaže se estimacija inicijalnog fluksa u trenutku nastanka zasićenja ST. Drugim rečima, za početak integracije u relaciji (3.22) uzima se trenutak nastanka zasićenja strujnog transformatora.

Polazna ideja jeste da se najpre estimira struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja strujnog transformatora. Nakon estimacije struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja, inicijalni fluks (tj. fluks u trenutku nastanka zasićenja) moguće je jednostavno odrediti primenom krive magnećenja.

Na Slici 7, prikazana je promena struje sekundara strujnog transformatora u trenutku nastanka zasićenja:



Slika 7 Struja na sekundaru ST u trenutku nastanka zasićenja (ilustracija preuzeta iz [49])

Na prethodnoj slici sa  $i_{21}$  označena je struja sekundara ST u periodu pre nastanka zasićenja,  $i_{22}$  označava struju sekundara ST nakon nastanka zasićenja,  $m$  predstavlja trenutak nastanka zasićenja,  $m+1$  predstavlja prvi odbirak u intervalu nakon nastanka zasićenja ST.

Neka je  $del1$  funkcija definisana kao razlika dva uzastopna odbirka struje sekundara ST:

$$del1[n] = i_2[n] - i_2[n-1] \quad (3.28)$$

Dalje se može definisati funkcija  $del2$  kao razlika vrednosti funkcije  $del1$  u dva uzastopna trenutka:

$$del2[n] = del1[n] - del1[n-1] \quad (3.29)$$

Jednostavnim izvođenjem dobija se da važi:

$$\begin{aligned} del2[m+1] &= i_{22}[m+1] - 2i_{22}[m] + i_{21}[m-1] \\ &= i_{22}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \end{aligned} \quad (3.30)$$

Ako se u obzir uzme visoka frekvencija odabiranja koja se koristi kod savremenih mikroprocesorskih releja, može se usvojiti da važi:

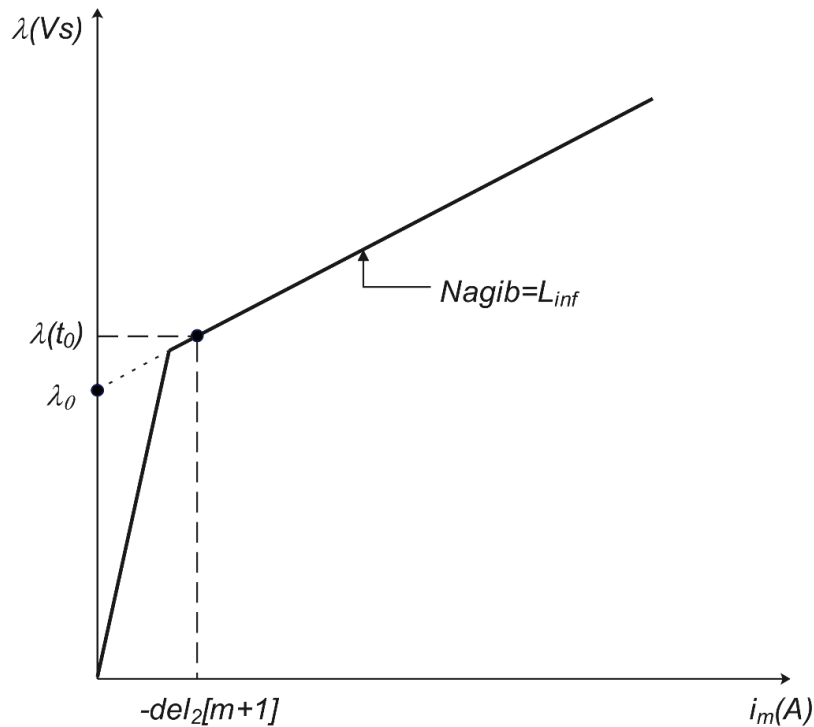
$$i_{21}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \approx 0 \quad (3.31)$$

U prethodnoj relaciji sa  $i_{21}[m+1]$  označena je vrednost struje u trenutku  $m+1$  koja se dobija ekstrapolacijom nezasićenog dela strujnog signala (Slika 7).

Na osnovu prethodnih relacija, dolazi se do zaključka da je struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja strujnog transformatora, približno jednaka negativnoj vrednosti funkcije  $del2$  u trenutku  $m+1$ :

$$i_{21}[m+1] - i_{22}[m+1] = -del2[m+1] \quad (3.32)$$

Nakon određivanja struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja, inicijalni fluks se može jednostavno odrediti primenom krive magnećenja (Slika 8).



Slika 8 Pojednostavljena kriva magnećenja ST

Osnovna prednost opisanog algoritma ogleda se u njegovoj neosetljivosti na remanentni fluks u strujnom transformatoru. Takođe, opisani algoritam omogućava relativno jednostavnu estimaciju inicijalnog fluksa i nije računarski zahtevan. S druge strane, algoritam je veoma osetljiv na nepreciznosti u pogledu estimacije trenutka nastanka zasićenja, što se nepovoljno odražava na njegovu robusnost.

U cilju poboljšanja robusnosti i preciznosti algoritma pri estimaciji inicijalnog fluksa, u okviru [48] predlaže se nešto kompleksiji postupak. Polazi se od relacije kojom se iskazuje veza između struje magnećenja i fluksa u trenutku nastanka zasićenja:

$$i_m^e(t_n) = \frac{1}{L_{inf}} (\lambda(t_n) - \lambda_0) \quad (3.33)$$

U prethodnoj relaciji, sa  $i_m^e$  označena je struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja;  $\lambda(t_n)$  označava fluks u trenutku nastanka zasićenja;  $L_{inf}$  označava nagib krive magnećenja u intervalu zasićenja;  $\lambda_0$  označava tačku u kojoj prava koja se podudara sa krivom magnećenja u intervalu zasićenja preseca ordinatu (Slika 8).

Potrebno je primetiti da u prethodnoj relaciji figurira struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja koja nije poznata veličina. Struja magnećenja u trenutku zasićenja može se odrediti kao razlika struje primara i struje sekundara strujnog transformatora. U tom cilju, predlaže se da se u intervalu bez zasićenja, najpre primeni metoda najmanjih kvadrata kojom se estimiraju parametri struje primara strujnog transformatora. Zahvaljujući tome, moguće je estimirati struju primara u trenutku nastanka zasićenja, što dalje omogućava izračunavanje struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja.

Pored toga, autori predlažu postavljanje sledeće relacije:

$$\lambda(t_{n+1}) - \lambda(t_n) = i_2(t_{n+1}) \left( \frac{R\Delta T}{2} + L_B \right) + i_2(t_n) \left( \frac{R\Delta T}{2} - L_B \right) \quad (3.34)$$

Prethodna relacija dobija se primenom trapezoidnog metoda integracije na relaciju (3.21).

Na kraju, kako bi se pouzdano i precizno estimirao inicijalni fluks, predlaže se da se relacije (3.33) i (3.34) postave za nekoliko uzastopnih odbiraka u intervalu zasićenja. Na taj način dolazi se do predefinisano sistema jednačina iz koga se može odrediti fluks u nekoliko uzastopnih trenutaka u intervalu zasićenja:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L_{inf}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{inf}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{L_{inf}} \\ \frac{-2}{R\Delta T} & \frac{2}{R\Delta T} & \dots & 0 \\ 0 & \frac{-2}{R\Delta T} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{2}{R\Delta T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |\lambda^e(t_n)| \\ |\lambda^e(t_{n+1})| \\ \vdots \\ |\lambda^e(t_{n+N_E-1})| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |i_m^e(t_n)| + \frac{\lambda_0}{L_{inf}} \\ |i_m^e(t_{n+1})| + \frac{\lambda_0}{L_{inf}} \\ \vdots \\ |i_m^e(t_{n+N_E-1})| + \frac{\lambda_0}{L_{inf}} \\ |i_2(t_n)| \left( 1 - \frac{2L_B}{R\Delta T} \right) + |i_2(t_{n+1})| \left( 1 + \frac{2L_B}{R\Delta T} \right) \\ |i_2(t_{n+1})| \left( 1 - \frac{2L_B}{R\Delta T} \right) + |i_2(t_{n+2})| \left( 1 + \frac{2L_B}{R\Delta T} \right) \\ \vdots \\ |i_2(t_{n+N_E-2})| \left( 1 - \frac{2L_B}{R\Delta T} \right) + |i_2(t_{n+N_E-1})| \left( 1 + \frac{2L_B}{R\Delta T} \right) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Predloženi postupak estimacije inicijalnog fluksa osigurava veću robusnost i preciznost, ali je računarski zahtevniji.

### 3.3 Kompenzacija zasićenja ST primenom metode najmanjih kvadrata u intervalu zasićenja

Za razliku od algoritama predstavljenih u Poglavlju 3.1, kod kojih se estimacija parametara struje kvara vrši na osnovu “zdravog” dela strujnog signala (interval bez zasićenja strujnog transformatora), kod algoritama iz ove grupacije osnovna ideja jeste da se estimacija parametara struje kvara izvrši u periodu zasićenja ST [52, 53]. Pri tome se najpre definiše analitički izraz kojim se opisuje struja sekundara strujnog transformatora u periodu zasićenja. Zahvaljujući činjenici da je struja sekundara u intervalu zasićenja merena veličina, primenom metode najmanjih kvadrata mogu se estimirati parametri tako definisanog analitičkog izraza. Imajući u vidu da je struja sekundara jednaka razlici struje primara i struje magnećenja, pomenuta estimacija parametara struje sekundara, posredno omogućuje i rekonstrukciju struje primara (odnosno kompenzacija zasićenja ST).

Struja sekundara može se definisati kao razlika struje primara i struje magnećenja strujnog transformatora:

$$i_s(t) = i_p(t) - i_m(t) \quad (3.36)$$

Ukoliko se prepostavi da se struja primara tokom kvara može predstaviti kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente, razvojem jednosmerne komponente primenom Tejlorovog reda drugog stepena dolazi se do sledećeg izraza za struju primara strujnog transformatora:

$$i_p(t) = -A \sin \theta \sin(\omega t) + A \cos \theta \cos(\omega t) + B - \tau t \quad (3.37)$$

Prethodna relacija može se predstaviti sledećim izrazom:

$$i_p(t) = a_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(\omega t) + a_3 + a_4 t \quad (3.38)$$

gde su  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  i  $a_4$  nepoznate veličine.

Zavisnost struje magnećenja i fluksa u jezgru definisana je krivom magnećenja. U [53] navodi se da se ova zavisnost analitički može izraziti na sledeći način:

$$i_m(t) = k_1 \lambda(t) + k_2 \lambda(t)^5 + k_3 \lambda(t)^{33} \quad (3.39)$$

gde su  $k_1$ ,  $k_2$  i  $k_3$  poznate veličine (specifične za svaki ST).

Na osnovu ekvivalentne šeme strujnog transformatora, fluks u jezgru može se takođe izraziti u funkciji struje sekundara:

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = R i_s(t) + L \frac{di_s(t)}{dt} \quad (3.40)$$

Integracijom prethodnog izraza na intervalu od  $t_0$  od  $t$ , dolazi se do relacije između fluksa u jezgru i struje sekundara strujnog transformatora:

$$\lambda(t) - \lambda(t_0) = R_s \int_{t_0}^t i_s(t) dt + L_s (i_s(t) - i_s(t_0)) \quad (3.41)$$

Ukoliko se prepostavi da su parametri ekvivalentne šeme strujnog transformatora poznati, može se uočiti da je inicijalni fluks (odnosno fluks u trenutku  $t_0$ ) jedina nepoznata potrebna za izračunavanje fluksa u trenutku  $t$ . Ukoliko se inicijalni fluks definiše kao nepoznata  $a_5$ , onda se zavisnost struje magnećenja i struje sekundara strujnog transformatora može izraziti na sledeći način:

$$i_m(t) = F_{im}([i_s(t_0), i_s(t_1) \cdots i_s(t)], a_5) \quad (3.42)$$



Zamenom (3.39) i (3.42) u (3.36), dolazi se do sledećeg izraza za struju sekundara:

$$i_s(t) = a_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(\omega t) + a_3 + a_4 t - F_{\text{im}}([i_s(t_0), i_s(t_1) \dots i_s(t)], a_5) \quad (3.43)$$

Postavljanjem prethodne relacije za nekoliko uzastopnih trenutaka u intervalu zasićenja dolazi se do predodređenog sistema jednačina, u kojima su nepoznate  $a_1, a_2, a_3, a_4$  i  $a_5$ . Primenom metode najmanjih kvadrata moguće je estimirati nepoznate parametre što omogućava kompenzaciju zasićenja ST.

Imajući u vidu da je reč o nelinearnom sistemu jednačina, može se zaključiti da je prikazani algoritam računarski veoma zahtevan. Pored toga, prikazani algoritam za svoj rad zahteva poznavanje parametara ekvivalentne šeme strujnog transformatora.

### 3.4 Kompenzacija zasićenja strujnog transformatora primenom neuralnih mreža

Neuralne mreže predstavljaju jedan oblik implementacije veštačke inteligencije. Njihov razvoj motivisan je idejom da se modeluje ponašanje neurona u mozgu. Osnovne osobine neuralnih mreža jesu osobina učenja, memorisanja i generalizacije na osnovu podataka kojima se obučavaju.

Svoju primenu neuralne mreže nalaze i u oblasti digitalne relejne zaštite. Takav primer je i algoritam za kompenzaciju zasićenja ST [51-58]. Osnovna ideja jeste da se kao (kompenzovana) struja primara ST upravo koristi izlaz iz neuralne mreže. Kako bi se ovo postiglo, neophodno je sprovesti adekvatno treniranje neuralne mreže. Pri tome, potrebno je razmatrati veliki broj različitih slučajeva: različite amplitude struje kvara, različiti nivo zasićenja, različite vrste opterećenja strujnog transformatora itd.

Algoritmi za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora bazirani na primeni neuralnih mreža za svoj rad zahtevaju veliki broj trening podataka, što predstavlja njihov osnovni nedostatak i u mnogome otežava praktičnu primenu ovih algoritama.

## 4. Algoritmi za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima

Najopštija podela algoritama za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima jeste podela na algoritme razvijene u fazorskom domenu i algoritme razvijene u vremenskom domenu. U okviru ovog poglavlja data je detaljnija analiza algoritama za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima.

### 4.1 Algoritmi u fazorskom domenu

#### 4.1.1 Trofazni kvarovi sa električnim lukom

Rad [3] jedna je od prvih publikacija koja obrađuje temu detekcije kvarova sa električnim lukom na nadzemnim vodovima i postavlja temelje za dalja razmatranja.

Polazna tačka kako ovog, tako i ostalih algoritama iz ove oblasti jeste model električnog luka u frekvencijskom domenu. Polazeći od pretpostavke da je napon luka pravougaona četvrtka koja je u fazi sa strujom luka, on se može predstaviti pomoću Furijeovog reda koji sadrži isključivo neparne komponente:

$$v_a(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2k-1} V_a \sin((2k-1)\omega t) \quad (4.1)$$

U prethodnoj relaciji, oznake imaju sledeće značenje:

- $v_a(t)$  – napon luka
- $V_a$  – amplituda pravougaonog signala
- $k$  – red harmonika.

Za  $k$ -ti harmonik napona luka, može se postaviti sledeća jednačina:

$$V_{ak} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2k-1} V_a \quad (4.2)$$

gde je  $V_{ak}$  amplituda  $k$ -tog harmonika.

Ukoliko se prethodna relacija postavi za više različitih harmonika, dolazi se do sledećeg matricnog izraza:

$$\mathbf{V}_a = \frac{4}{\pi} \mathbf{H} V_a + \xi \quad (4.3)$$

U prethodnoj relaciji, oznake imaju sledeće značenje:

- $\mathbf{V}_a = [V_{a1} V_{a3} V_{a5} \cdots V_{a(2k-1)}]^T$  - vektor poznatih veličina (estimacija elemenata ovog vektora biće objašnjena u nastavku)
- $\mathbf{H} = \left[1 \frac{1}{3} \frac{1}{5} \cdots \frac{1}{2k-1}\right]^T$  - vektor koeficijenata
- $\xi$  – vektor grešaka koji obuhvata netačnosti usled modelovanja električnog luka.

Primenom metode najmanjih kvadrata dolazi se do relacije koja omogućava estimaciju napona luka (odnosno amplitude pravougaone četvrtke kojom je reprezentovan luk):

$$\hat{V}_a = \frac{\pi}{4} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{V}_a = \frac{\pi}{4} \mathbf{H}^l \mathbf{V}_a \quad (4.4)$$

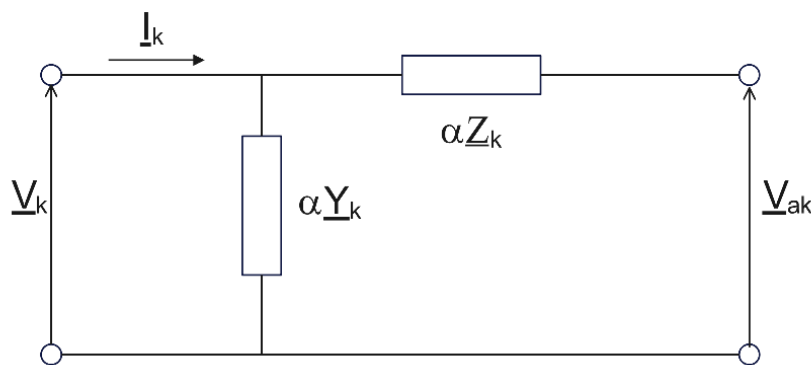
gde je  $\mathbf{H}^l$  pseudoinverzna matrica matrice  $\mathbf{H}$ .

Imajući u vidu da su vrednosti viših harmonijskih komponenti napona luka veoma male, prethodna relacija se može limitirati na harmonike do devetog reda. Na taj način dolazi se do sledećeg izraza za estimaciju napona luka:

$$\hat{V}_a = 0.6634V_{a1} + 0.2211V_{a3} + 0.1327V_{a5} + 0.0948V_{a7} + 0.0737V_{a9} \quad (4.5)$$

Kako bi se prethodna relacija mogla primeniti, potrebno je izračunati vrednosti  $V_{a1}$ ,  $V_{a3}$ ,  $V_{a5}$ ,  $V_{a7}$  i  $V_{a9}$  (harmonijske komponente napona luka).

Na Slici 9 prikazana je pojednostavljena šema voda:



Slika 9 'T' ekvivalentna šema nadzemnog voda

Oznake na slici imaju sledeće značenje:

- $Z_k = R(k\omega) + jk\omega L(k\omega)$  - impedansa voda
- $Y_k = jk\omega C(k\omega)$  - admitansa voda
- $V_k$  i  $I_k$  -  $k$ -ti harmonik napona i struje na mestu releja (levi kraj voda)
- $\alpha$  - rastojanje od početka voda do mesta kvara, izraženo u odnosu na ukupnu dužinu voda ( $\alpha = l/d$ , gde je  $l$  - rastojanje od početka voda do mesta kvara;  $d$  - ukupna dužina voda).

Polazeći od Slike 9, može se postaviti sledeća relacija:

$$V_{ak} = (1 + \alpha^2 Y_k Z_k) V_k - \alpha Z_k I_k \quad (4.6)$$

U prethodnoj relaciji,  $\alpha$  nije poznata veličina. Međutim, u [3] se usvaja pretpostavka da se informacija o lokaciji kvara može preuzeti iz distantne zaštite. Drugim rečima, algoritam ne estimira lokaciju kvara, već informaciju o lokaciji kvara preuzima iz distantne zaštite.

Jedna od osnovnih mana algoritma jeste činjenica da se može primeniti samo kod trolnih kvarova. Pored toga, činjenica da algoritam ne estimira lokaciju kvara već istu preuzima iz distantne zaštite se u značajnoj meri može odraziti na pouzdanost i preciznost algoritma za estimaciju napona luka.

### 4.1.2 Jednofazni kvarovi sa električnim lukom

Na ovom mestu prezentovan je algoritam koji omogućava da se pored napona luka izvrši i estimacija lokacije kvara (rastojanja od početka voda do mesta kvara) [4].

Polazeći od pretpostavke da se napon luka može predstaviti kao pravougaona četvrtka u fazi sa strujom luka, osnovni i treći harmonik napona luka mogu se izraziti sledećim relacijama:

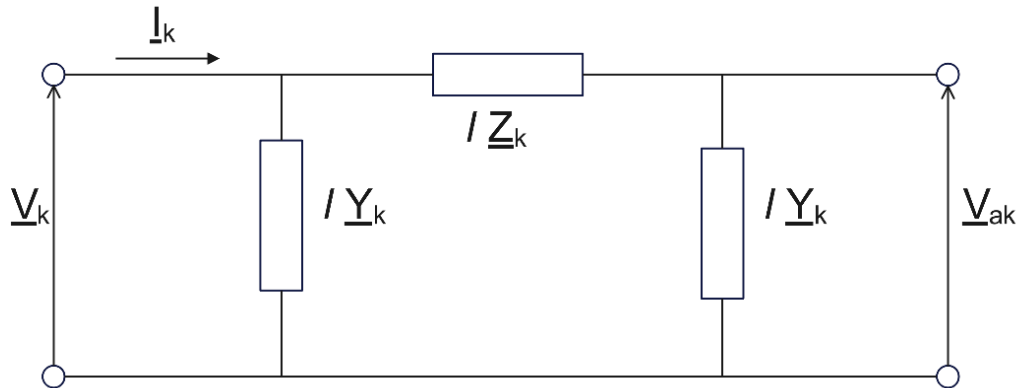
$$\underline{V}_{a1} = \underline{k}_1 V_a \quad (4.7)$$

$$\underline{V}_{a3} = \underline{k}_3 V_a \quad (4.8)$$

U prethodnim relacijama oznake imaju sledeće značenje:

- $\underline{V}_{a1}$  i  $\underline{V}_{a3}$  – fazor osnovnog i trećeg harmonika napona luka,
- $V_a$  – amplituda pravougaonog talasa napona luka,
- $\underline{k}_1 = k_1 \angle \phi = k_1 V_a \angle \phi = \frac{4}{\pi} V_a \angle \phi$ ,
- $\underline{k}_3 = k_3 \angle 3\phi = k_3 V_a \angle 3\phi = \frac{4}{3\pi} V_a \angle 3\phi$ ,
- $\phi$  – faza osnovnog harmonika struje kvara.

Na Slici 10 prikazana je ekvivalentna šema voda na kome je došlo do kvara sa električnim lukom:



Slika 10 'T' ekvivalentna šema nadzemnog voda

Na Slici 10,  $l$  je rastojanje od početka voda do mesta kvara,  $\underline{Z}_k$  i  $\underline{Y}_k$  su frekvencijski zavisne podužne impedansa i admittansa voda,  $\underline{V}_{ak}$  je fazor  $k$ -og harmonika napona luka,  $\underline{V}_k$  i  $\underline{I}_k$  su fazori  $k$ -ih harmonika napona i struje na početku voda (na mestu releja).

U slučaju trofaznog kvara, za osnovni i treći harmonik mogu se postaviti sledeće relacije:

$$\underline{k}_1 V_a = \underline{V}_1 (1 + \underline{Y}_1 \underline{Z}_1 \ell^2) - \underline{Z}_1 \ell I_1 \quad (4.9)$$

$$\underline{k}_3 V_a = \underline{V}_3 (1 + \underline{Y}_3 \underline{Z}_3 \ell^2) - \underline{Z}_3 \ell I_3 \quad (4.10)$$

Prethodne relacije formiraju sistem od dve jednačine sa dve nepoznate:  $V_a$  – napon pravougaone četvrtke i  $l$  – rastojanje od početka voda do mesta kvara.

Rešavanjem ovog sistema jednačina po nepoznatoj  $l$  (lokacija kvara) može se izvesti sledeći izraz:

$$\ell = \frac{V_1(1 + Y_1 Z_1 \ell^2) - KV_3(1 + Y_3 Z_3 \ell^2)}{Z_1 I_1 - Z_3 I_3} \quad (4.11)$$

gde je  $\underline{K} = \frac{k_1}{k_3} = \frac{k_1 \angle \phi}{k_3 \angle 3\phi} = 3\angle - 2\phi$

Kako bi se pojednostavilo rešavanje prethodnog izraza (kvadratna jednačina po nepoznatoj  $l$ ) potrebno je uočiti da važi:  $Y_1 Z_1 \ell^2 \ll 1$  i  $Y_3 Z_3 \ell^2 \ll 1$ .

U skladu sa tim, u [4] se predlaže da se u prvoj iteraciji izvrši direktni proračun  $l$  uz zanemarivanje članova jednačine uz  $l^2$ , te da se tako proračunato  $l$  ponovo uvrsti u desnu stranu jednačine, kako bi se došlo do finalne vrednosti za lokaciju kvara. Nakon određivanja lokacije kvara, napon luka se jednostavno može odrediti vraćanjem u relaciju (4.9).

U slučaju jednofaznog kvara, za osnovni i treći harmonik mogu se postaviti sledeće relacije:

$$\underline{k}_1 V_a = V_1(1 + Y_1 Z_1 \ell^2) + V_{10}(Y_{10} Z_{10} - Y_1 Z_1) \ell^2 - Z_1 \ell (I_1 + \underline{K}_1 I_{10}) \quad (4.12)$$

$$\underline{k}_3 V_a = V_3(1 + Y_3 Z_3 \ell^2) + V_{30}(Y_{30} Z_{30} - Y_3 Z_3) \ell^2 - Z_3 \ell (I_3 + \underline{K}_3 I_{30}) \quad (4.13)$$

gde je:  $\underline{K}_1 = (Z_{10} - Z_1)/Z_1$  i  $\underline{K}_3 = (Z_{30} - Z_3)/Z_3$ .

Sređivanjem prethodnih relacija, dolazi se do izraza za izračunavanje lokacije kvara:

$$\ell = \frac{V_1(1 + Y_1 Z_1 \ell^2) - KV_3(1 + Y_3 Z_3 \ell^2)}{Z_1(I_1 + \underline{K}_1 I_{10}) - Z_3(I_3 + \underline{K}_3 I_{30})} + \frac{V_{10}(Y_{10} Z_{10} - Y_1 Z_1) - KV_{30}(Y_{30} Z_{30} - Y_3 Z_3)}{Z_1(I_1 + \underline{K}_1 I_{10}) - \underline{K}_3 Z_3(I_3 + \underline{K}_3 I_{30})} \quad (4.14)$$

Uvažavajući činjenicu da su vrednosti izraza:  $Y_{10} Z_{10} - Y_1 Z_1$  i  $Y_{30} Z_{30} - Y_3 Z_3$  zanemarljive kod visokonaponskih vodova, dolazi se do pojednostavljenog izraza za izračunavanje lokacije kvara u slučaju jednofaznog kvara:

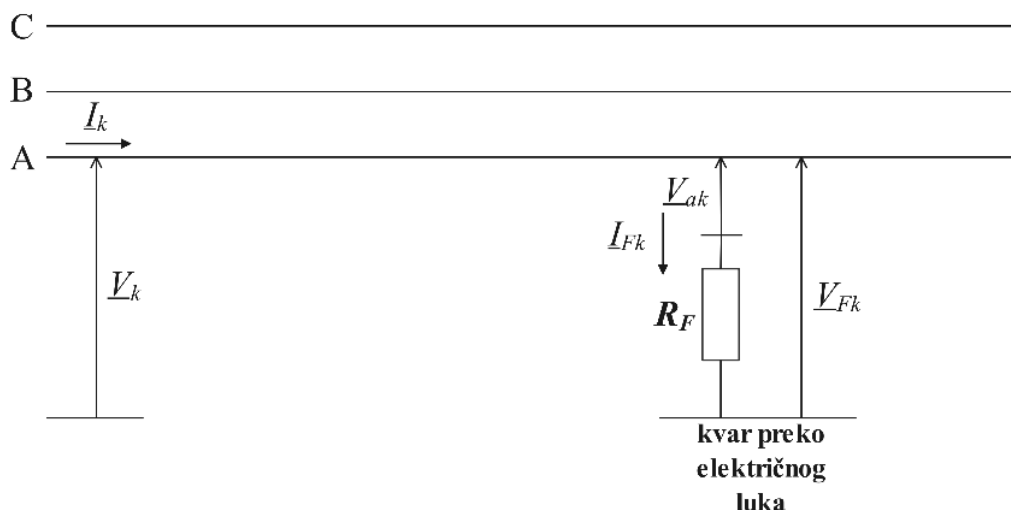
$$\ell = \frac{V_1(1 + Y_1 Z_1 \ell^2) - KV_3(1 + Y_3 Z_3 \ell^2)}{Z_1(I_1 + \underline{K}_1 I_{10}) - \underline{K}_3 Z_3(I_3 + \underline{K}_3 I_{30})} \quad (4.15)$$

Dalji postupak proračuna lokacije kvara i napona luka je isti kao i u slučaju trofaznog kvara.

### 4.1.3 Jednofazni kvarovi sa električnim lukom i velikom prelaznom otpornošću na mestu kvara

Na mestu kvara, pored električnog luka može se javiti i značajna prelazna otpornost. Vrednost ove otpornosti zavisi od uzemljenja stubova, kao i od postojanja zemljovodne užadi. Zanemarivanje ove otpornosti se nepovoljno odražava na tačnost izloženih algoritama za detekciju električnog luka [3,4]. Ovaj nedostatak otklonjen je u okviru [5].

Na Slici 11 prikazan je vod na kome je došlo do kvara sa električnim lukom i velikom prelaznom otpornošću na mestu kvara:



Slika 11 Nadzemni vod pri kvaru sa električnim lukom (fazorski prikaz napona i struja)

Na prethodnoj slici oznake imaju sledeće značenje:

- $\underline{V}_k$  i  $\underline{I}_k$  – fazori  $k$ -og harmonika napona i struje na mestu releja,
- $\underline{V}_{ak}$  – fazor  $k$ -tog harmonika napona luka,
- $\underline{V}_{fk}$  i  $\underline{I}_{fk}$  – fazori  $k$ -og harmonika napona i struje na mestu kvara,
- $R_F$  – prelazna otpornost na mestu kvara.

Na osnovu Slike 11 može se postaviti sledeća relacija:

$$\underline{V}_k = \underline{z}_k(\underline{I}_k + \underline{k}_{zk}\underline{I}_{k0})\ell + \underline{V}_{Fk} \quad (4.16)$$

gde je:  $\underline{k}_{zk} = (\underline{z}_{0k} - \underline{z}_k)/\underline{z}_k$ .

Postavljanjem prethodnog izraza za osnovni i treći harmonik, dolazi se do sledećeg sistema jednačina:

$$\underline{V}_1 = \underline{z}_1(\underline{I}_1 + \underline{k}_{z1}\underline{I}_{10})\ell + \underline{k}_1\underline{V}_a + R_F\underline{I}_{F1} \quad (4.17)$$

$$\underline{V}_3 = \underline{z}_3(\underline{I}_3 + \underline{k}_{z3}\underline{I}_{30})\ell + \underline{k}_3\underline{V}_a + R_F\underline{I}_{F3} \quad (4.18)$$

Ukoliko se pretpostavi da su mreže sa obe strane voda aktivne, onda struja kvara (odnosno osnovni  $\underline{I}_{F1}$  i treći  $\underline{I}_{F3}$  harmonici struje kvara) nije poznata. Međutim, imajući u vidu da je mreža nultog redosleda pasivna, autori uvode pretpostavku da je struja jednofaznog kvara u fazi sa nultom strujom na mestu releja, što se može izraziti sledećim relacijama:

$$\underline{I}_{F1} = 3\underline{I}_{F10} = 3c_{F1}\underline{I}_{10} \quad (4.19)$$

$$\underline{I}_{F3} = 3\underline{I}_{F30} = 3c_{F3}\underline{I}_{30} \quad (4.20)$$

$c_{F1}$  i  $c_{F3}$  su koeficijenti proporcionalnosti (realni brojevi).

Kombinovanjem prethodnih relacija, dolazi se do sledećeg sistema jednačina:

$$\underline{V}_1 = \underline{z}_1(\underline{I}_1 + \underline{k}_{z1}\underline{I}_{10})\ell + \underline{k}_1\underline{V}_a + 3R_{Fe1}\underline{I}_{10} \quad (4.21)$$

$$\underline{V}_3 = \underline{z}_3(\underline{I}_3 + \underline{k}_{z3}\underline{I}_{30})\ell + \underline{k}_3\underline{V}_a + 3R_{Fe3}\underline{I}_{30} \quad (4.22)$$

gde je:  $R_{Fe1} = c_{F1}R_F$  i  $R_{Fe3} = c_{F3}R_F$ .

U prethodnom sistemu jednačina, nepoznate su četiri veličine:  $\ell$ ,  $\underline{V}_a$ ,  $R_{Fe1}$  i  $R_{Fe3}$ .

Ukoliko se prethodni izrazi razdvoje na realnu i imaginarnu komponentu, dolazi se do sistema od četiri jednačine sa četiri nepoznate:

$$\operatorname{Re} \{z_1(L_1 + k_{z1}L_{10})\} \ell + \operatorname{Re} \{k_1\} V_a + 3\operatorname{Re} \{L_{10}\} R_{Fe1} = \operatorname{Re} \{V_1\} \quad (4.23)$$

$$\operatorname{Im} \{z_1(L_1 + k_{z1}L_{10})\} \ell + \operatorname{Im} \{k_1\} V_a + 3\operatorname{Im} \{L_{10}\} R_{Fe1} = \operatorname{Im} \{V_1\} \quad (4.24)$$

$$\operatorname{Re} \{z_3(L_3 + k_{z3}L_{30})\} \ell + \operatorname{Re} \{k_3\} V_a + 3\operatorname{Re} \{L_{30}\} R_{Fe3} = \operatorname{Re} \{V_3\} \quad (4.25)$$

$$\operatorname{Im} \{z_3(L_3 + k_{z3}L_{30})\} \ell + \operatorname{Im} \{k_3\} V_a + 3\operatorname{Im} \{L_{30}\} R_{Fe3} = \operatorname{Im} \{V_3\} \quad (4.26)$$

Rešavanje ovog sistema omogućava estimaciju lokacije kvara i napona luka.

U okviru prethodnog algoritma zanemarena je otopna kapacitivnost voda, što ograničava njegovu primenu na kraće vodove (do 100 km). Unapređenje ovog algoritma prikazano je u [6], gde je prezentovan algoritam koji se može primeniti i kod dugih vodova.

## 4.2 Algoritmi u vremenskom domenu

### 4.2.1 Algoritmi bazirani na signalima sa jednog kraja voda

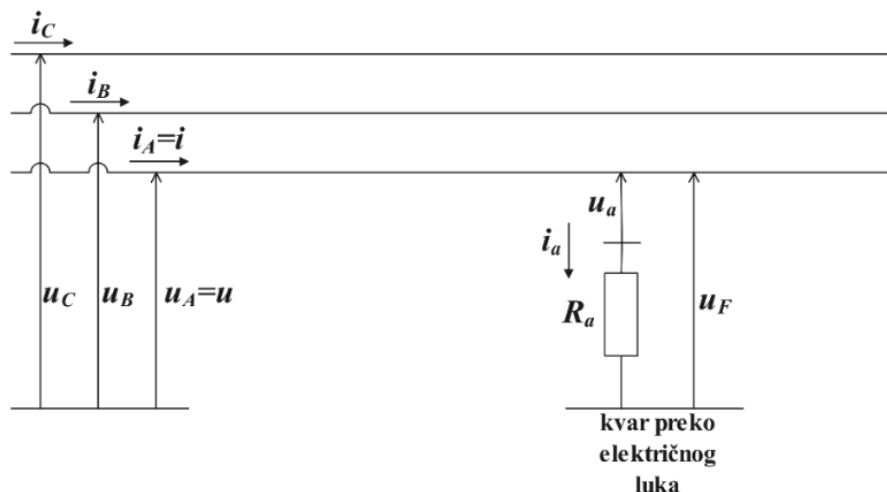
Polazna tačka gotovo svih algoritama za detekciju električnog luka u vremenskom domenu jeste da se napon električnog luka može predstaviti kao pravougaona četvrtka u fazi sa strujom luka [7-9]. Uvažavajući činjenicu da na mestu kvara, pored električnog luka, postoji i prelazna otpornost čija vrednost zavisi pre svega od uzemljenja stuba, napon na mestu kvara može se izraziti sledećom relacijom:

$$u_F = u_a + R_a i_a = V_a \operatorname{sgn}[i_a(t)] + R_a i_a + \varepsilon \quad (4.27)$$

U prethodnoj relaciji oznake imaju sledeće značenje:

- $u_F$  – napon na mestu kvara,
- $u_a$  – napon luka,
- $V_a$  – amplituda pravougaonog talasa kojim se modeluje napon električnog luka,
- $i_a$  – struja luka,
- $R_a$  – prelazna otpornost na mestu kvara,
- $\varepsilon$  – obuhvata greške merenja, modelovanja nadzemnog voda i električnog luka.

Na Slici 12 ilustrovan je dalekovod na kome je došlo do kvara sa električnim lukom:



Slika 12 Nadzemni vod pri kvaru sa električnim lukom (korišćenje signala sa jednog kraja voda)

Na prethodnoj slici oznake imaju sledeće značenje:

- $u_A, u_B, u_C$  – fazni naponi na levom kraju voda,
- $i_A, i_B, i_C$  – fazne struje na levom kraju voda,
- $u_a$  – napon luka,
- $u_F$  – napon na mestu kvara,
- $i_a$  – struja luka, odnosno struja kvara,
- $R_a$  – prelazna otpornost na mestu kvara (otpornost uzemljenja stuba).

Na osnovu prethodne slike, može se postaviti sledeća relacija:

$$u = Ri + (R_0 - R)i_0 + L \left( \frac{di}{dt} + K_L \frac{di_0}{dt} \right) + u_F = Ri + (R_0 - R)i_0 + L \left( \frac{di}{dt} + K_L \frac{di_0}{dt} \right) + u_a + R_a i_a \quad (4.28)$$

U prethodnoj relaciji,  $R$  ( $R_0$ ) predstavlja otpornost voda direktnog (nultog) redosleda od početka do mesta kvara,  $L$  je induktivnost voda direktnog redosleda od početka do mesta kvara, dok je  $K_L = (L_0 - L)/L$  koeficijent kompenzacije nultom strujom (ostale oznake odgovaraju oznakama na Slici 12).

Osnovni problem za dalju realizaciju algoritma predstavlja činjenica da struja kvara nije merljiva veličina. Naime, struja kvara se razlikuje od struje na mestu releja s obzirom na doprinos mreže sa drugog kraja voda. Međutim, imajući u vidu da je mreža nultog redosleda pasivna, može se usvojiti pretpostavka da je struja jednofaznog kvara u fazi sa nultom strujom merenom na mestu releja:

$$i_a = k_a i_0 \quad (4.29)$$

Sada se napon na mestu kvara može predstaviti sledećim izrazom:

$$u_F = V_a \operatorname{sgn}[i_0(t)] + R_a k_a i_0 + \varepsilon \quad (4.30)$$

Zamenom relacije (4.30) u (4.28), dobija se da važi:

$$u = Ri + L \left( \frac{di}{dt} + K_L \frac{di_0}{dt} \right) + V_a \operatorname{sgn}(i_0) + R_e i_0 + \varepsilon \quad (4.31)$$

gde je  $R_e = (R_0 - R + k_a R_a)$ .



Postavljanjem relacije (4.31) za  $k$ -ti odbirak, dolazi se do sledeće jednačine:

$$u_k = i_k R + \frac{1}{2T} \{i_{k+1} - i_{k-1} + K_L [i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)}]\} L + \text{sgn}(i_{0k}) V_a + i_{0k} R_e + \varepsilon_k. \quad (4.32)$$

U matricom obliku, jednačina (4.32) se može iskazati na sledeći način:

$$\mathbf{u}_k = [a_{k1} \ a_{k2} \ a_{k3} \ a_{k4}] \mathbf{x} + \varepsilon_k \quad (4.33)$$

U prethodnoj relaciji oznake imaju sledeće značenje:

- $a_{k1} = i_k$ ,
- $a_{k2} = \frac{1}{2T} \{i_{k+1} - i_{k-1} + K_L [i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)}]\}$ ,
- $a_{k3} = \text{sgn}(i_{0k})$ ,
- $a_{k4} = i_{0k}$ ,
- $\mathbf{x}^T = [R, L, V_a, R_e]$ ,

Ukoliko se relacija (4.33) postavi za  $N$  uzastopnih odbiraka, dolazi se do izraza:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \varepsilon \quad (4.34)$$

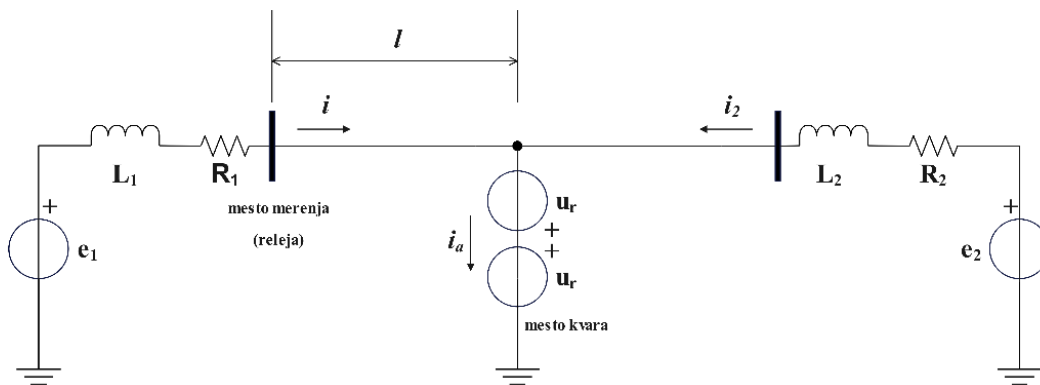
gde je  $\mathbf{A}$  je matrica koeficijenata,  $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_N]^T$  i  $\varepsilon = [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N]^T$ .

Sada se nepoznati parametri jednostavno mogu odrediti primenom metode najmanjih kvadrata:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{u} \quad (4.35)$$

Kao što je već napomenuto, prilikom izvođenja algoritma usvojena je aproksimacija da je struja kvara u fazi sa nultom strujom, što unosi određenu grešku u rad algoritma. Drugi mogući pristup jeste usvajanje pretpostavke da je je struja kvara u fazi sa razlikom fazne struje i radne struje pre kvara [10].

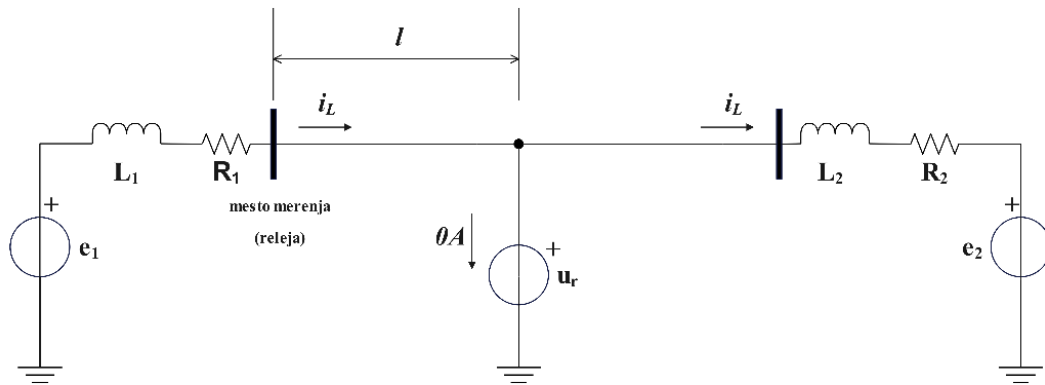
Na Slici 13 prikazana je ekvivalentna šema voda u kvaru:



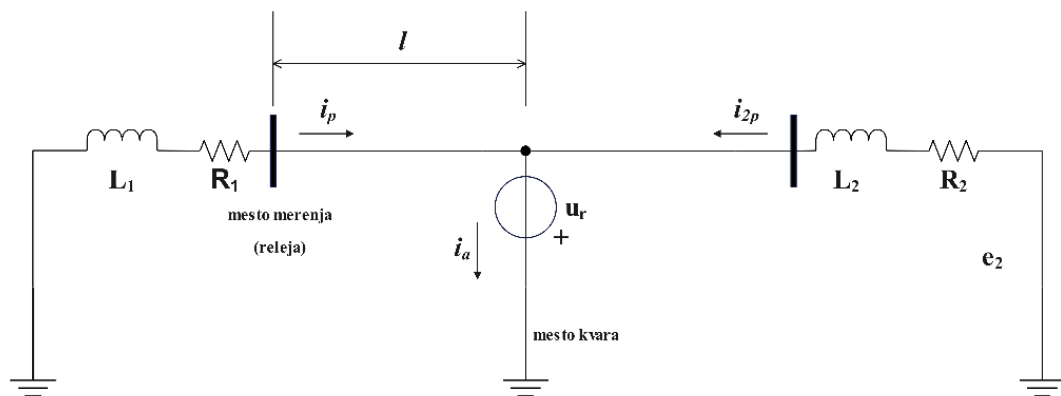
Slika 13 Ekvivalentna šema nadzemnog voda u kvaru (zanemarenje napona električnog luka)

Na prethodnoj slici za  $e_1$ ,  $R_1$  i  $L_1$  označeni su parametri Tevenenovog ekvivalenta mreže sa leve strane voda, sa  $e_2$ ,  $R_2$  i  $L_2$  označeni su parametri Tevenenovog ekvivalenta mreže sa desne strane voda,  $i$  i  $i_2$  predstavljaju struje sa početka i kraja voda,  $i_a$  je struja kvara, dok je  $u_r$  napon na mestu kvara pre kvara. Potrebno je primetiti da je u ovoj analizi zanemaren napon električnog luka, imajući u vidu da je njegova vrednost mala u odnosu na napon mreže i nema značajnijeg uticaja na fazni stav struje kvara.

Primenom principa superpozicije, prethodna šema se može razložiti na šemu sa Slike 14 (normalno stanje pre kvara) i šemu sa Slike 15 (superponirano stanje kvara).



Slika 14 Princip superpozicije – stanje pre kvara na nadzemnom vodu



Slika 15 Princip superpozicije – stanje kvara nadzemnog voda

Analizom ekvivalentne šeme sa Slike 15, može se zaključiti da približno važi:

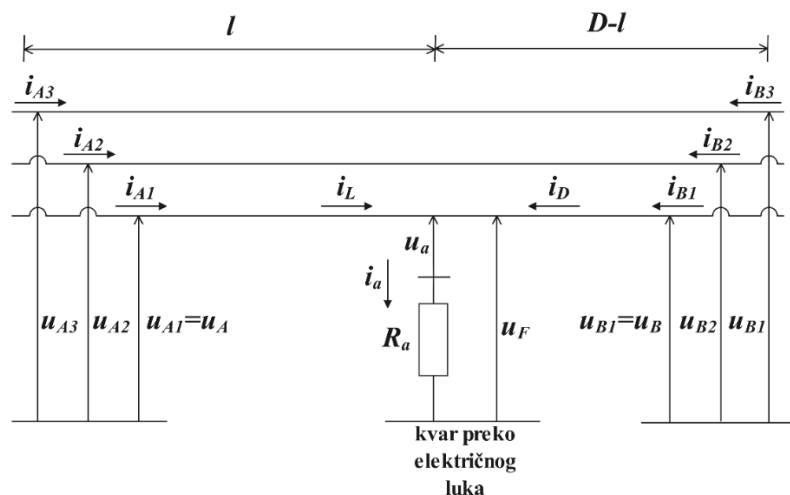
$$\text{sgn}(i_a) \approx \text{sgn}(i_p) = \text{sgn}(i - i_L) \quad (4.36)$$

Dalje je moguće primeniti već izloženi postupak za estimaciju nepoznatih veličina (u prvom redu napona luka).

#### 4.2.2 Algoritmi bazirani na signalima sa oba kraja voda

Algoritmi prikazani u prethodnom poglavlju za svoj rad koriste naponske i strujne signale sa jednog kraja voda. Za razliku od ovog pristupa, u [11] prikazan je algoritam koji za estimaciju napona luka i lokacije kvara koristi signale sa oba kraja voda.

Na Slici 16 prikazan je dalekovod na kome je došlo do kvara sa električnim lukom:



Slika 16 Nadzemni vod pri kvaru sa električnim lukom (korišćenje signala sa oba kraja voda)

Na prethodnoj slici oznake imaju sledeće značenje:

- $u_{A1}, u_{A2}, u_{A3}$  – fazni naponi na levom kraju voda,
- $i_{A1}, i_{A2}, i_{A3}$  – fazne struje na levom kraju voda,
- $u_{B1}, u_{B2}, u_{B3}$  – fazni naponi na desnom kraju voda,
- $i_{B1}, i_{B2}, i_{B3}$  – fazne struje na desnom kraju voda,
- $u_a$  – napon luka,
- $i_a$  – struja luka, odnosno struja kvara,
- $R_a$  – prelazna otpornost na mestu kvara (otpornost uzemljenja stuba),
- $i_L, i_D$  – struje koje dotiču u mesto kvara sa leve, odnosno desne strane voda,
- $l$  – rastojanje od levog kraja voda do mesta kvara,
- $D$  – ukupna dužina voda.

Pretpostavljajući da se napon luka može predstaviti kao pravougaona četvrtka u fazi sa strujom luka, kao i da se uticaj otočnih kapacitivnosti voda može zanemariti, može se postaviti sledeća relacija:

$$u_a = r^p (i_L + K_R i_L^0) l + l^p \left( \frac{di_L}{dt} + K_L \frac{di_L^0}{dt} \right) l + \text{sgn}(i_L + i_R) U_a + (i_L + i_D) R_a \quad (4.37)$$

U prethodnoj relaciji  $r^p$  i  $l^p$  su podužni parametri voda, dok su  $K_r = (R_A^0 - R_A^p) / R_A^p$  i  $K_L = (L_A^0 - L_A^p) / L_A^p$  koeficijenti kompenzacije nultom strujom.

Prethodna relacija može se postaviti u matricnom obliku na sledeći način:

$$u_A = [a_1 \ a_2 \ a_3] \cdot [l \ U_a \ R_F]^T = \mathbf{ax} \quad (4.38)$$

U izrazu (4.38) korišćene su sledeće oznake:

- $a_1 = r^p [i_L + K_R i_L^0] + l^p \left( \frac{di_L}{dt} + K_L \frac{di_L^0}{dt} \right)$
- $a_2 = \text{sgn}[i_L + i_R] = \text{sgn} \ i_a$
- $a_3 = i_L + i_R = i_a$

Postavljanjem relacije (4.38) za više uzastopnih odbiraka i primenom metode najmanjih kvadrata, dolazi se do izraza koji omogućava estimaciju nepoznatih parametara (lokacija kvara, napon luka i otpornost uzemljenja stuba):

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{u}_A \quad (4.39)$$

U prethodnom izvođenju zanemarena je otočna kapacitivnost voda. Iz tog razloga, ovaj algoritam je moguće primeniti na kraćim vodovima (do 100 km). Unapređenje algoritma prikazano je u radu [12], gde su uvažene otočne kapacitivnosti voda što omogućava primenu i kod dugih vodova.

Može se konstatovati da algoritmi koji koriste signale sa oba kraja voda omogućavaju prevazilaženje problema izazvanog činjenicom da struja kvara (struja luka) nije merljiva veličina na mestu releja (njen fazni stav nije poznat). S druge strane, realizacija ovih algoritama zahteva postojanje komunikacije između releja sa suprotnih krajeva voda.

## 5. Predloženi algoritam za detekciju i kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora

### 5.1 Izvođenje algoritma

Kompenzacija zasićenja strujnog transformatora primenom predloženog algoritma podrazumeva sledeće korake [13]:

- Eliminacija jednosmerne komponente struje kvara. Za potrebe eliminacije jednosmerne komponente struje kvara korišćen je algoritam prikazan u [59].
- Detekcija trenutka nastanka zasićenja strujnog transformatora. Detekcija zasićenja vrši se primenom nove kriterijumske funkcije.
- Kompenzacija zasićenja strujnog transformatora. Za potrebe kompenzacije zasićenja predložen je novi algoritam baziran na primeni ekvivalentne šeme i krive magnećenja strujnog transformatora.
- Detekcija prestanka zasićenja strujnog transformatora. Detekcija prestanka zasićenja vrši se primenom nove kriterijumske funkcije.

Ovi koraci opisani su u narednim poglavljima.

#### 5.1.1 Eliminacija jednosmerne komponente struje kvara

Najveći broj algoritama implementiranih u uređajima relejne zaštite razvijen je u fazorskom domenu, pri čemu se za potrebe estimacije fazorskih veličina obično primenjuje diskretna Furijeova transformacija. Eksponencijalno opadajuća jednosmerna komponenta struje kvara unosi određenu grešku pri estimaciji fazora struje kvara. Ovaj problem se može prevazići eliminacijom (filtriranjem) jednosmerne komponente struje kvara.

Algoritam za eliminaciju jednosmerne komponente struje kvara predstavljen u [59] polazi od pretpostavke da se efektivna vrednost (kao i fazni stav) struje kvara mogu estimirati na osnovu pomoćnog (tzv. karakterističnog) signala. Ovaj karakteristični signal ne sadrži eksponencijalno opadajuću jednosmernu komponentu struje kvara, ali sadrži informaciju o naizmeničnoj komponenti struje kvara (naizmenična komponenta struje kvara je u direktnoj korelaciji sa naizmeničnom komponentom karakterističnog signala).

Struja kvara može se predstaviti kao zbir eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente i naizmeničnih komponenti (osnovnog i viših harmonika):

$$i(t) = Ce^{-\frac{t}{\tau}} + \sum_{j=1}^n i_j(t) = Ce^{-t/\tau} + \sum_{j=1}^n I_j \cos(w_j t + \alpha_j) \quad (5.1)$$

Osnovna ideja jeste da se eksponencijalno opadajuća jednosmerna komponenta može predstaviti Maklorenovim polinomom prvog reda:

$$i(t) = C \left(1 - \frac{1}{\tau} t\right) + \sum_{j=1}^n i_j(t) \quad (5.2)$$

Prethodna relacija se može postaviti i za trenutak  $t_k + \Delta t$ :

$$i(t_k + \Delta t) = C \left(1 - \frac{1}{\tau} (t_k + \Delta t)\right) + \sum_{j=1}^n i_j(t_k + \Delta t) \quad (5.3)$$

Oduzimanjem (5.2) od (5.3), dobija se sledeći izraz:

$$i_{CH}(t_k + \Delta t) = -\frac{C\Delta t}{\tau} + \sum_{j=1}^n i_j(t_k + \Delta t) - \sum_{j=1}^n i_j(t_k) \quad (5.4)$$

Prethodna relacija predstavlja karakterističan signal originalnog strujnog signala. Prisustvo konstantne vrednosti u karakterističnom signalu ne unosi grešku pri estimaciji fazorskih veličina primenom diskretne Furijeove transformacije. S druge strane, moguće je uspostaviti direktnu korelaciju između fazora struje kvara i fazora karakterističnog signala:

$$I_r \angle \alpha_r = K_r \angle -\theta_r I_{CH\_r} \angle -\beta_r \quad (5.5)$$

U prethodnoj relaciji oznake imaju sledeće značenje:

- $I_r$  – efektivna vrednost  $r$ -tog harmonika struje kvara,
- $\alpha_r$  – fazni stav  $r$ -tog harmonika struje kvara,
- $I_{CH\_r}$  – efektivna vrednost  $r$ -tog harmonika karakterističnog signala,
- $\beta_r$  – fazni stav  $r$ -tog harmonika karakterističnog signala,
- $K_r$  – koeficijent definisan relacijom:

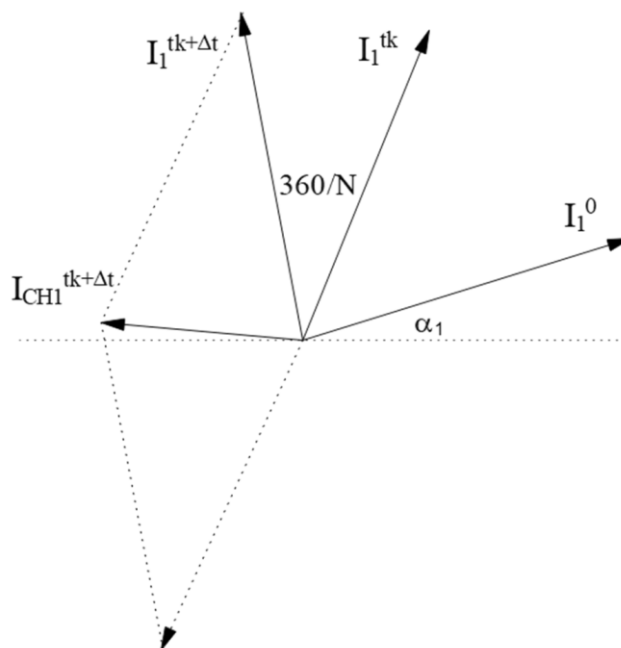
$$K_r = \frac{1}{2\sin(180r/N)} \quad (5.6)$$

- $\theta_r$  – fazni pomeraj definisan relacijom:

$$\theta_r = \frac{180 - 360r/N}{2} = 90 - \frac{180r}{N} \quad (5.7)$$

Korelacija između fazora osnovnog harmonika struje kvara, i fazora osnovnog harmonika karakterističnog signala ilustrovana je na Slici 17.

Dakle, primenom diskretne Furijeove transformacije na karakterističan signal  $i_{CH}$  (5.4), mogu se estimirati efektivna vrednost i fazni stav  $r$ -tog harmonika karakterističnog signala ( $I_{CH\_r}$  i  $\beta_r$ ). Dalje se primenom relacija (5.5), (5.6) i (5.7) dolazi do efektivne vrednosti i faznog stava  $r$ -tog harmonika struje kvara.



Slika 17 Korelacija između fazora originalnog signala i fazora karakterističnog signala

### 5.1.2 Algoritam za detekciju trenutka nastanka zasićenja

Kao što je već prikazano u Poglavlju 2, na temu detekcije zasićenja strujnog transformatora publikovan je značajan broj naučnih radova koji se grubo mogu podeliti na sledeće kategorije:

- detekcija zasićenja ST na osnovu razlike estimirane vrednosti i stvarne vrednosti strujnog signala,
- detekcija zasićenja ST primenom filtra (*smoothing* filtri),
- detekcija zasićenja ST primenom izvoda struje,
- detekcija zasićenja ST primenom prozora za procenu simetrije,
- detekcija zasićenja ST primenom transformacije talasićima (Wavelet Transformation).

Može se zaključiti da se primenjene metode razlikuju u njihovoj kompleksnosti (računarskoj zahtevnosti) i pouzdanosti: jednostavnije metode su računarski manje zahtevne, ali ih sa druge strane obično karakteriše niža pouzdanost (mogu dovesti do lažne detekcije zasićenja).

Osnovna prednost algoritama koji za detekciju zasićenja strujnog transformatora koriste određenu kriterijumsku funkciju (primena izvoda ili filtra) jeste njihova jednostavnost. S druge strane, ove metode u pojedinim slučajevima mogu dovesti do lažnog reagovanja (lažne detekcije zasićenja strujnog transformatora).

Iz gore navedenih razloga, za detekciju trenutka nastanka zasićenja strujnog transformatora predložena je nova kriterijumska funkcija. Ova kriterijumska funkcija koristi se isključivo za detekciju trenutka nastanka zasićenja, a ne i za detekciju trenutka prestanka

zasićenja (u tu svrhu biće predložena zasebna kriterijumska funkcija). Na ovaj način dobijeno je na pouzdanosti detekcije trenutka nastanka zasićenja. Naime, u trenutku nastanka zasićenja nastaje “oštrija” promena signala u odnosu na trenutak prestanka zasićenja. Iz tog razloga, ukoliko se koristi jedinstvena funkcija za detekciju trenutka nastanka i trenutka prestanka zasićenja potrebno je koristiti relativno nisku vrednost praga reagovanja kako bi se uspešno detektovao trenutak prestanka zasićenja. Usled toga može doći do lažne detekcije trenutka nastanka zasićenja, naročito u uslovima kada signal pored osnovnog signala sadrži značajan udeo šuma.

Kriterijumska funkcija za detekciju trenutka nastanka zasićenja definisana je imajući u vidu činjenicu da je karakteristični signal  $i_{CH}(t)$  (definisan relacijom (5.4)) u periodu bez zasićenja prostoperiodičan. Posledično, efektivna vrednost ovog signala u periodu bez zasićenja je konstantna vrednost. Zahvaljujući tome, zasićenje strujnog transformatora moguće je detektovati kao odstupanje karakterističnog signala od prostoperiodičnog oblika, odnosno kao trenutak u kome dolazi do skokovite promene amplitude karakterističnog signala. Kriterijumska funkcija definisana je sledećim izrazom:

$$SAT(t) = i_{CH}(t)^2 + \left( \frac{i_{CH}(t)'}{\omega} \right)^2 \quad (5.8)$$

Vrednost funkcije  $SAT(t)$  u uslovima bez zasićenja približno odgovara kvadratu amplitude karakterističnog signala  $i_{CH}(t)$ , dok u trenutku nastanka zasićenja dolazi do njene skokovite promene. Prema tome, ukoliko vrednost funkcije  $SAT(t)$  prevaziđe određenu unapred definisanu vrednost, taj trenutak odgovara trenutku nastanka zasićenja strujnog transformatora.

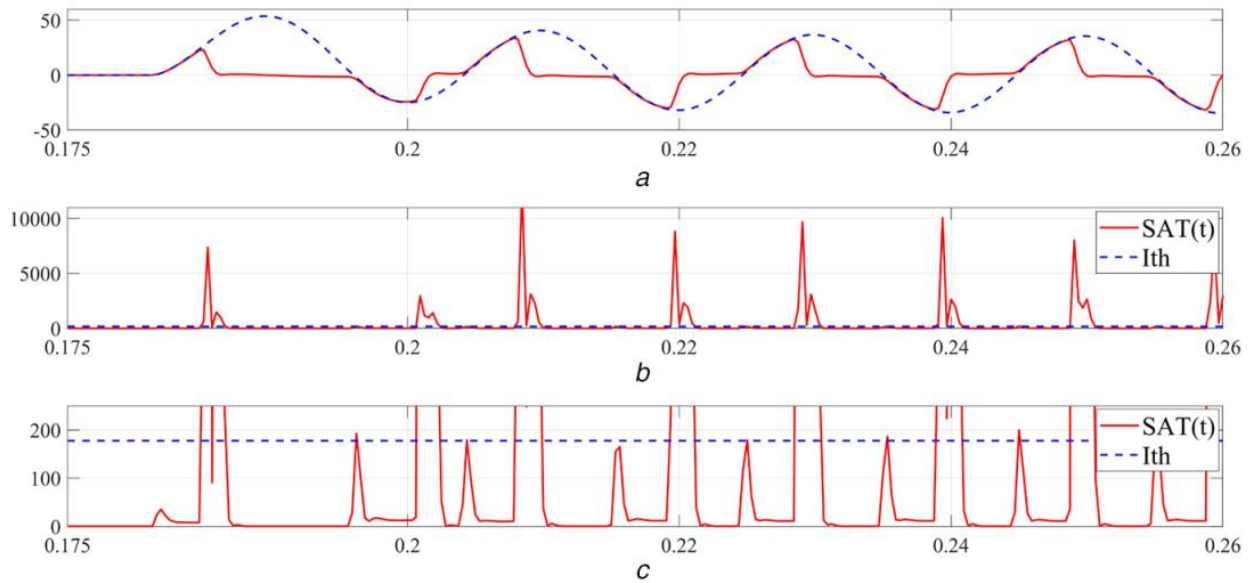
Prag reagovanja, odnosno vrednost u odnosu na koju se funkcija SAT poredi u cilju detekcije trenutka nastanka zasićenja, potrebno je definisati prema najkritičnijem slučaju – trofazni sabirnički kratak spoj. Naime, vrednost praga reagovanja treba da bude veća od kvadrata amplitude karakterističnog signala  $i_{CH}(t)$  u uslovima trofaznog sabirničkog kratkog spoja, kako bi se izbeglo lažno detektovanje zasićenja. Prag reagovanja definisan je sledećim izrazom:

$$I_{TH} = \left( k \frac{1}{K_r} I_{max} \right)^2 \quad (5.9)$$

U prethodnoj relaciji,  $I_{max}$  je struja trofaznog sabirničkog kvara, koeficijent  $K_r$  definisan je relacijom (5.6), dok je  $k$  koeficijent sigurnosti (može se uzeti vrednost od 1.5).

Ilustracija promene funkcije  $SAT(t)$  prilikom zasićenja strujnog transformatora, data je na Slici 18:





Slika 18 Promena funkcije SAT prilikom nastanka zasićenja ST

### 5.1.3 Algoritam za kompenzaciju zasićenja

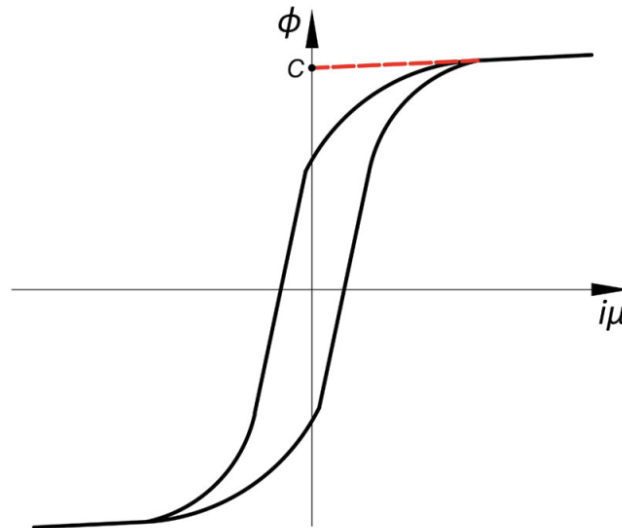
Algoritam za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora prikazan na ovom mestu omogućava da se bez obzira na zasićenje strujnog transformatora proračuna karakterističan (pomoćni) signal  $i_{CH}$  originalnog strujnog signala. Karakterističan signal definisan je relacijom (5.4), a korelacija između fazora karakterističnog signala i fazora originalnog strujnog signala definisana je relacijama (5.5) i (5.6). Zahvaljujući tome moguće je estimirati fazore originalnog strujnog signala u uslovima zasićenja strujnog transformatora. S druge strane, algoritam ne omogućava rekonstrukciju originalnog strujnog signala u vremenskom domenu. Algoritam za svoj rad zahteva poznavanje parametara ekvivalentne šeme i krive magnećenja strujnog transformatora.

Tokom perioda bez zasićenja strujnog transformatora može se usvojiti da važi sledeća relacija:

$$i_{CH}(t_k) = i_2(t_k) - i_2(t_{k-1}) + i_\mu(t_k) - i_\mu(t_{k-1}) \approx i_2(t_k) - i_2(t_{k-1}) \quad (5.10)$$

Dakle, može se usvojiti da struja magnećenja ima zanemarivu vrednost, odnosno da se vrednost karakterističnog signala može odrediti kao razlika dva susedna odbirka struje na sekundaru strujnog transformatora.

Međutim, u periodu zasićenja dolazi do naglog porasta struje magnećenja i njena vrednost se ne može zanemariti. Struja magnećenja može se odrediti na osnovu krive magnećenja strujnog transformatora (Slika 19).



Slika 19 Karakteristika magnećenja strujnog transformatora

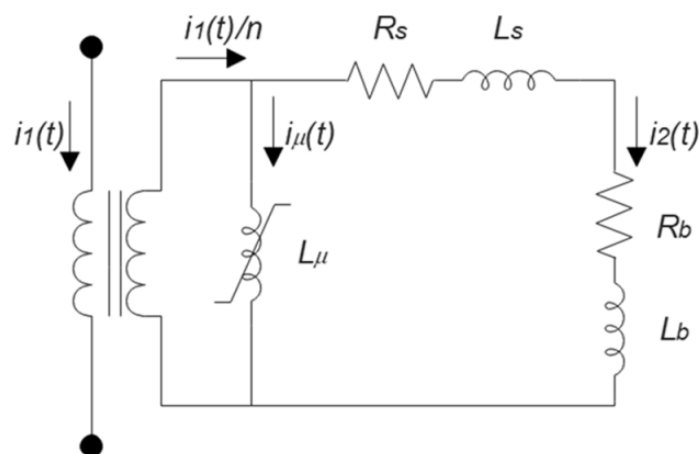
Na osnovu Slike 19, može se postaviti izraz za struju magnećenja u dva susedna trenutka  $t_k$  i  $t_{k-1}$ :

$$i_\mu(t_k) = \frac{1}{L_\mu} (\phi(t_k) - C) \quad (5.11)$$

$$i_\mu(t_{k-1}) = \frac{1}{L_\mu} (\phi(t_{k-1}) - C) \quad (5.12)$$

U prethodnoj relaciji,  $C$  označava presek y-ose (koja prikazuje vrednost fluksa) i prave koja se poklapa sa karakteristikom magnećenja u intervalu zasićenja (Slika 19).

Može se zaključiti da je za proračun struje magnećenja potrebno poznavati fluks u jezgru strujnog transformatora u proizvoljnom trenutku  $t_k$  (odnosno  $t_{k-1}$ ). Ovaj fluks može se odrediti primenom ekvivalentne šeme strujnog transformatora (Slika 20):



Slika 20 Ekvivalentna šema strujnog transformatora

Na prethodnoj slici oznake imaju sledeće značenje:

- $i_1(t)$  - struja na primaru strujnog transformatora,
- $i_1(t)/n$  - struja na sekundaru idealnog strujnog transformatora,
- $i_\mu(t)$  - struja magnećenja strujnog transformatora,
- $i_2(t)$  - struja na sekundaru realnog strujnog transformatora,
- $L_\mu$  - iduktivnost magnećenja strujnog transformatora,
- $R_s$  i  $L_s$  - parametri (otpornost i induktivnost) strujnog transformatora,
- $R_b$  i  $L_b$  - parametri (otpornost i induktivnost) opterećenja strujnog transformatora (releja).

Na osnovu ekvivalentne šeme prikazane na Slici 20, može se postaviti sledeća diferencijalna jednačina:

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = (R_s + R_b)i_2(t) + (L_s + L_b)\frac{di_2(t)}{dt} \quad (5.13)$$

Integracijom prethodne relacije dolazi se do sledećih izraza:

$$\phi(t_k) - \phi(t_0) = (R_s + R_b) \int_{t_0}^{t_k} i_2(t)dt + (L_s + L_b)(i_2(t_k) - i_2(t_0)) \quad (5.14)$$

$$\phi(t_{k-1}) - \phi(t_0) = (R_s + R_b) \int_{t_0}^{t_{k-1}} i_2(t)dt + (L_s + L_b)(i_2(t_{k-1}) - i_2(t_0)) \quad (5.15)$$

Za trenutak  $t_0$  (početak intervala integracije) obično se usvaja trenutak nastanka zasićenja strujnog transformatora. Fluks u trenutku nastanka zasićenja  $\phi(t_0)$  nije poznata veličina (usvajanje pretpostavke da ovaj fluks odgovara fluksu u kolenu krive magnećenja ne daje zadovoljavajuće rezultate). Iz tog razloga, u literaturi je posvećena posebna pažnja upravo estimaciji vrednosti fluksa u trenutku nastanka zasićenja  $\phi(t_0)$  [48-51]. Međutim, ovakav pristup se nepovoljno odražava na robusnost algoritama, imajući u vidu da se mala greška u estimaciji fluksa  $\phi(t_0)$  značajno odražava na tačnost algoritma zahvaljujući veoma malom nagibu krive magnećenja u periodu zasićenja (mala greška u pogledu estimacije fluksa, dovodi do značajne greške pri estimaciji struje magnećenja). Pored toga, greška načinjena u estimaciji fluksa  $\phi(t_0)$  ima kumulativan efekat, odnosno odražava se na estimaciju struje magnećenja tokom čitavog intervala zasićenja [59].

Za rekonstrukciju karakterističnog signala  $i_{CH}$  nije neophodno poznavati odbirke struje magnećenja u dva susedna trenutka, već je potrebno poznavati njihovu razliku. Posledično, dovoljno je poznavati razliku fluksa u dva susedna trenutka  $t_k$  i  $t_{k-1}$ , dok poznavanje pojedinačnih vrednosti fluksa u dva susedna trenutka nije neophodno. Zahvaljujući tome, može se izbeći estimacija fluksa u trenutku nastanka zasićenja  $\phi(t_0)$ .

Oduzimanjem relacije (5.12) od relacije (5.11), dolazi se do izraza za razliku struje magnećenja u dva susedna trenutka ( $t_k$  i  $t_{k-1}$ ):

$$i_\mu(t_k) - i_\mu(t_{k-1}) = \frac{1}{L_\mu}(\phi(t_k) - \phi(t_{k-1})) \quad (5.16)$$

Oduzimanjem relacije (5.15) od relacije (5.14), dolazi se do izraza za razliku fluksa u dva susedna trenutka ( $t_k$  i  $t_{k-1}$ ):

$$\phi(t_k) - \phi(t_{k-1}) = (R_s + R_b) \int_{t_{k-1}}^{t_k} i_2(t)dt + (L_s + L_b)(i_2(t_k) - i_2(t_{k-1})) \quad (5.17)$$

Implementacijom relacija (5.16) i (5.17), u relaciju (5.10), dolazi se do izraza za karakterističan signal  $i_{CH}$  u intervalu zasićenja:

$$i_{CH\_REK}(t_k) = i_2(t_k) - i_2(t_{k-1}) + \frac{1}{L_\mu} \left( (R_s + R_b) \int_{t_{k-1}}^{t_k} i_2(t) dt + (L_s + L_b)(i_2(t_k) - i_2(t_{k-1})) \right) \quad (5.18)$$

Karakteristični signal  $i_{CH}$  u intervalu bez zasićenja određuje se primenom relacije (5.10) dok se u intervalu zasićenja određuje primenom relacije (5.18).

Važno je primetiti da se relacija (5.10) može primeniti ukoliko oba strujna odbirka koja u njoj figuriraju pripadaju intervalu bez zasićenja. Slično tome, relacije (5.18) može se primeniti ukoliko posmatrani odbirci  $t_k$  i  $t_{k-1}$  pripadaju intervalu zasićenja. Prema tome, ove relacije se ne mogu primeniti za trenutak nastanka zasićenja i trenutak prestanka zasićenja. Iz tog razloga, za ova dva trenutka definisane su sledeće relacije za određivanje karakterističnog signala:

- Trenutak nastanka zasićenja:

$$i_{CH\_REK}(t_k) = 2i_{CH}(t_{k-1}) - i_{CH}(t_{k-2}) \quad (5.19)$$

- Trenutak prestanka zasićenja:

$$i_{CH}(t_k) = 2i_{CH\_REK}(t_{k-1}) - i_{CH\_REK}(t_{k-2}) \quad (5.20)$$

Prethodne relacije baziraju se na pretpostavci da je vrednost izvoda karakterističnog signala u intervalu između odbiraka  $n-2$  i  $n-1$  približno jednaka vrednosti izvoda karakterističnog signala u intervalu između odbiraka  $n-1$  i  $n$  (ovaj pristup detaljnije je objašnjen u Poglavlju 2, i baziran je na algoritmu izloženom u radu [18]).

Može se konstatovati da greška koja se unosi ovim relacijama nema značajnije implikacije na tačnost algoritma, s obzirom da se primenjuje u samo dva odbirka na nivou jedne osnovne periode. Takođe, ova greška nema kumulativan efekat, odnosno ne odražava se na tačnost algoritma tokom čitavog intervala zasićenja strujnog transformatora.

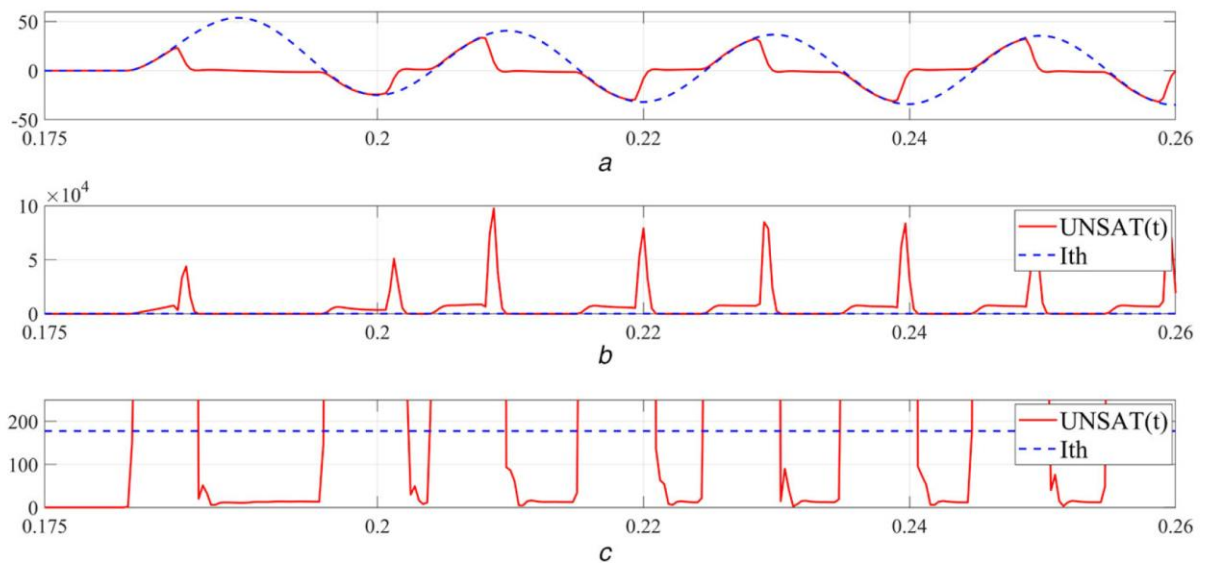
#### 5.1.4 Algoritam za detekciju prestanka zasićenja

Za detekciju trenutka prestanka zasićenja strujnog transformatora može se primeniti isti princip kao kod detekcije trenutka nastanka zasićenja, s tim da je za detekciju trenutka prestanka zasićenja potrebno posmatrati talasni oblik signala  $i_{CH\_REK}$ , tj. njegovo odstupanje od prostoperiodičnog oblika. Naime, signal  $i_{CH\_REK}$  praktično predstavlja kontinualni nastavak signala  $i_{CH}$ . U trenutku prestanka zasićenja dolazi do skokovite promene signala  $i_{CH\_REK}$ , odnosno do njegovog odstupanja od prostoperiodičnog oblika. Prema tome, za detekciju trenutka prestanka zasićenja može se koristiti sledeća funkcija:

$$UNSAT(t) = i_{CH\_REK}(t)^2 + \left( \frac{i_{CH\_REK}(t)'}{\omega} \right)^2 \quad (5.21)$$

Imajući u vidu da signal  $i_{CH\_REK}$  predstavlja kontinualni nastavak signala  $i_{CH}$ , za potrebe detekcije trenutka prestanka zasićenja nije potrebno definisati zaseban prag reagovanja, odnosno može se koristiti ista vrednost kao kod detekcije trenutka nastanka zasićenja.

Ilustracija promene funkcije  $UNSAT(t)$  prilikom prestanka zasićenja strujnog transformatora, data je na Slici 21.



Slika 21 Promena funkcije UNSAT prilikom prestanka zasićenja ST

## 5.2 Modelovanje sistema potrebnog za simulaciju pomoću programskog paketa – MATLAB/Simulink

### 5.2.1 Modelovanje strujnog transformatora

Programski paket MATLAB/Simulink omogućava verno modelovanje strujnih transformatora korišćenjem elementa *Saturable Transformer*. Najbitniji parametri koje je potrebno definisati u okviru ovog bloka kojim se predstavlja strujni transformator, jesu karakteristika magnećenja i prenosni odnos strujnog transformatora. Induktivnosti rasipanja primara i sekundara, kao i sve otpornosti u zamenskoj šemi, mogu se zanemariti.

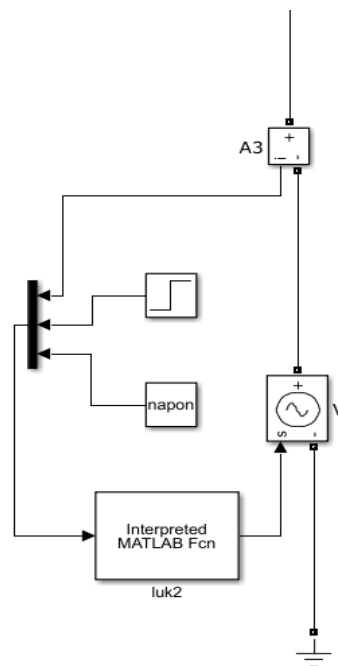
Radi jednostavnosti, implementirana je linearna karakteristika magnećenja, odnosno karakteristika magnetskog jezgra strujnog transformatora predstavljena je preko dva linearna dela. Korišćeni su parametri strujnog transformatora sledećih karakteristika: prenosni odnos 100/1 A/A, snaga 10 VA, faktor tačnosti 10 i klasa tačnosti 10 (10P10).

## 5.2.2 Modelovanje električnog luka

Električni luk koji se javlja kod nadzemnih vodova gori između rogova ili reketa izolatorskog lanca ili između faznih provodnika i zemlje. Električno polje unutra dugačkog električnog luka je skoro konstantno i iznosi (1400 do 1500) V/m. [2]

Zahvaljujući tome, električni luk se za potrebe analiza u oblasti relejne zaštite najčešće predstavlja kao pravougaona četvrtka u fazi sa strujom luka. U okviru simulacija prikazanih u narednim poglavljima korišćen je upravo ovaj model električnog luka.

Model električnog luka u programskom paketu MATLAB/Simulink prikazan je na slici ispod:



Slika 22 Model električnog luka formiran u MATLAB/Simulink programskom paketu

Električni luk je modelovan kao idealan naponski izvor koji generiše pozitivan napon (čija je vrednost definisana konstantom označenom sa *napon*), onda kada je vrednost struje kvara pozitivna, odnosno negativnu vrednost napona onda kada je struja kvara negativna. Realizacija modela električnog luka izvršena je korišćenjem posebnog bloka, tzv. MATLAB funkcije (*MATLAB function*).

U narednim simulacijama, za napon luka izabrana je vrednost od 1500 V, imajući u vidu da je algoritam testiran na primeru 110 kV nadzemnog voda.

### 5.2.3 Modelovanje nadzemnog voda i mreže

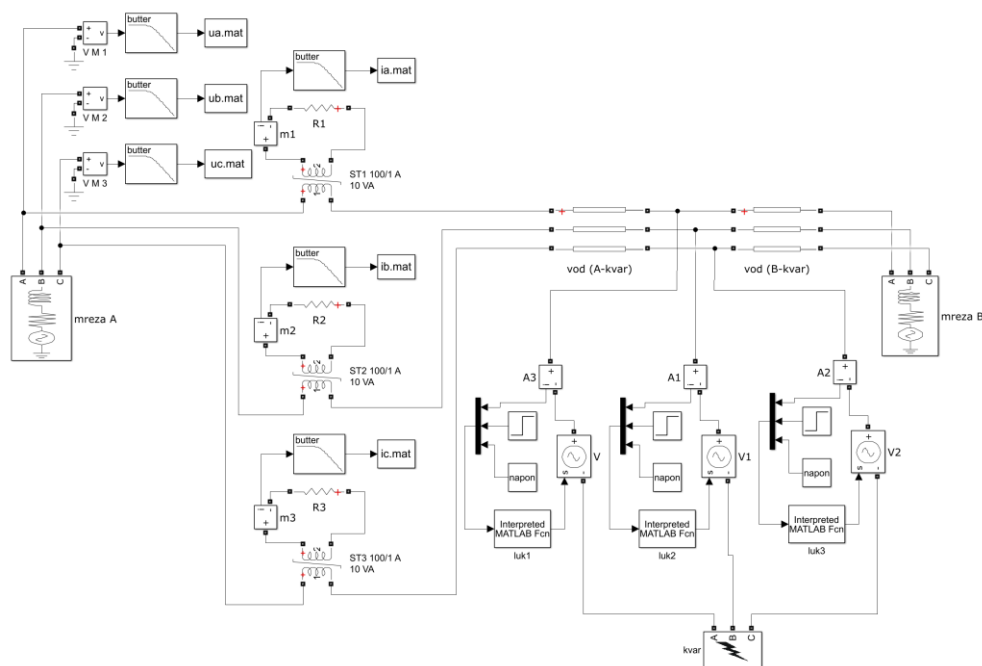
Za potrebe testiranja algoritma u programskom paketu MATLAB/Simulink formiran je model dvostrano napajano nadzemnog voda 110 kV naponskog nivoa. Kompletan model prikazan je na Slici 23. Osnovni elementi ovog modela su:

- model nadzemnog voda,
- model mreže sa leve i desne strane nadzemnog voda,
- modeli strujnih transformatora,
- modeli električnog luka,
- blok za simulaciju kvarova,
- analogni (Butterworth) filter.

Za modelovanje nadzemnog voda izabrana je trofazna šema voda sa raspodeljenim parametrima. Ovim je uzeta u obzir i međusobna induktivnost i kapacitivnost faza voda. Korišćeni su sledeći parametri voda:  $r_d=0.12 \text{ } \Omega/\text{km}$ ,  $r_o=0.32 \text{ } \Omega/\text{km}$ ,  $l_d =1.3 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $l_o=4.1 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_d=8.9 \text{ nF}/\text{km}$ ,  $c_o=5 \text{ nF}/\text{km}$ . Ukupna dužina voda (od mreže A do kvara i od kvara do mreže B) iznosi 150 km.

Pretpostavljeno je da su mreže sa obe strane voda aktivne, te da su fazni stavovi napona ovih mreža pomereni za  $10^\circ$ . Pri tome, korišćeni su sledeći parametri:  $Z_A= Z_B= 7.54 \text{ } \Omega$  ( $R_A=R_B=0.15 \text{ } \Omega$ ,  $L_A=L_B=24 \text{ mH}$ ).

Kako bi signali koji se prosleđuju algoritmu bili što realniji, pre A/D konverzije na signale je primenjen *Butterworth* filter (drugog reda, frekvencije 500 Hz). Primena ovog filtra je uobičajena kako bi se izbegao Alijas (*Aliasing*) efekat, odnosno kako bi se zadovoljila teorema o odabiranju ( $f_{odabiranja} > 2f_{max}$ , gde je  $f_{odabiranja}$  - frekvencija odabiranja, a  $f_{max}$  - frekvencija najvišeg harmonika u procesiranom signalu). Na kraju, primenjena je A/D konverzija pri čemu je izabrana frekvencija odabiranja od 3.2 kHz (64 odbirka po periodu).



Slika 23 Sistem za testiranje algoritma formiran u MATLAB/Simulink programskom paketu

## 5.3 Testiranje algoritma pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink

Algoritam prikazan u ovom poglavlju kao osnovni cilj ima kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora. Primenom ovog algoritma, u kombinaciji sa algoritmom za detekciju električnog luka koji je prikazan u [4] (detaljna analiza ovog algoritma izvršena je u Poglavlju 4), omogućuje detekciju električnog luka bez obzira na zasićenje strujnog transformatora. Prema tome, signal generisan u okviru MATLAB/Simulink programskog paketa najpre se propušta kroz algoritam za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora, a zatim se prosleđuje algoritmu za detekciju električnog luka [4].

Iz tog razloga, u narednim poglavljima izvršena je analiza onih uticaja koji se dominantno odražavaju na pojavu zasićenja strujnog transformatora: jednosmerna komponenta struje kvara, tip opterećenja strujnog transformatora i remanentni fluks. Pojave koje se dominantno odražavaju na rad algoritma za detekciju električnog luka [4] nisu detaljnije analizirane, imajući u vidu da ovaj algoritam ne predstavlja originalni doprinos ove doktorske disertacije.

### 5.3.1 Analiza uticaja tipa zasićenja strujnog transformatora

Zasićenje strujnog transformatora može biti izazvano jednosmernom komponentom struje kvara (DC zasićenje strujnog transformatora) i/ili naizmeničnom komponentom struje kvara (AC zasićenje strujnog transformatora). Tokom DC zasićenja strujnog transformatora na jednoj osnovnoj periodi javlja se jedan interval zasićenja. S druge strane, tokom AC zasićenja na jednoj osnovnoj periodi javljaju se dva intervala zasićenja.

Dimenzionisanje strujnog transformatora na način kojim se obezbeđuje da ni pod kakvim uslovima ne dolazi do njegovog zasićenja, najčešće zahteva jako visoku vrednost napona u kolenu karakteristike magnećenja. Troškovi i dimenzije ovakvog strujnog transformatora bili bi previsoki [61].

Naime, napon u kolenu karakteristike magnećenja proporcionalan je sa presekom jezgra strujnog transformatora ( $S$ ) i gustinom fluksa ( $B$ ) [61]:

$$V_k \approx B \cdot S \quad (5.22)$$

Drugim rečima, napon u kolenu krive magnećenja može se povećati ili povećanjem preseka jezgra ili povećanjem gustine fluksa (odnosno izborom adekvatnog materijala jezgra), što svakako za posledicu ima povećanje troškova.

Kako bi se izbeglo zasićenje strujnog transformatora, potrebno je da napon u kolenu krive magnećenja zadovoljava sledeću relaciju:

$$V_{kmax} = K_{AC} \cdot K_{DC} \cdot K_{REM} \cdot I_N \cdot (R_B + R_{CT}) \quad (5.23)$$



U prethodnoj relaciji oznake imaju sledeće značenje:

- $R_{CT}$  – otpornost sekundarnog kola (sekundarnih veza),
- $R_B$  – otpornost releja (otpornost opterećenja povezanog na sekundar strujnog transformatora),
- $I_N$  – nominalna struja sekundara strujnog transformatora,
- $K_{AC}$  - faktor simetrične komponente struje kvara. Uvažavanjem ovog koeficijenta, obezbeđuje se da strujni transformator ne ulazi u zasićenje usled simetrične komponente struje kvara. Definiše se kao odnos maksimalne struje kvara (tj. njene vrednosti na sekundaru)  $I_{KSmax}$  i nominalne struje strujnog transformatora  $I_N$ :

$$K_{AC} = \frac{I_{KSmax}}{I_N} \quad (5.24)$$

- $K_{DC}$  - faktor asimetrične komponente struje kvara. Uvažavanjem ovog koeficijenta obezbeđuje se da strujni transformator ne ulazi u zasićenje usled jednosmerne komponente struje kvara. Ovaj faktor definisan je pre svega odnosom aktivne otpornosti  $R$  i induktivnosti  $X$  primarnog kola (tj. sistema):

$$K_{DC} = 1 + \frac{X}{R} \quad (5.25)$$

- $K_{REM}$  - faktor remanentnog fluksa. Uvažavanjem ovog koeficijenta omogućuje se da strujni transformator ne ulazi u zasićenje usled remanentnog fluksa. Definiše se sledećom relacijom:

$$K_{REM} = \frac{1}{1 - \frac{\varphi_R}{\varphi_S}} \quad (5.26)$$

U prethodnoj relaciji, sa  $\varphi_R$  označen je remanentni fluks, dok je sa  $\varphi_S$  označen fluks pri kome strujni transformator ulazi u zasićenje.

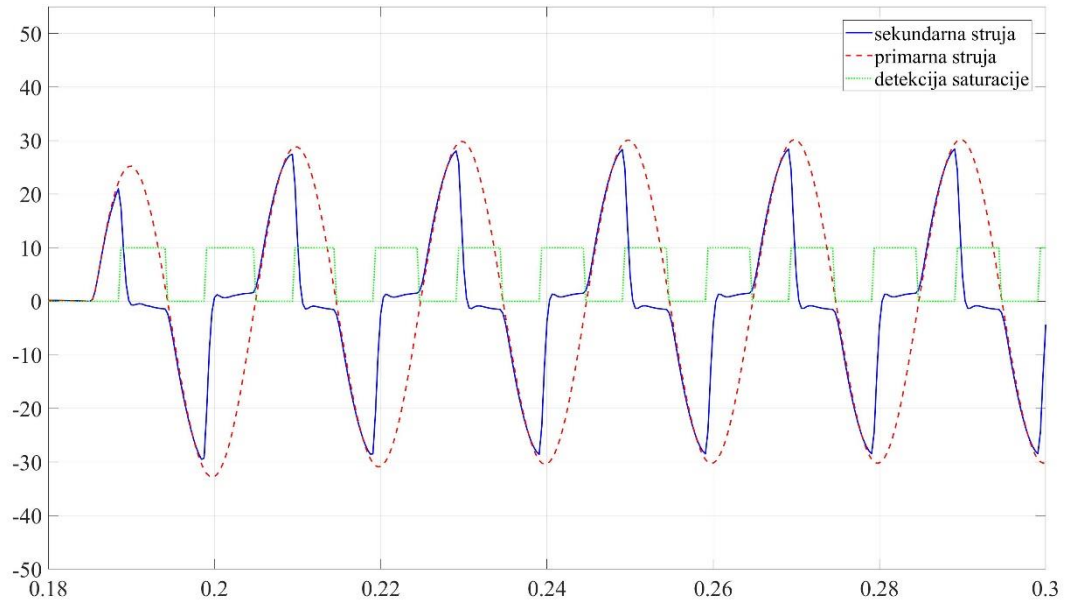
Može se konstatovati da dimenzionisanje strujnog transformatora tako da ni pod kojim uslovima ne dolazi do njegovog zasićenja, u najvećem broju slučajeva ne bi bilo praktično i ekonomski opravdano. Tipično, dimenzionisanje se vrši tako da naizmenična komponenta struje kvara ne dovodi do zasićenja, dok se s druge strane smatra da nije opravdano strujni transformator dimenzionisati u odnosu na maksimalnu vrednost jednosmerne komponente struje kvara i/ili maksimalnu vrednost remanentnog fluksa.

Međutim, treba imati u vidu da iako se AC zasićenje strujnog transformatora znatno ređe javlja, ono ima značajnije posledice na rad relejne zaštite u odnosu na DC zasićenje. Naime, DC zasićenje se smanjuje kako se smanjuje jednosmerna komponenta struje kvara. Iz tog razloga, obično dolazi do kašnjenja u reagovanju zaštite, ali se ona ipak pobuđuje, dok u slučaju AC zasićenja zaštita može ostati nepobuđena [62].

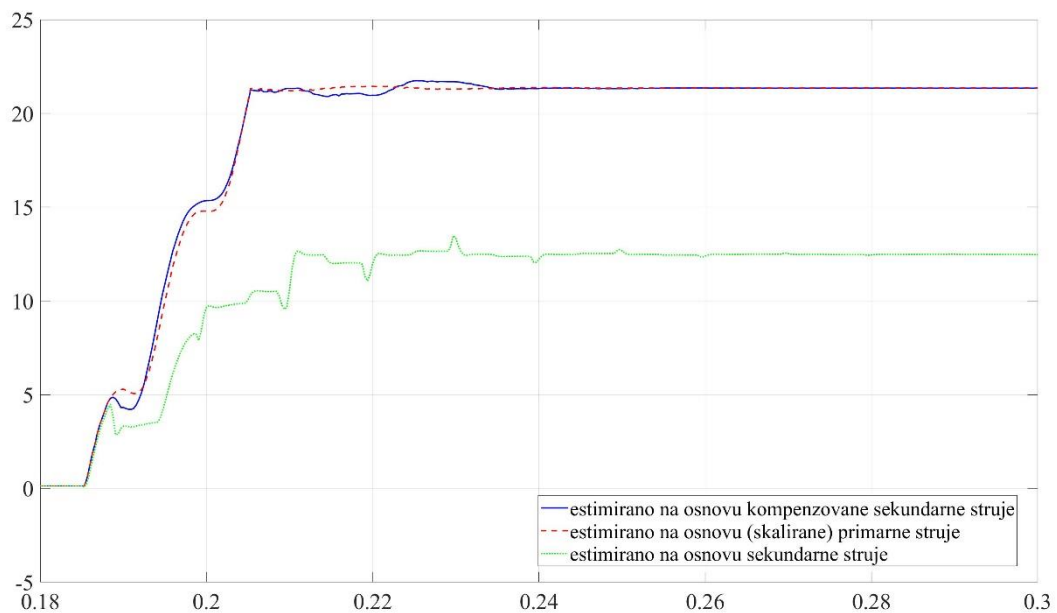
U narednom tekstu, analiziran je rad algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora pri različitim vrstama zasićenja: AC zasićenje i DC+AC zasićenje. Kvar sa električnim lukom simuliran je u četiri različita trenutka, odabranih tako da dva trenutka nastanka kvara za rezultat imaju maksimalnu jednosmernu komponentu struje kvara, dok je u preostala dva slučaja jednosmerna komponenta struje kvara (približno) jednaka nuli.

Trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.185$  s

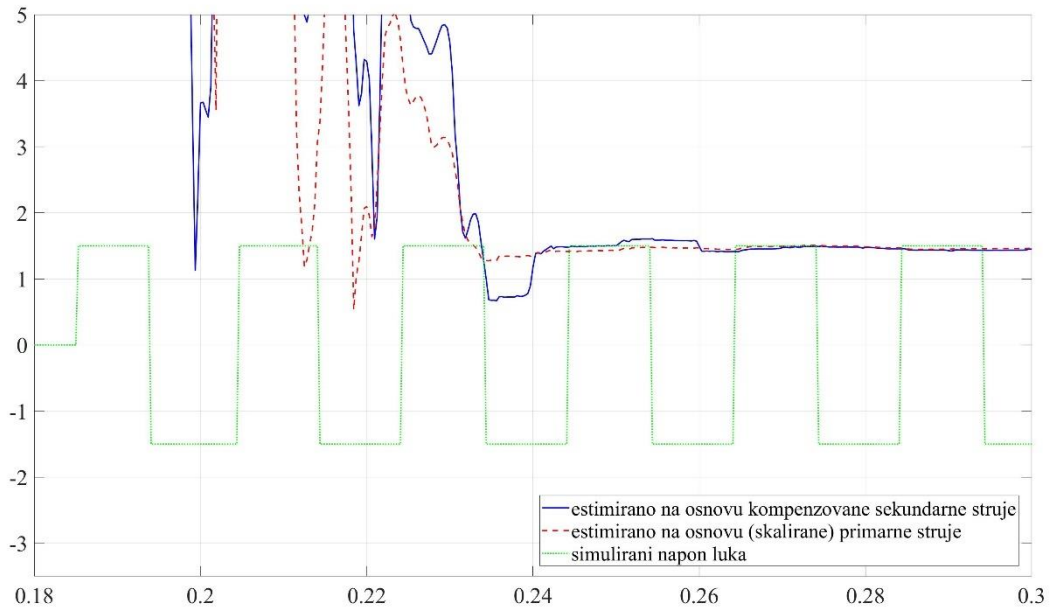
**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**



Slika 24 AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.185$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja

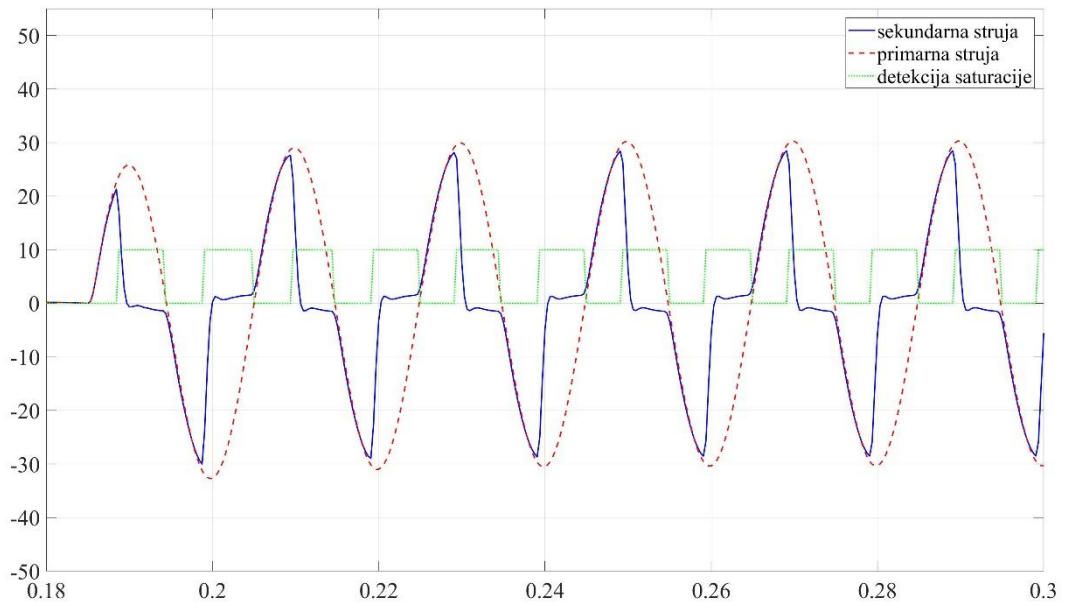


Slika 25 AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.185$  s: efektivna vrednost struje

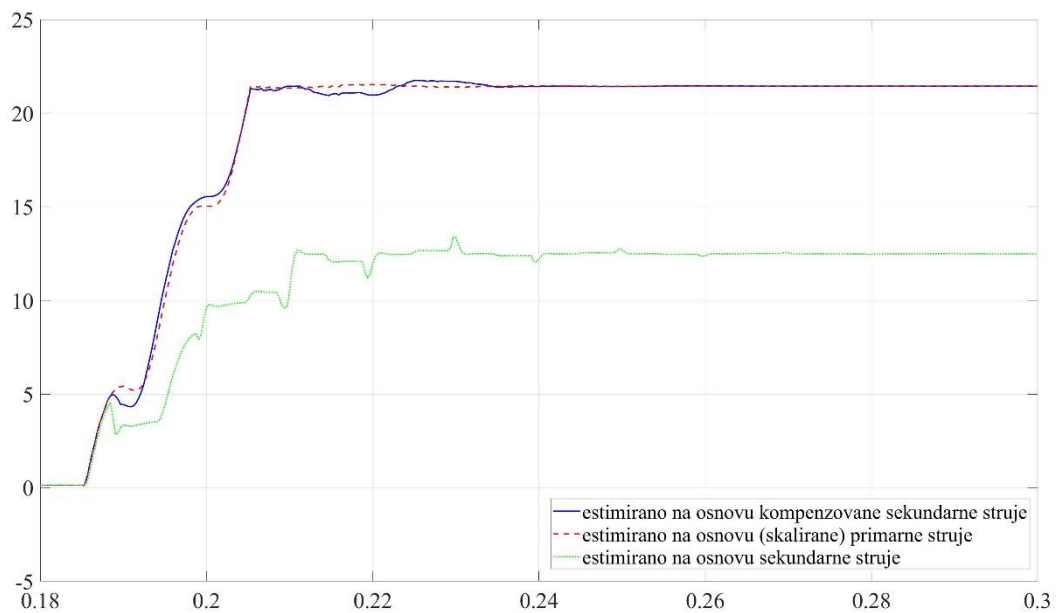


Slika 26 AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.185$  s: napon luka

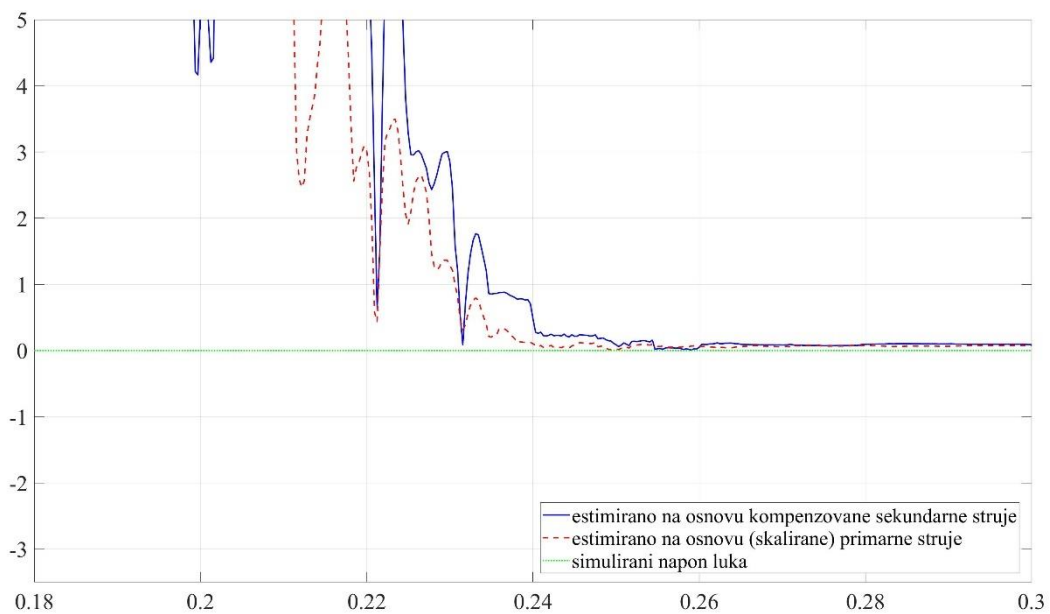
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



Slika 27 AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.185$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



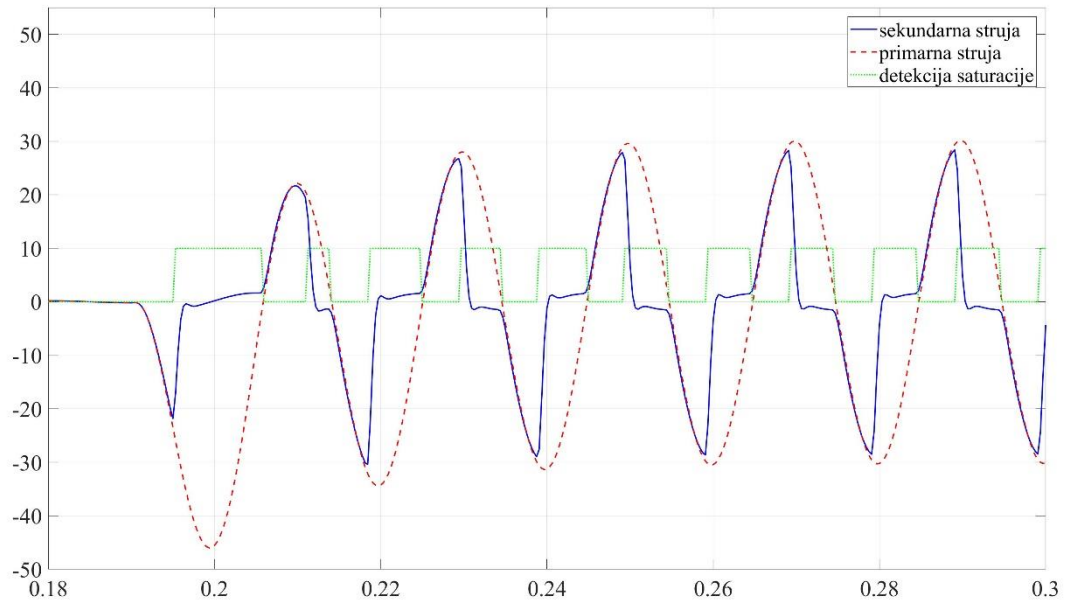
Slika 28 AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.185$  s: efektivna vrednost struje



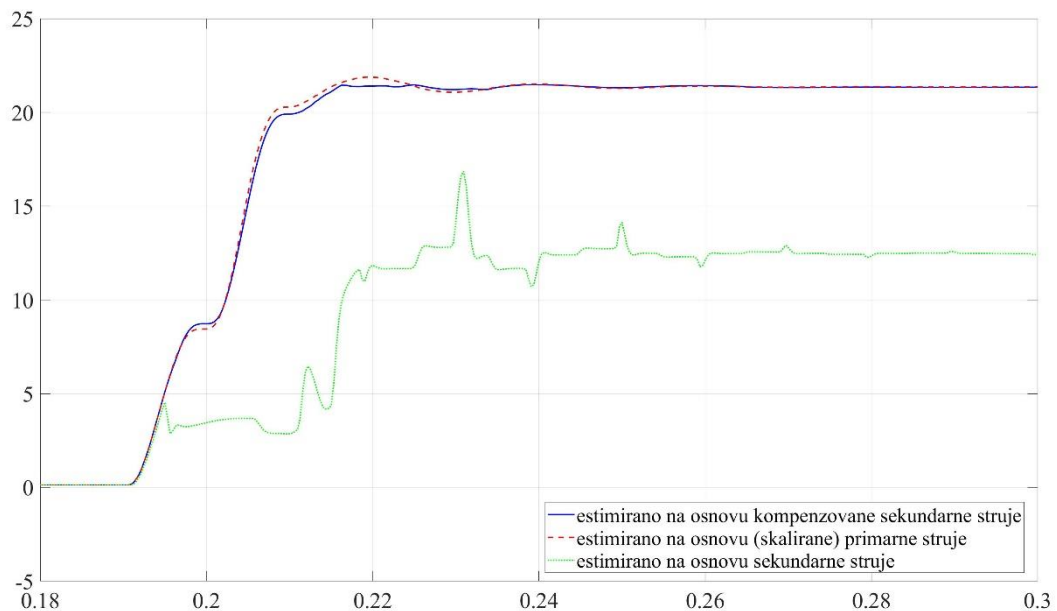
Slika 29 AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.185$  s: napon luka

Trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.19$  s

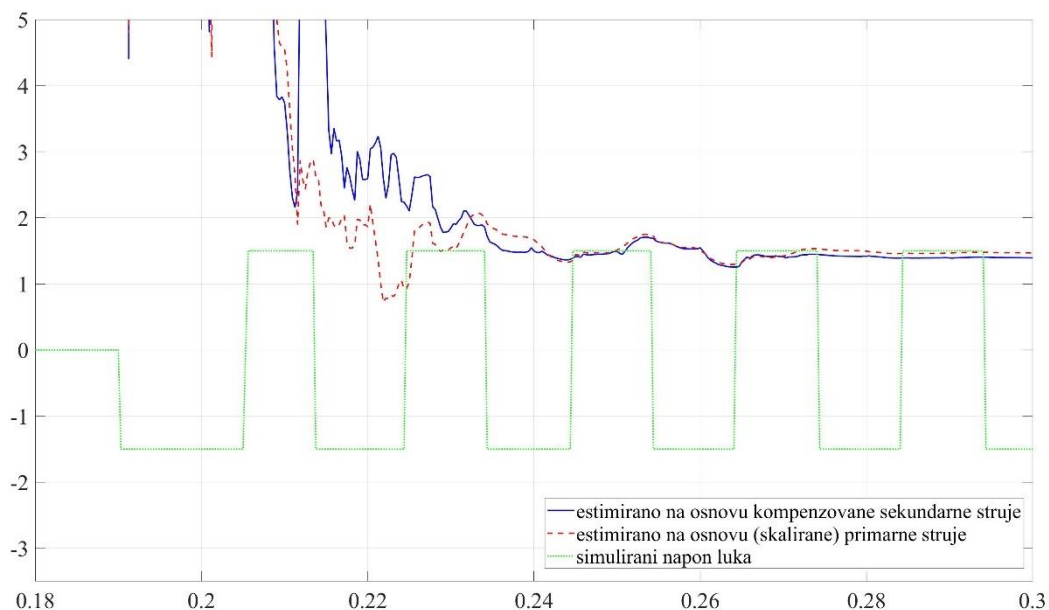
**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**



Slika 30 DC+AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.19$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja

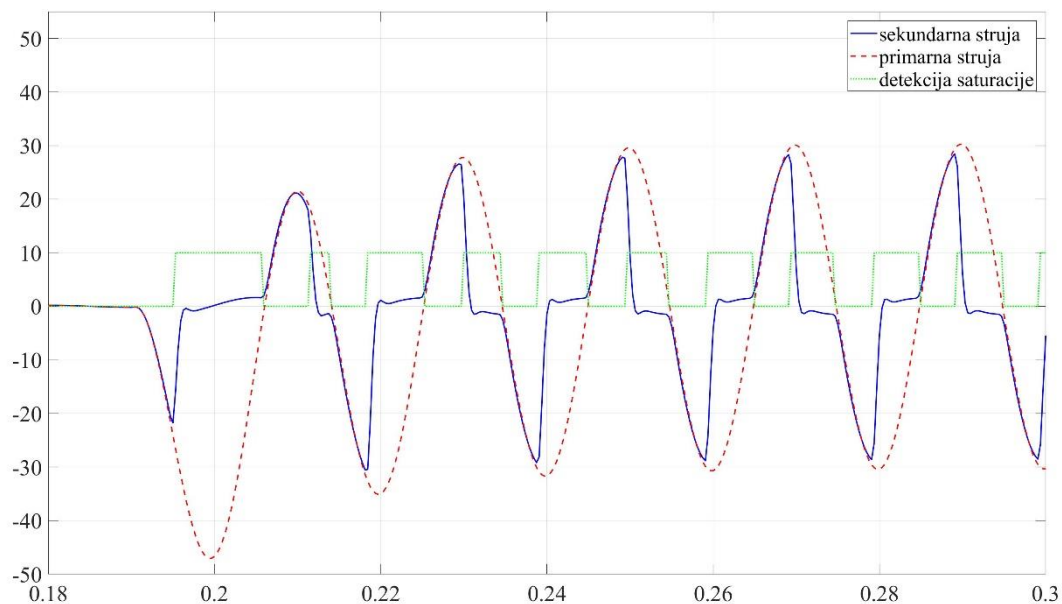


Slika 31 DC+AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.19$  s: efektivna vrednost struje

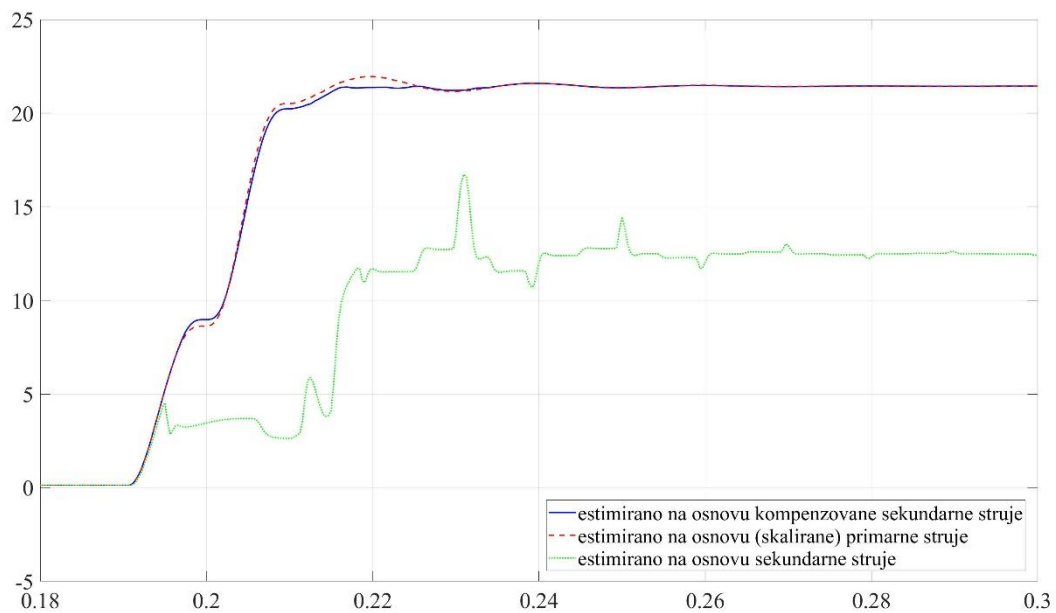


Slika 32 DC+AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.19$  s: napon luka

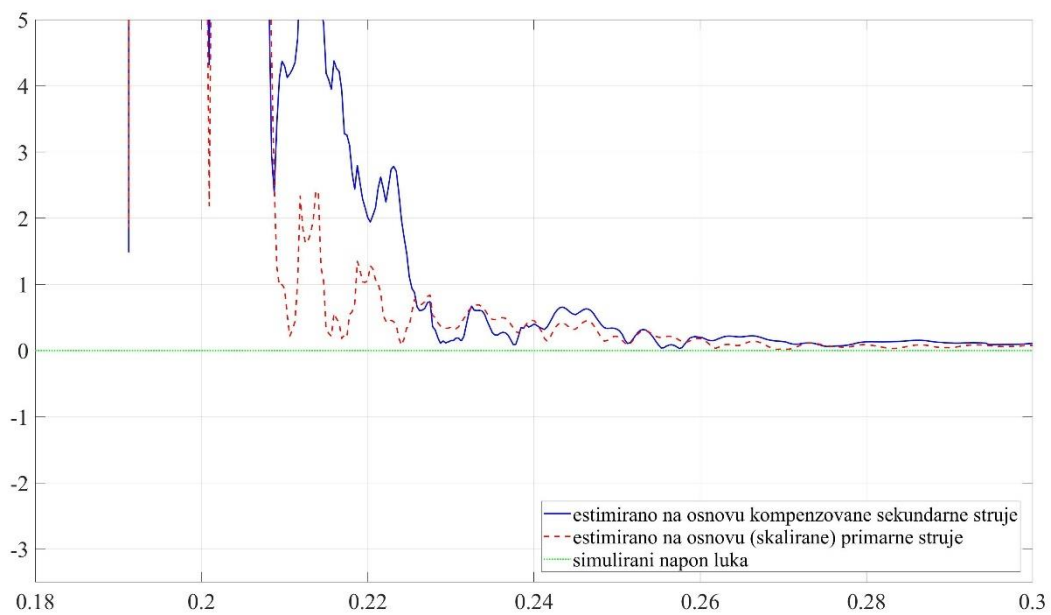
### Kvar bez električnog luka (trajni kvar)



Slika 33 DC+AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.19$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



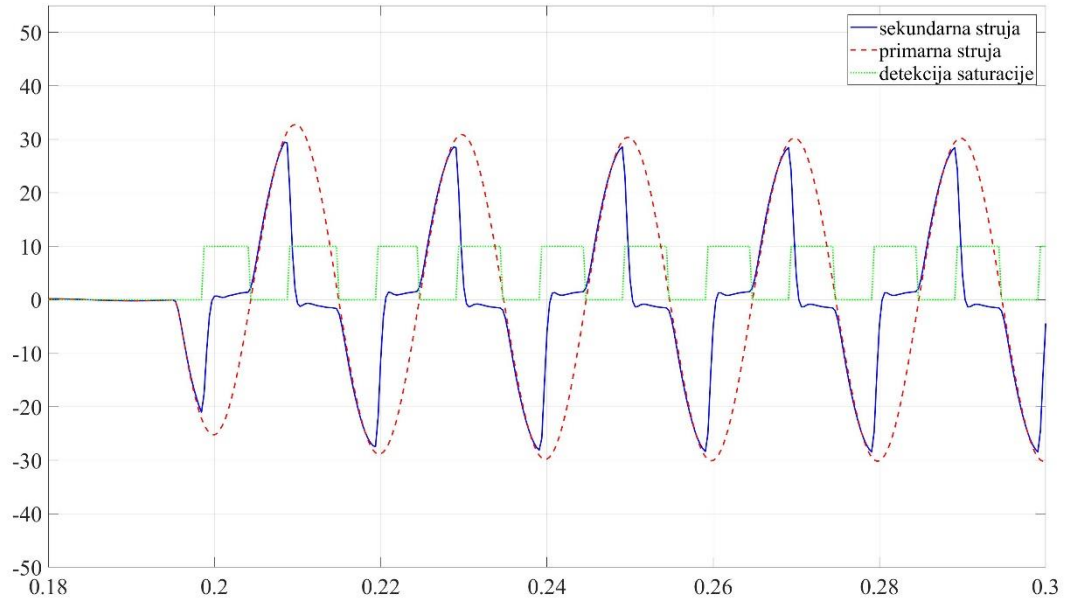
Slika 34 DC+AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.19$  s: efektivna vrednost struje



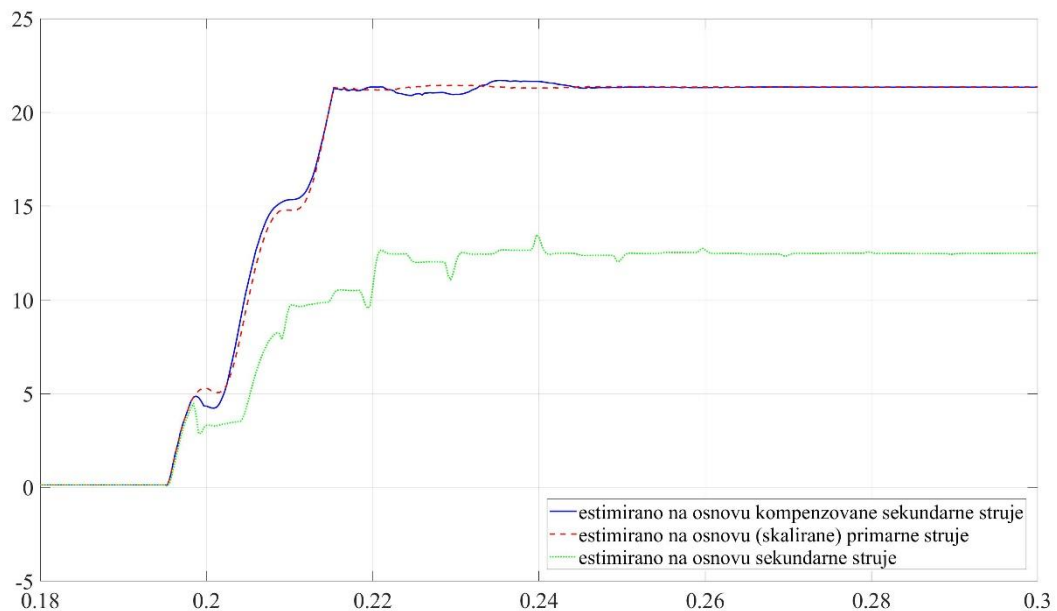
Slika 35 DC+AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.19$  s: napon luka

Trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.195$  s

**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**

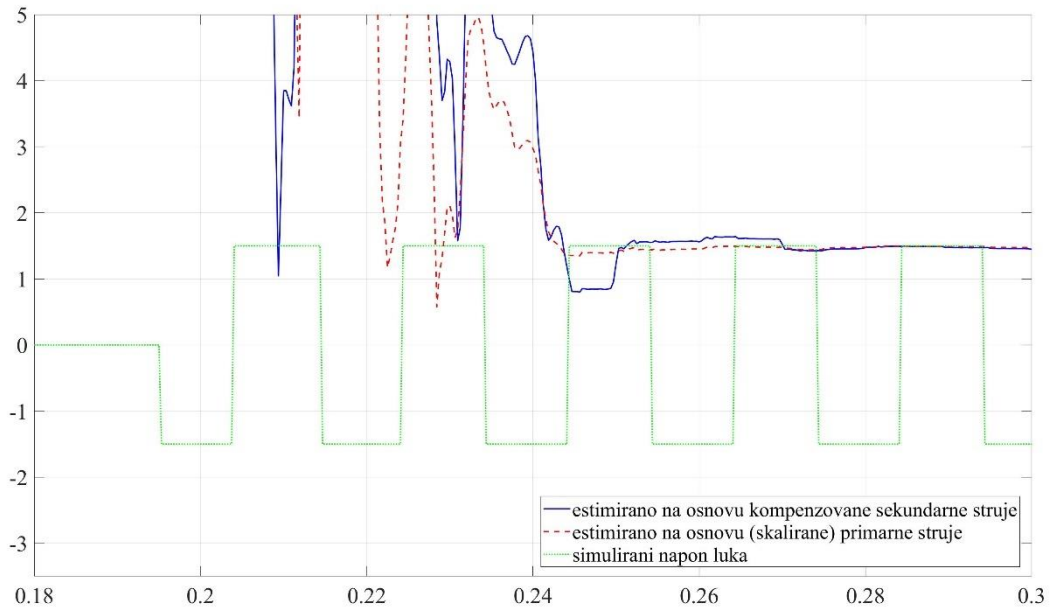


Slika 36 AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.195$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



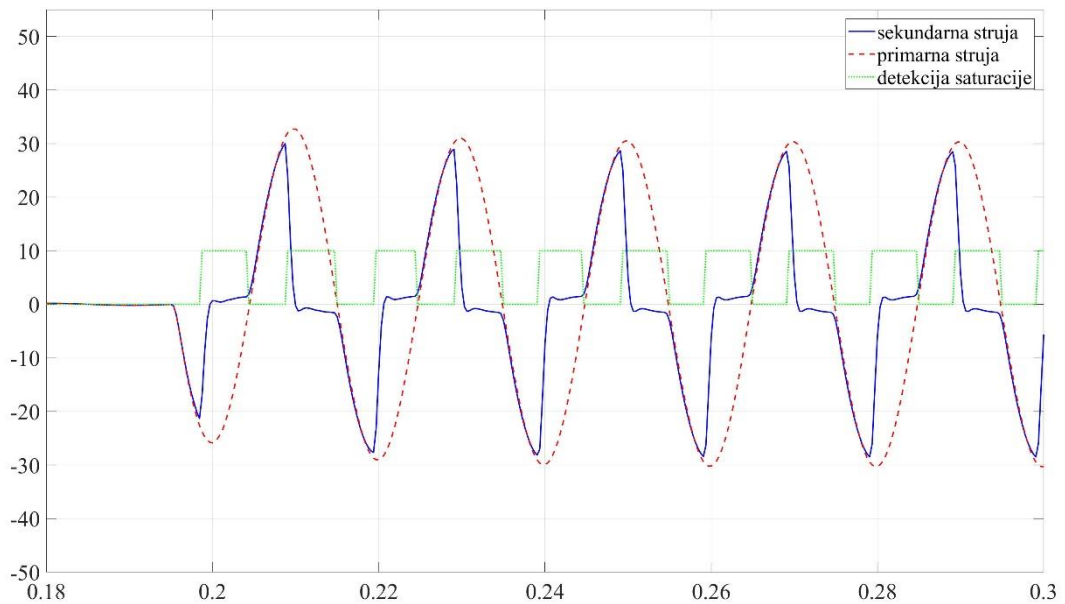
Slika 37 AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.195$  s: efektivna vrednost struje



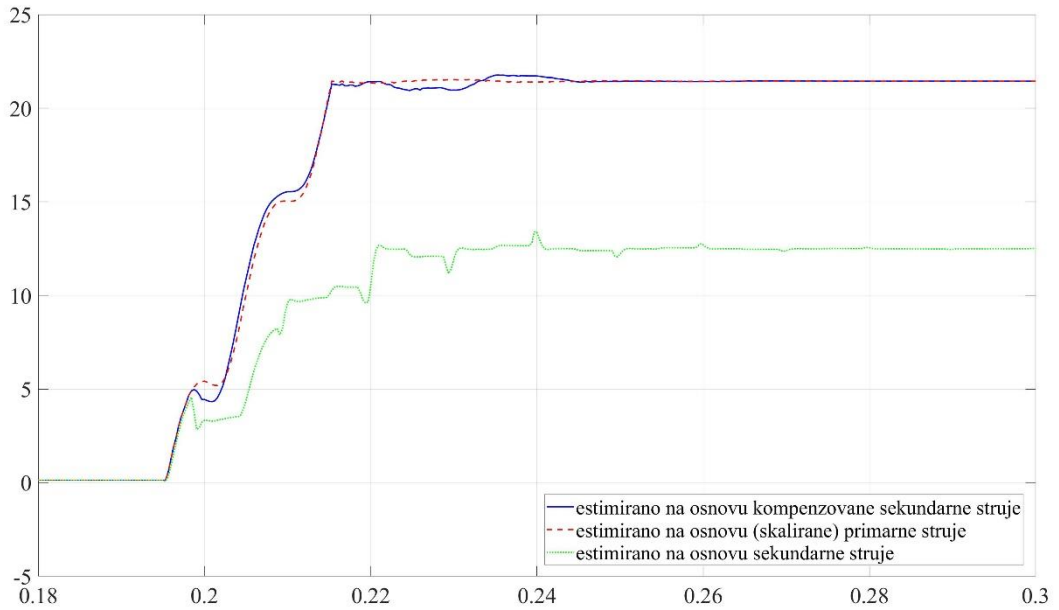


Slika 38 AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.195$  s: napon luka

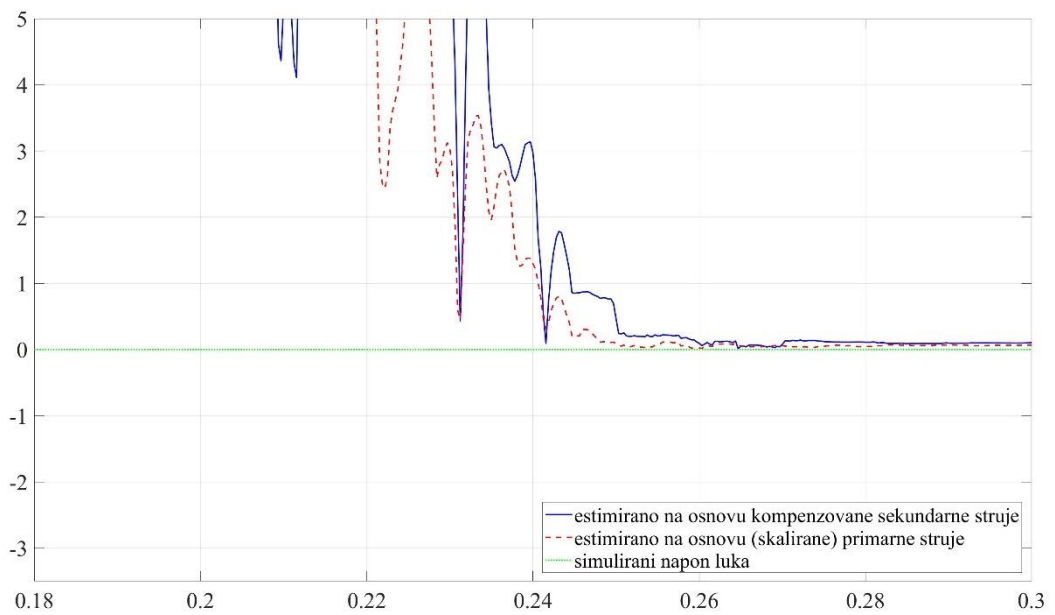
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



Slika 39 AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.195$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



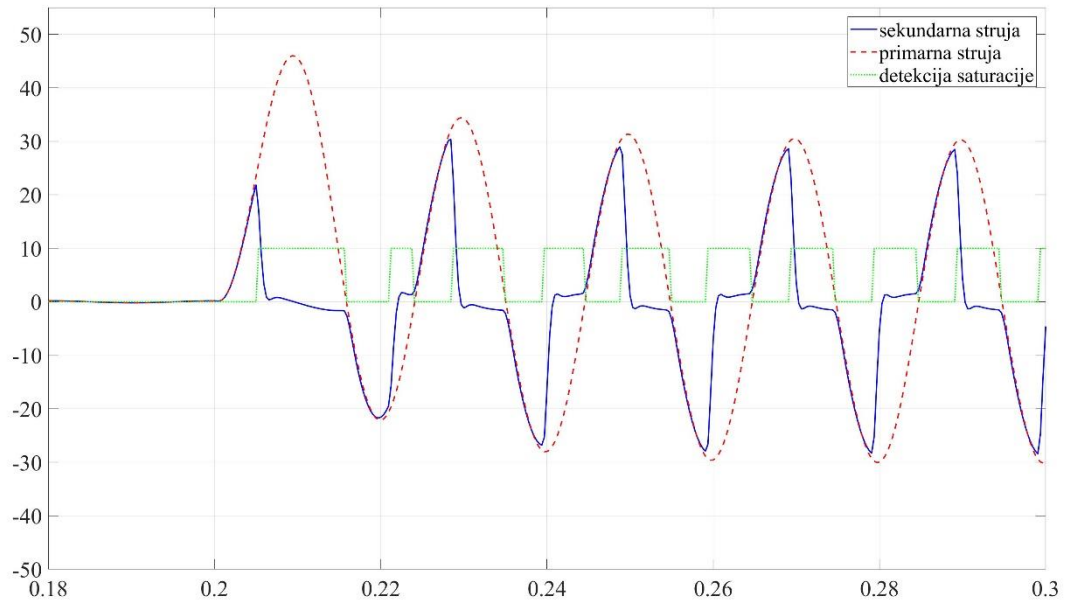
Slika 40 AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.195$  s: efektivna vrednost struje



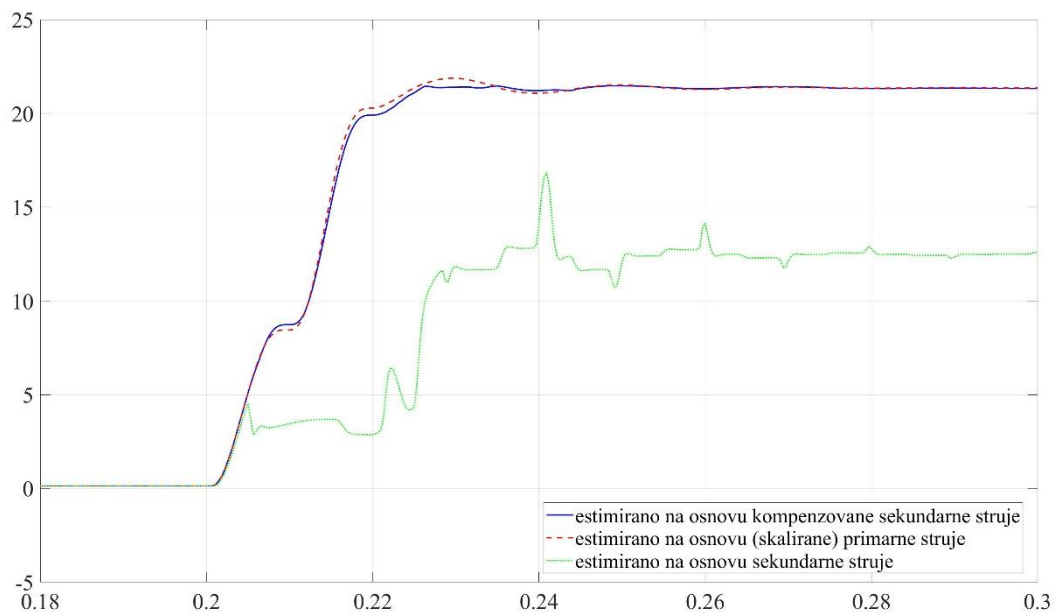
Slika 41 AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.195$  s: napon luka

Trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.2$  s

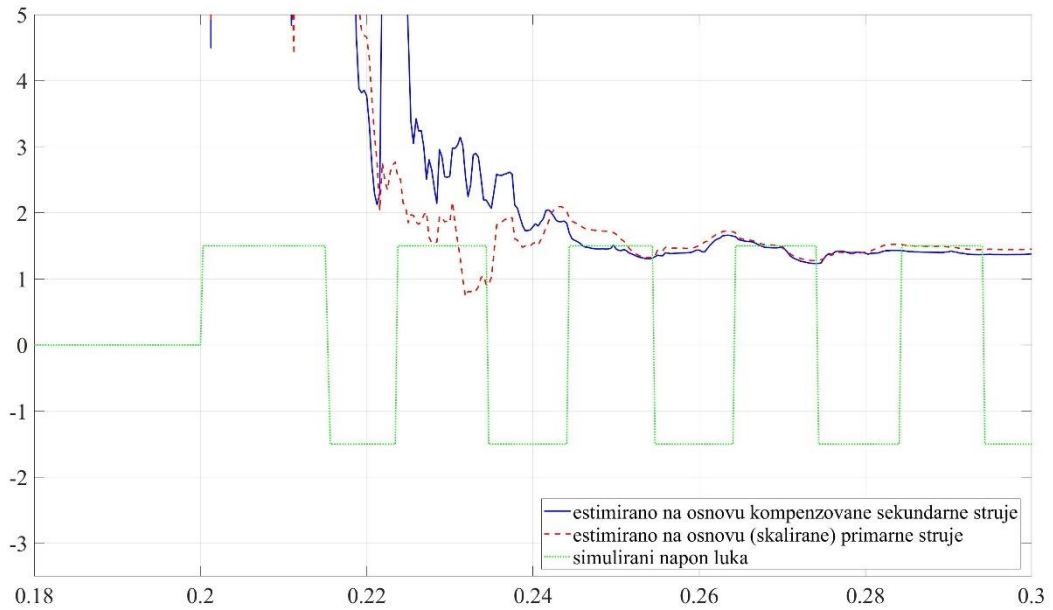
**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**



Slika 42 DC+AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.2$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja

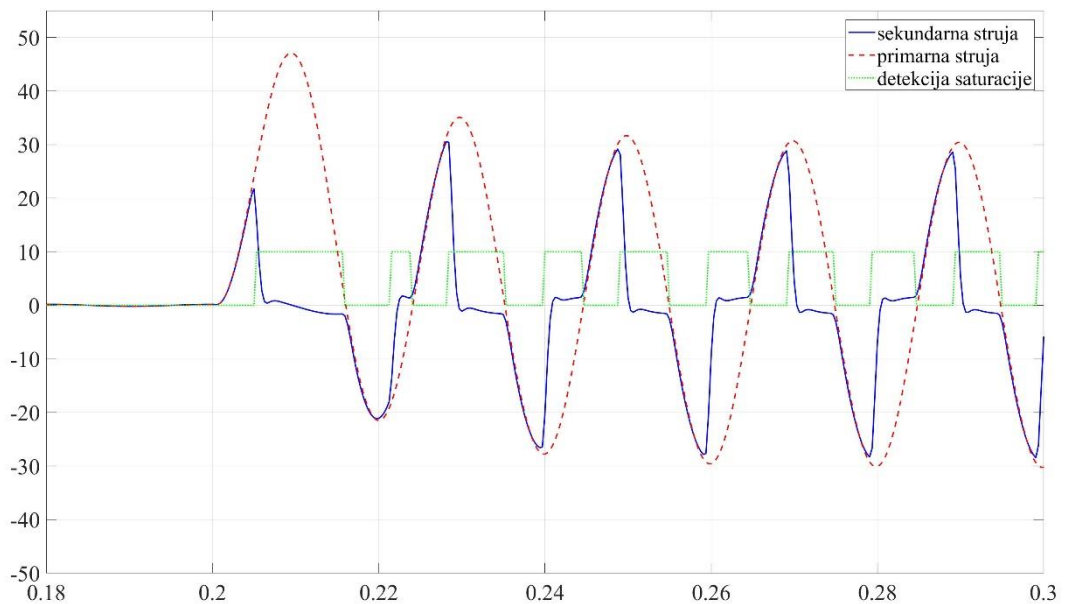


Slika 43 DC+AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.2$  s: efektivna vrednost struje

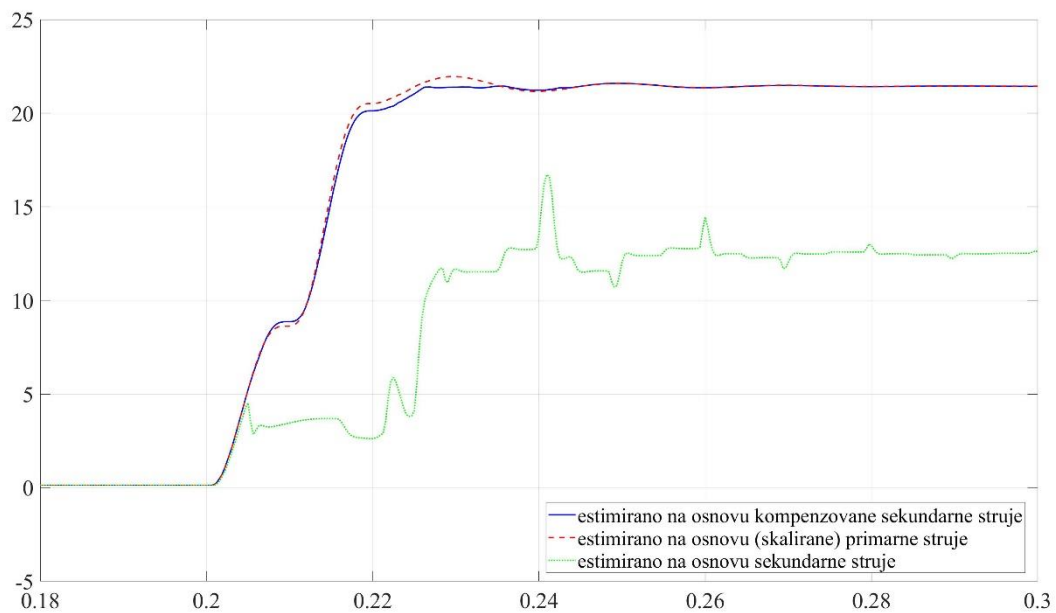


Slika 44 DC+AC tip zasićenja – kvar sa lukom -  $t_k=0.2$  s: napon luka

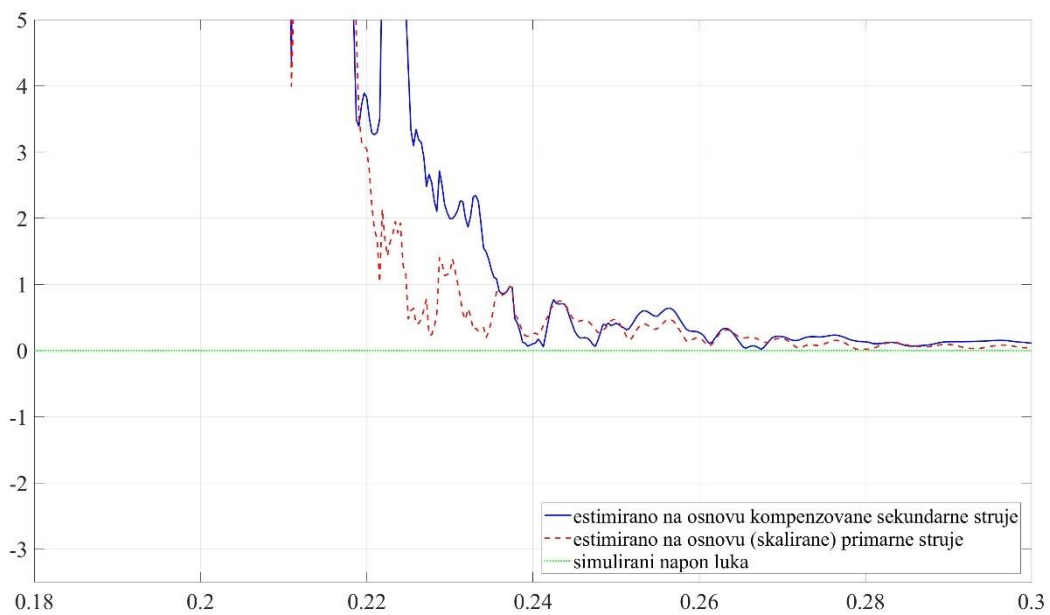
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



Slika 45 DC+AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.2$  s: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 46 DC+AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.2$  s: efektivna vrednost struje



Slika 47 DC+AC tip zasićenja – kvar bez luka -  $t_k=0.2$  s: napon luka

U Tabeli 1 dat je pregled dobijenih rezultata u pogledu tačnosti algoritma:

Tabela 1 Uticaj tipa zasićenja strujnog transformatora na tačnost algoritma

Trenutak kvara [s]	Tip zasićenja	Prolazan kvar (kvar preko luka)	Greška [%]	
			Osnovni harmonik struje kvara	Napon luka
0.185	AC	Da	0.09	1.87
		Ne	0.02	/
0.19	DC+AC	Da	0.14	2.67
		Ne	0.05	/
0.195	AC	Da	0.09	1.92
		Ne	0.07	/
0.2	DC+AC	Da	0.15	1.69
		Ne	0.05	/

Sprovedena analiza pokazuje da se tip zasićenja (DC+AC/AC) ne odražava na tačnost algoritma. U svim razmatranim slučajevima, greška pri estimaciji efektivne vrednosti osnovnog harmonika struje ne prevazilazi 0.15%, dok greška u estimaciji napona luka ne prelazi 5%.

Prema tome, može se konstatovati da bez obzira na tip zasićenja strujnog transformatora, algoritam omogućuje uspešnu kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora i nedvosmislenu identifikaciju prirode kvara.

### 5.3.2 Analiza uticaja tipa opterećenja strujnog transformatora

Opterećenje strujnog transformatora za zaštitu u najvećem broju slučajeva može se smatrati čisto rezistivnim. Naime, u slučaju savremenih mikroprocesorskih releja faktor snage ( $\cos \phi$ ) opterećenja na sekundaru strujnog transformatora je veoma blizak jedinici.

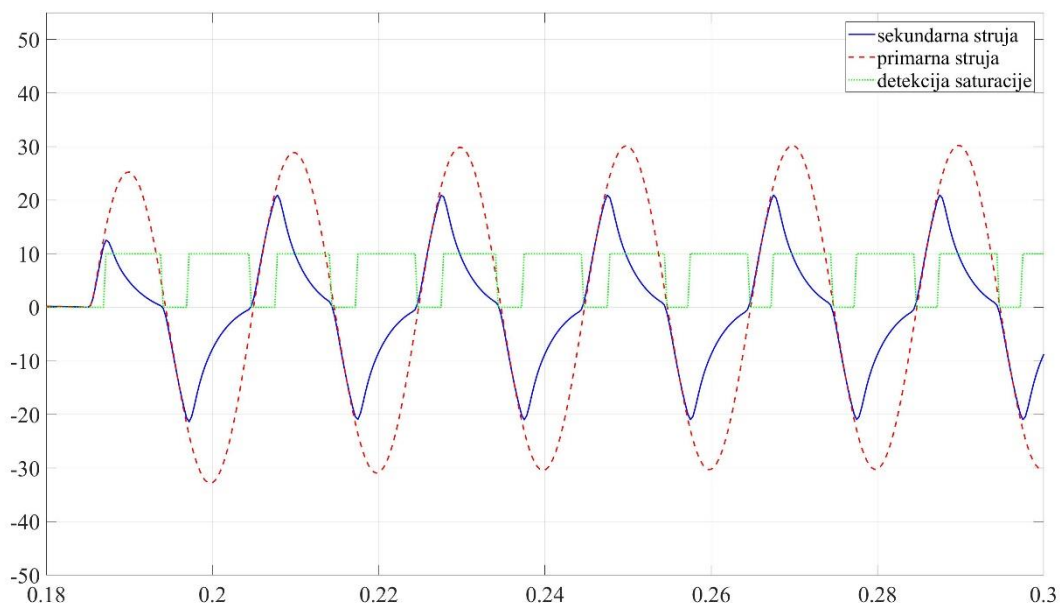
S druge strane, u slučaju releja koji su korišćeni u prošlosti faktor snage bio je značajno niži. Takođe, potrebno je imati u vidu da se izloženi algoritam za detekciju zasićenja strujnog transformatora zasniva na identifikaciji trenutka nagle (skokovite) promene strujnog signala. U slučaju čisto rezistivnog opterećenja, prilikom nastanka zasićenja dolazi do “oštrije” promene strujnog signala u odnosu na slučaj kada je na sekundaru induktivno opterećenje. Iz tog razloga, može se konstatovati da sa aspekta detekcije zasićenja primenom izloženog algoritma, induktivno opterećenje strujnog transformatora potencijalno predstavlja otežavajuću okolnost.

IEC standard propisuje da se tokom verifikacije tačnosti strujnog transformatora, testiranje vrši sa opterećenjem čiji faktor snage iznosi 0.8, ukoliko je opterećenje na sekundaru ST veće od 5 VA. U ostalim slučajevima, testiranje se vrši sa opterećenjem čiji je faktor snage 1 [63].

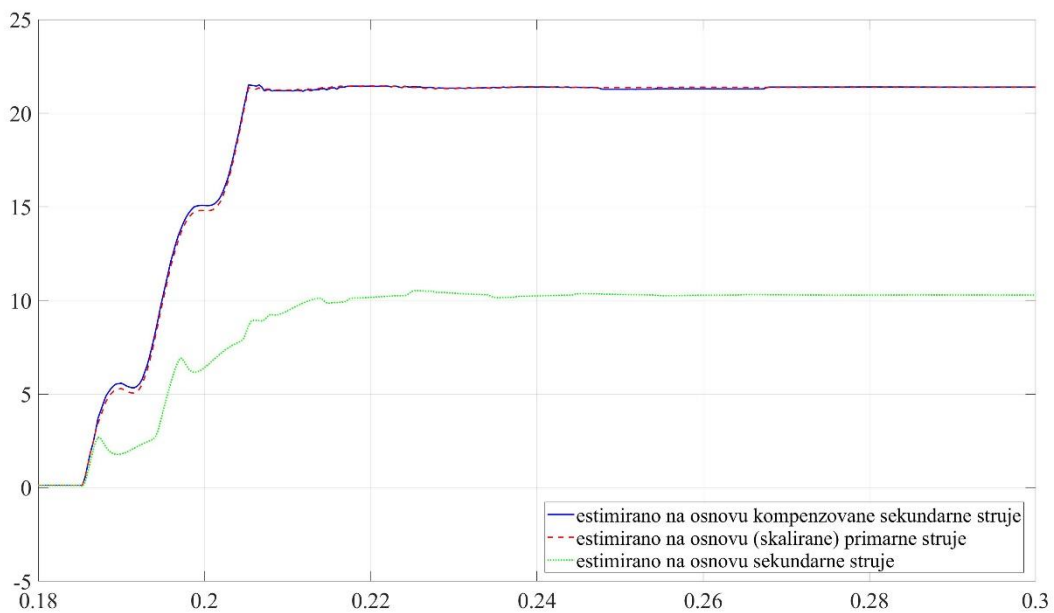
Imajući gore navedeno u vidu, analiziran je rad algoritma za različite vrednosti faktora snage:  $\cos \phi = 0.8$  i  $\cos \phi = 0.9$  (rad algoritma za  $\cos \phi = 1$  prikazan je u prethodnom poglavlju).

#### **Induktivno opterećenje: $\cos \phi = 0.8$**

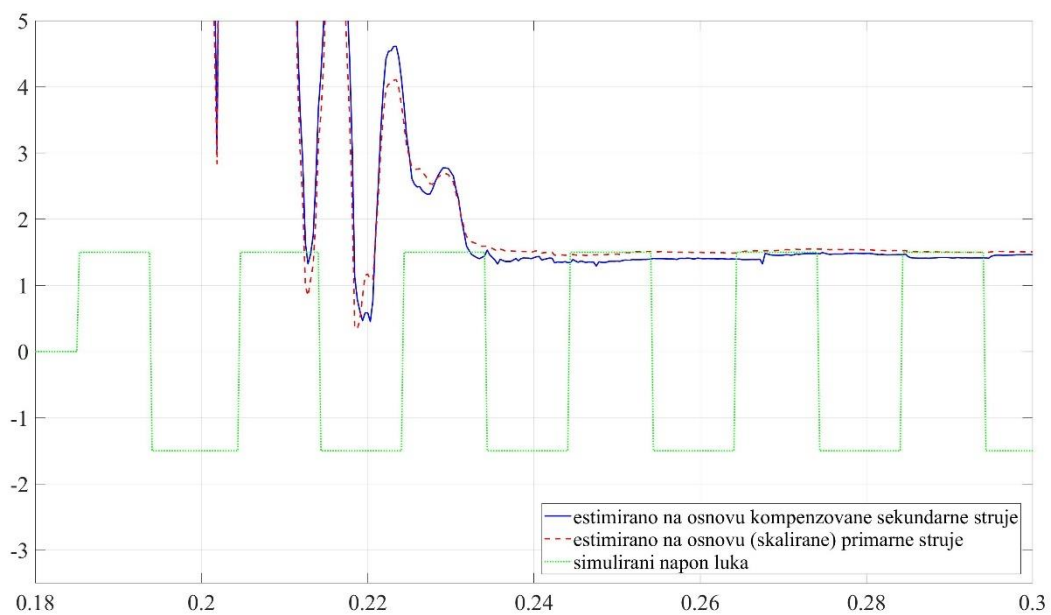
##### ***Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)***



Slika 48  $\cos \phi = 0.8$  - kvar sa lukom: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



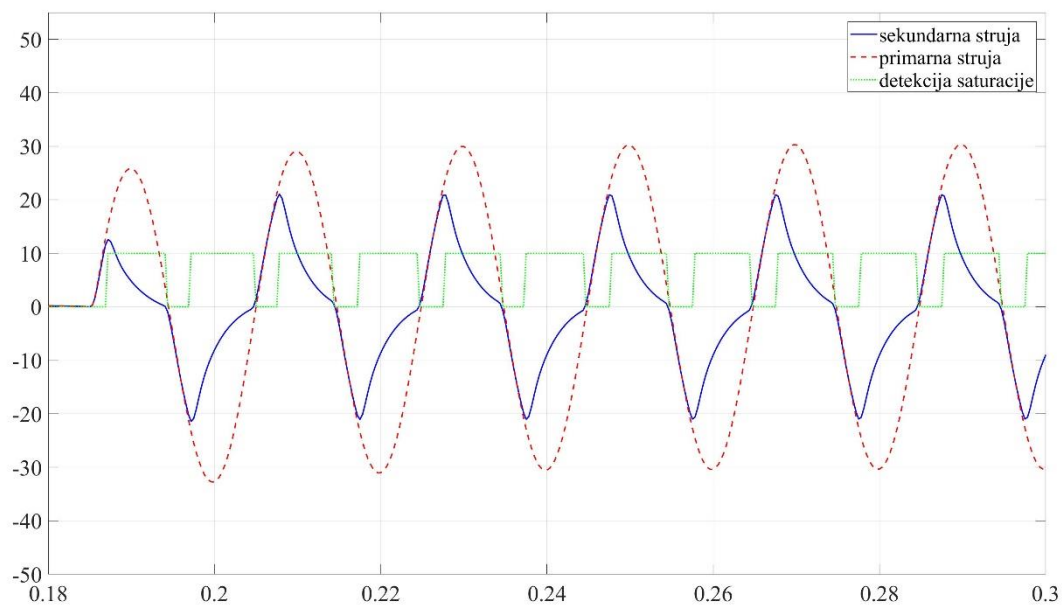
Slika 49  $\cos \phi=0.8$  - kvar sa lukom: efektivna vrednost struje



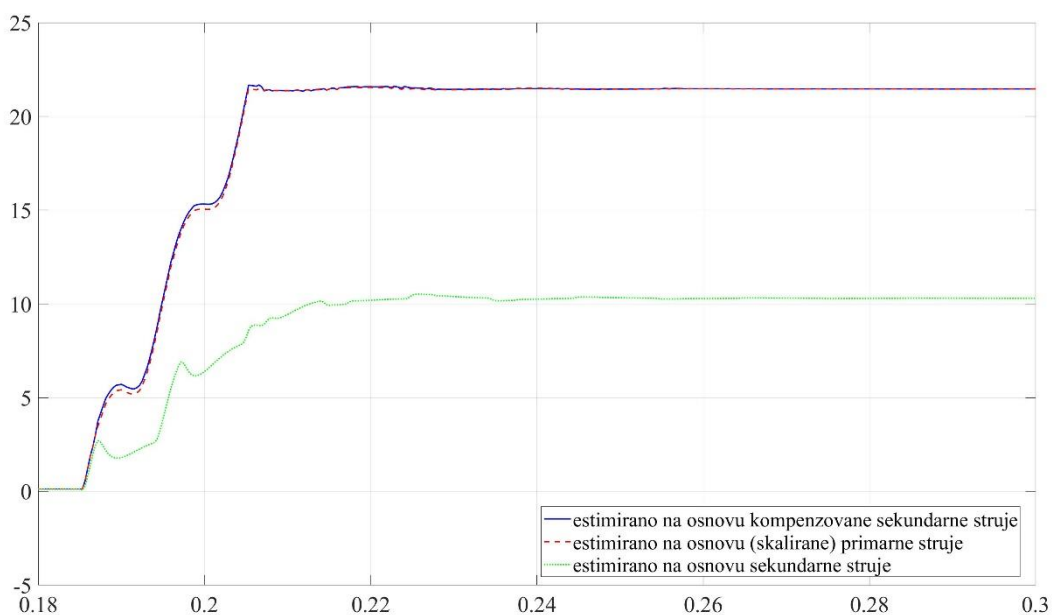
Slika 50  $\cos \phi=0.8$  - kvar sa lukom: napon luka



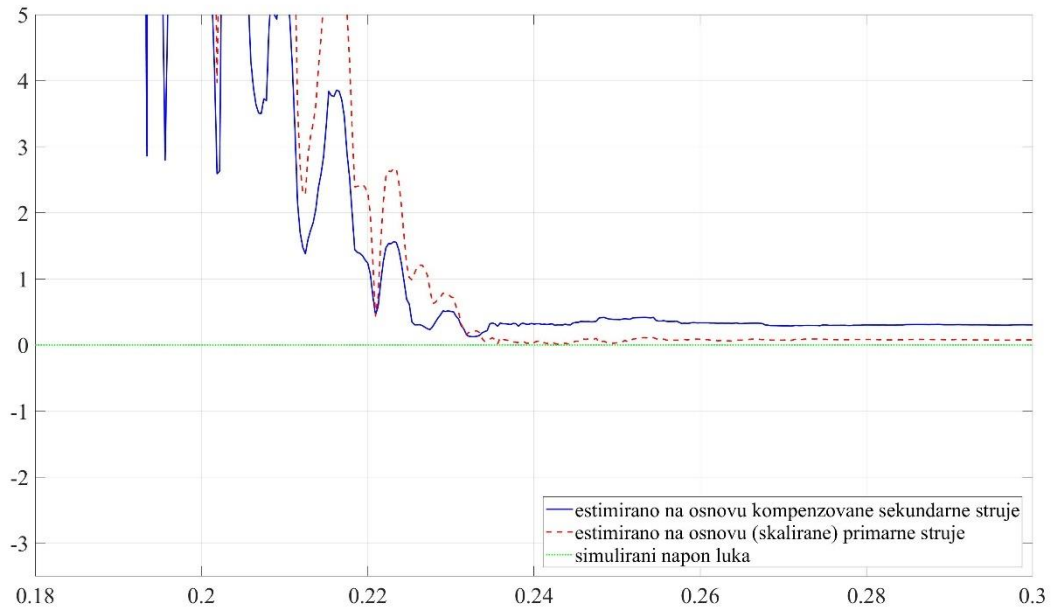
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



Slika 51  $\cos \phi=0.8$  - kvar bez luka: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



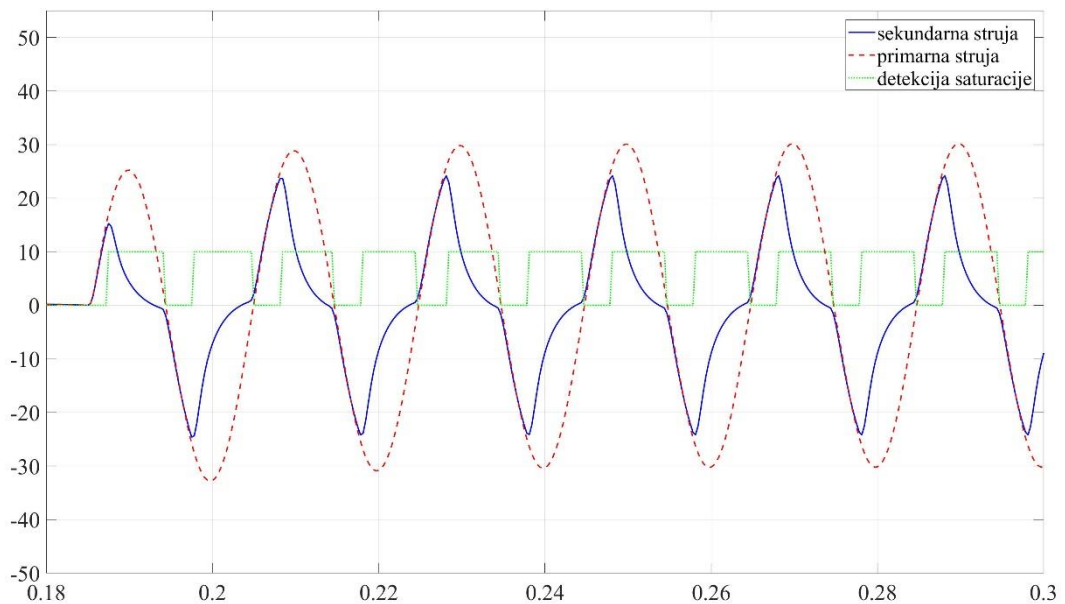
Slika 52  $\cos \phi=0.8$  - kvar bez luka: efektivna vrednost struje



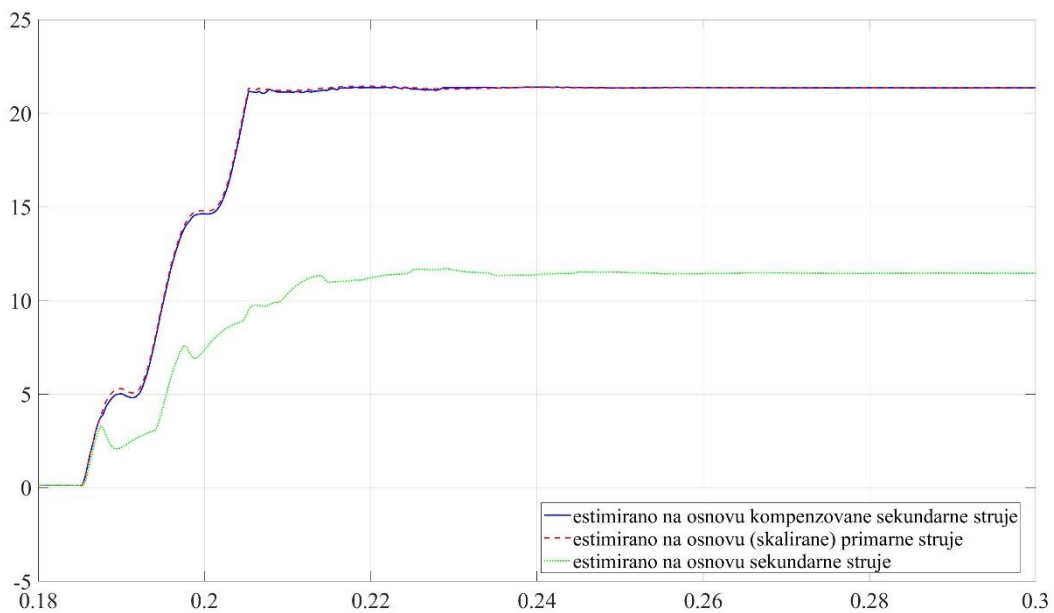
Slika 53  $\cos \phi=0.8$  - kvar bez luka: napon luka

**Induktivno opterećenje:  $\cos \phi=0.9$**

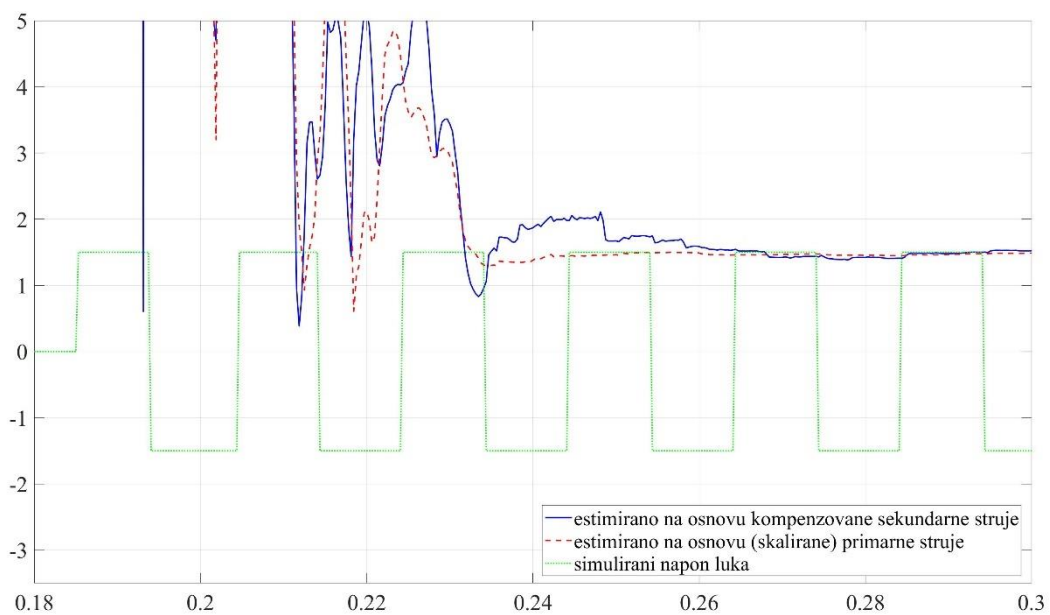
**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**



Slika 54  $\cos \phi=0.9$  - kvar sa lukom: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja

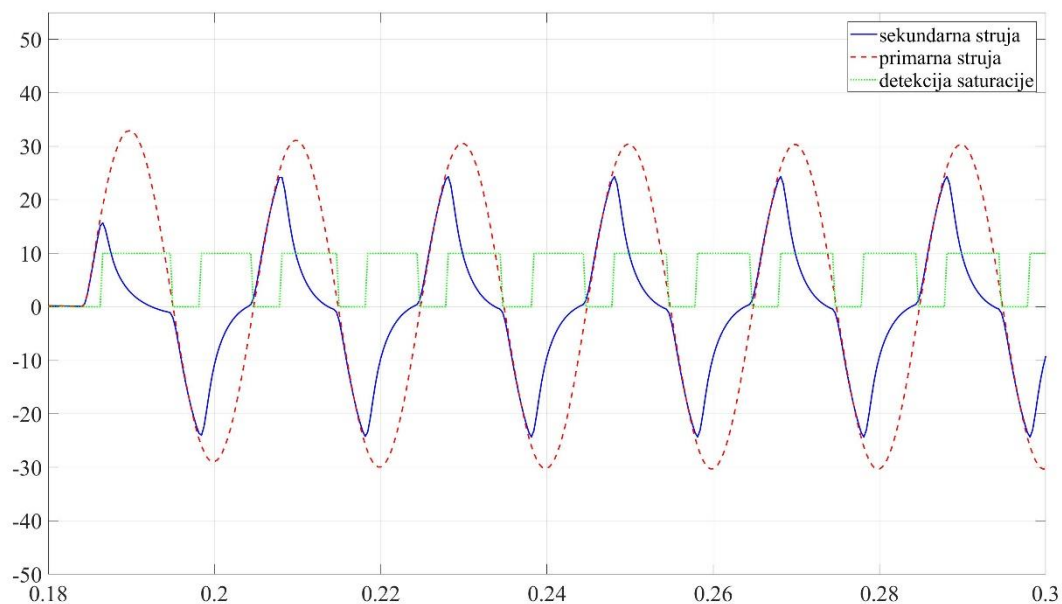


Slika 55  $\cos \phi=0.9$  - kvar sa lukom: efektivna vrednost struje

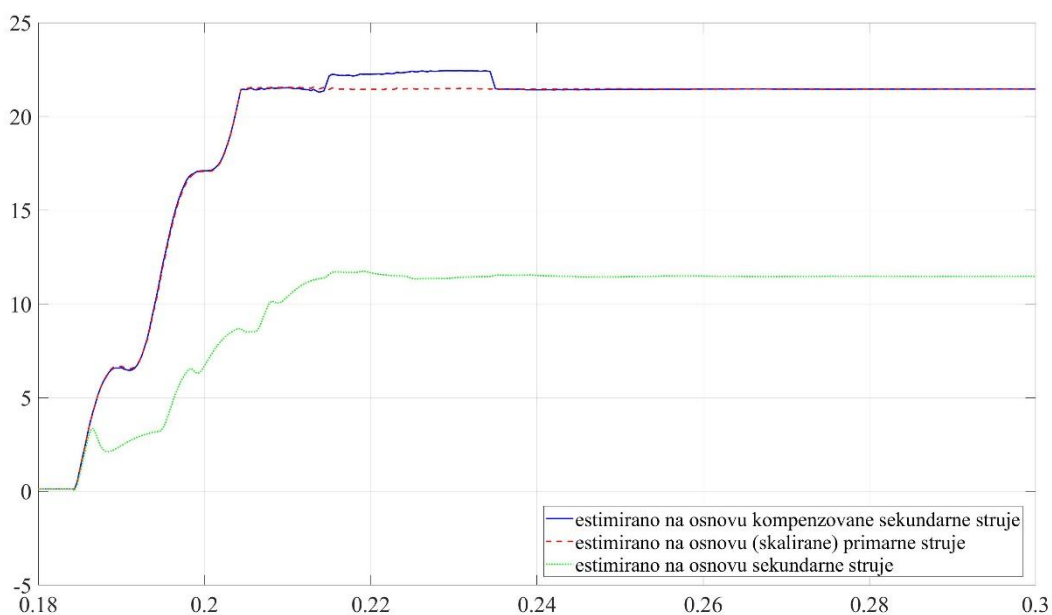


Slika 56  $\cos \phi=0.9$  - kvar sa lukom: napon luka

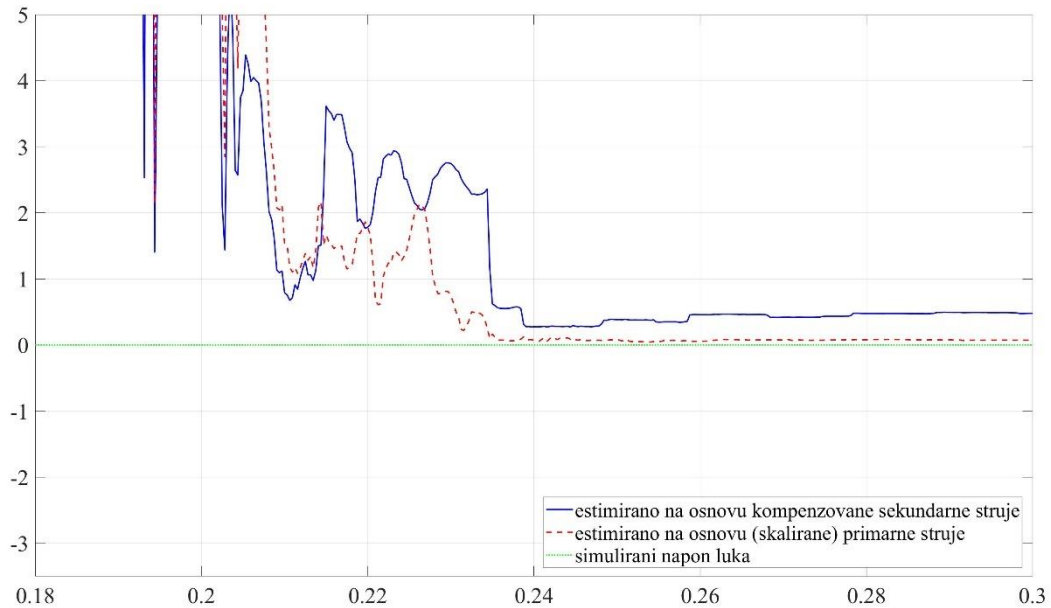
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



Slika 57  $\cos \phi=0.9$  - kvar bez luka: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 58  $\cos \phi=0.9$  - kvar bez luka: efektivna vrednost struje



Slika 59  $\cos \phi=0.9$  - kvar bez luka: napon luka

U Tabeli 2 dat je pregled dobijenih rezultata u pogledu tačnosti algoritma:

Tabela 2 Uticaj tipa opterećenja strujnog transformatora na tačnost algoritma

Cos $\phi$ opterećenja ST	Prolazan kvar (kvar preko luka)	Greška [%]	
		Osnovni harmonik struje kvara	Napon luka
0.8	Da	0.44	0.11
	Ne	0.07	/
0.9	Da	0.04	5.75
	Ne	0.88	/

Sprovedena analiza pokazuje da tip opterećenja strujnog transformatora nema značajnijeg uticaja na tačnost algoritma. Bez obzira na induktivno opterećenje, greška pri estimaciji efektivne vrednosti osnovnog harmonika struje ne prevazilazi 0.9%, dok greška u estimaciji napona luka ne prelazi 5.75%.

Može se konstatovati da bez obzira na tip opterećenja strujnog transformatora, algoritam omogućava uspešnu kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora i nedvosmislenu identifikaciju prirode kvara.

### 5.3.3 Analiza uticaja remanentnog fluksa

Remanentni (zaostali) fluks u jezgru strujnog transformatora može se negativno odraziti na performanse strujnog transformatora za zaštitu. Pre svega, zaostali fluks povećava verovatnoću da će strujni transformator ući u zasićenje u slučaju nastanka kratkog spoja u mreži. Takođe, zaostali fluks se negativno odražava u pogledu greške koju strujni transformator unosi u uslovima bez zasićenja.

Pomenuti efekat u pogledu greške u uslovima bez zasićenja u najvećem broju slučajeva ima zanemariv uticaj. S druge strane, činjenica da remanentni fluks može dovesti do bržeg zasićenja strujnog transformatora može se veoma nepovoljno odraziti na rad relejne zaštite.

Remanentni fluks obično nastaje nakon isključenja struje kvara. Njegova vrednost zavisi od nekoliko faktora [63]:

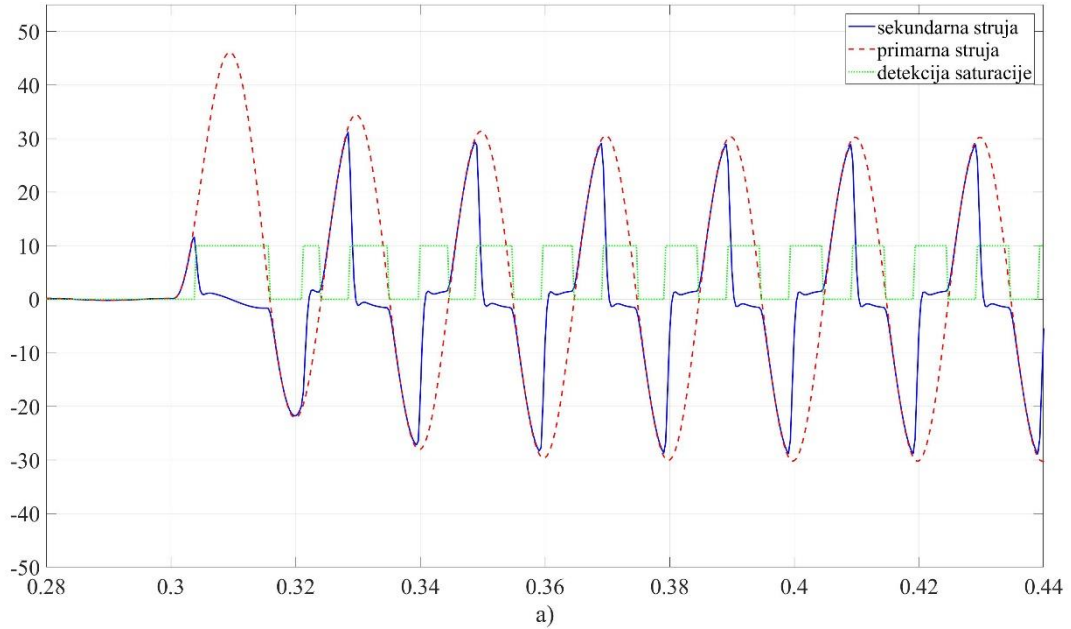
- magnitude struje kvara – veća struja kvara obično dovodi do većeg zaostalog (remanentnog) fluksa,
- faktora snage opterećenja priključenog na sekundar strujnog transformatora – najveći zaostali (remanentni) fluks obično nastaje u slučaju čisto rezistivnog otpora,
- prisustva jednosmerne komponente struje kvara – ukoliko struja kvara sadrži jednosmernu komponentu, dolazi do značajnog porasta fluksa unutar jezgra ST, što za posledicu ima povećanje zaostalog (remanentnog) fluksa.

Kao što je već rečeno, konstruisanje strujnog transformatora na način da remanentni fluks ne može dovesti do zasićenja, u pojedinim slučajevima nije praktično i ekonomski opravdano.

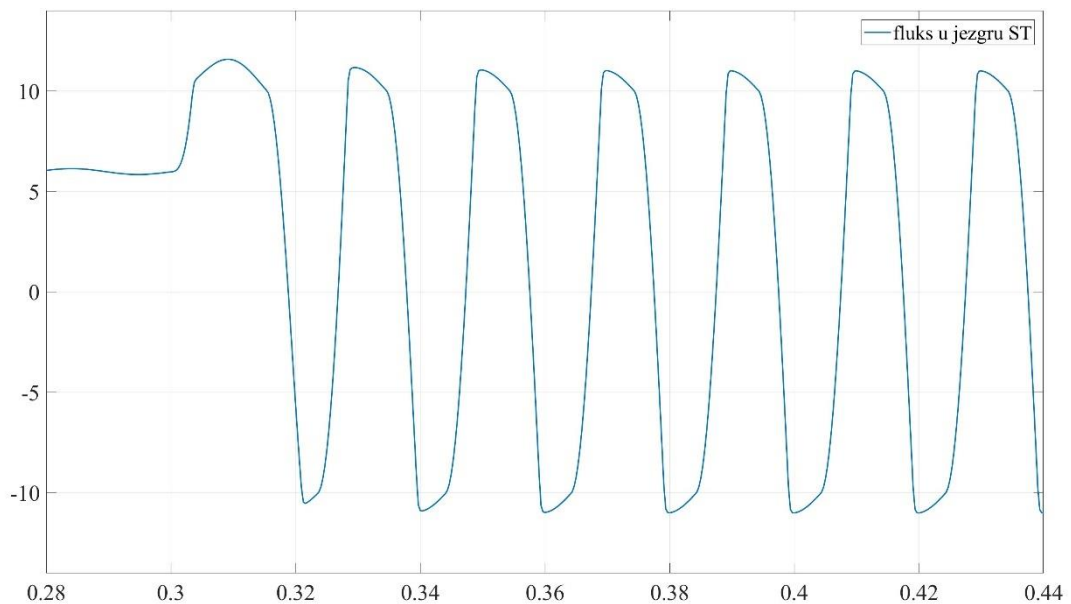
Imajući u vidu značaj remanentnog fluksa na performanse strujnog transformatora, neophodno je testirati njegov uticaj na rad prikazanog algoritma. Kako bi se simuliralo prisustvo remanentnog fluksa u strujnom transformatoru, neophodno je koristiti histerezisnu krivu umesto linearne karakteristike magnećenja. Histerezisna kriva odabrana je tako da vrednost remanentnog fluksa iznosi približno 60 %, 70 % i 80 % u odnosu na fluks u kolenu karakteristike magnećenja (vrednost fluksa nakon koje nastupa zasićenje strujnog transformatora). Najpre je simuliran kvar i njegovo isključenje, što za posledicu ima zaostajanje fluksa u jezgru strujnog transformatora. Zatim je kvar ponovo simuliran kako bi se analizirao rad algoritma i uticaj remanentnog fluksa.

**Remanentni fluks: 60 % u odnosu na fluks u kolenu krive magnećenja**

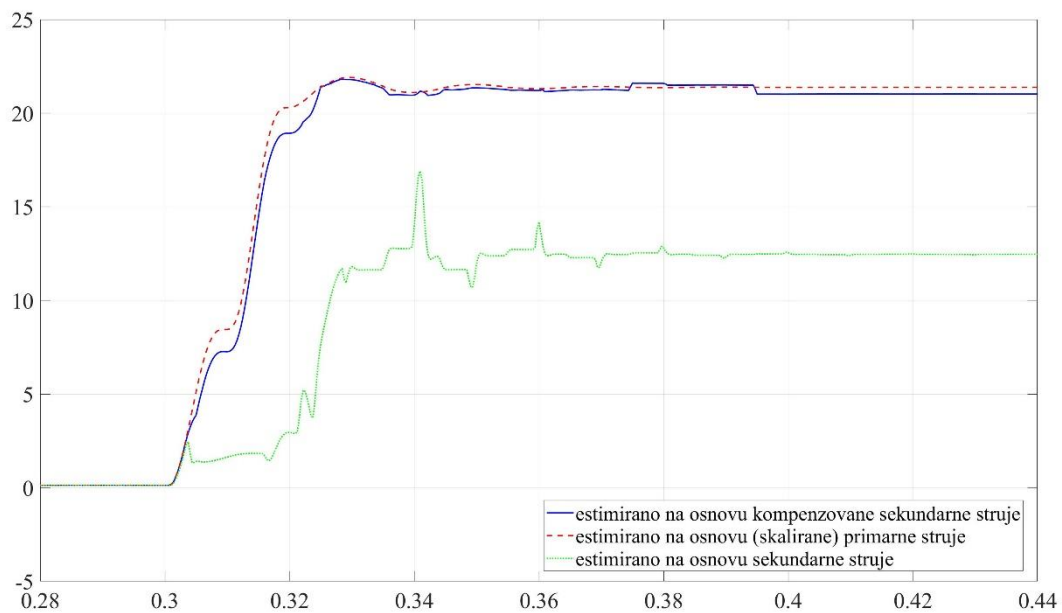
**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**



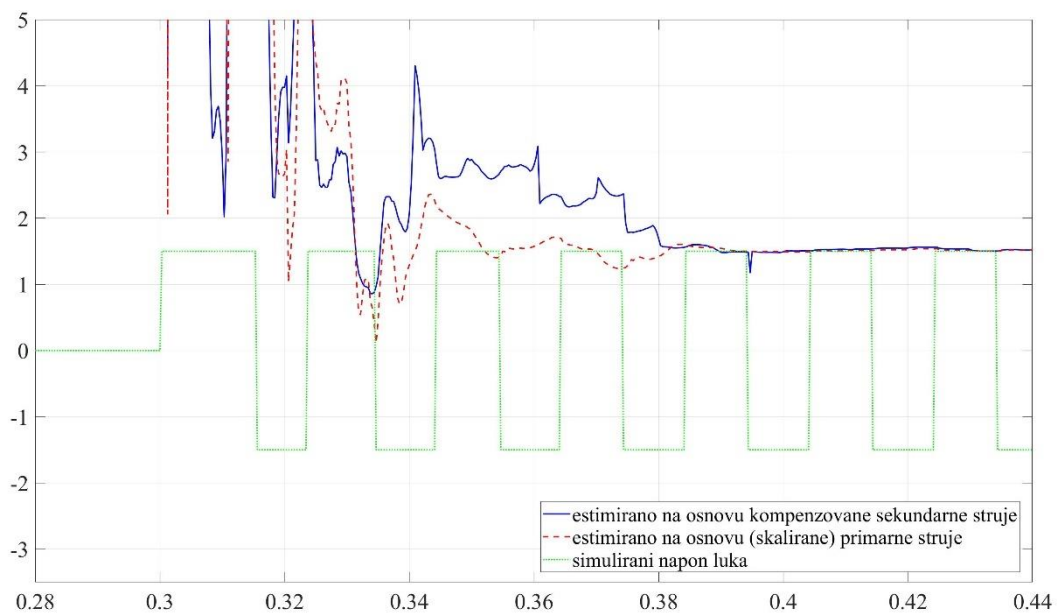
Slika 60 Remanentni fluks=60 % - kvar sa lukom: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 61 Remanentni fluks=60 % - kvar sa lukom: fluks u jezgru strujnog transformatora



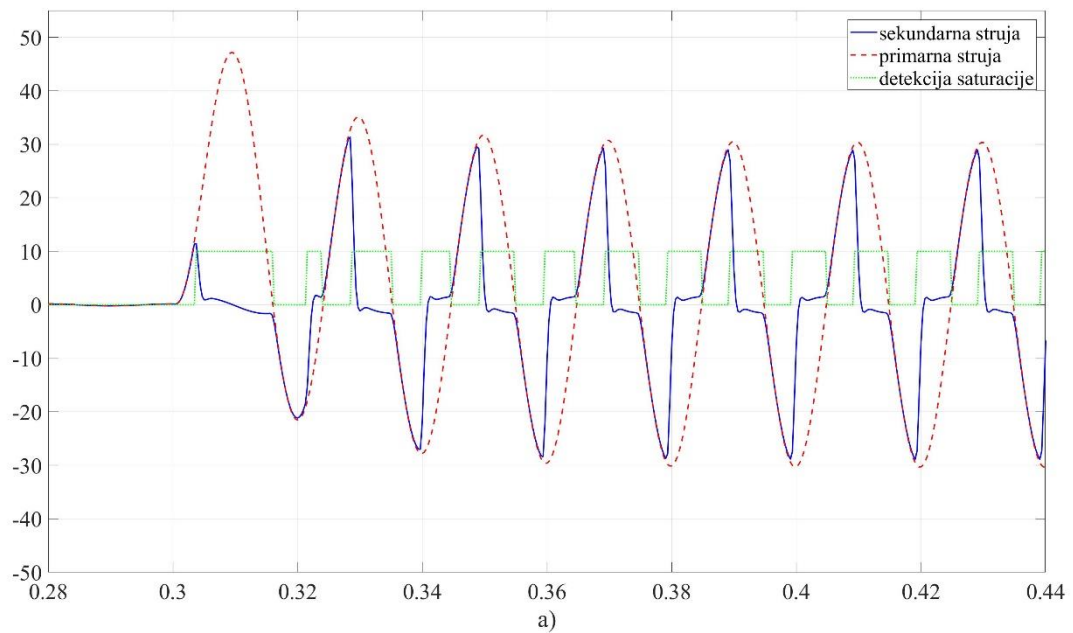
Slika 62 Remanentni fluks=60 % - kvar sa lukom: efektivna vrednost struje



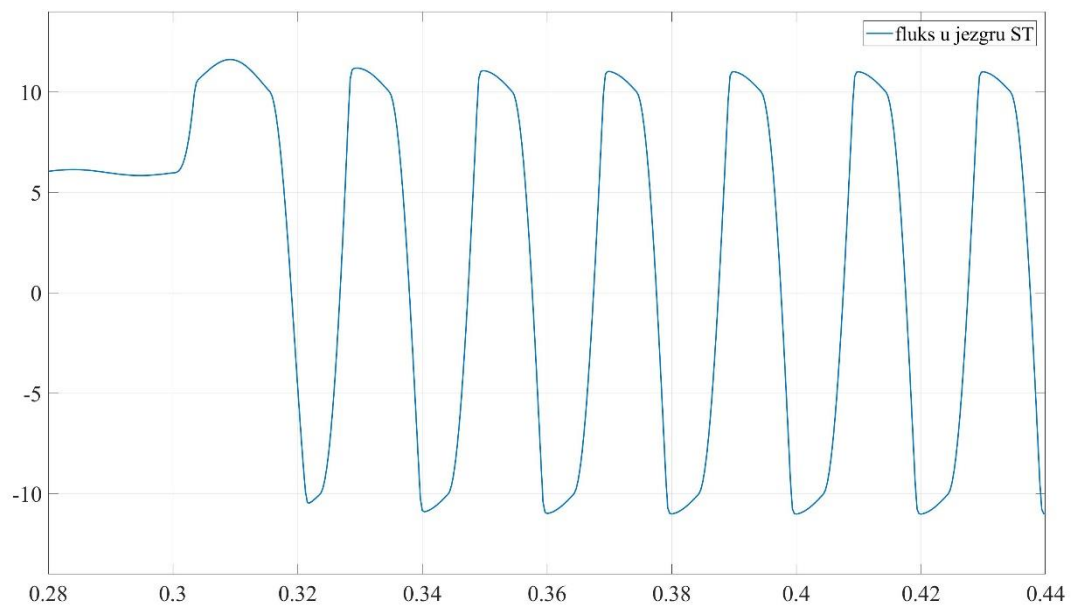
Slika 63 Remanentni fluks=60 % - kvar sa lukom: napon luka



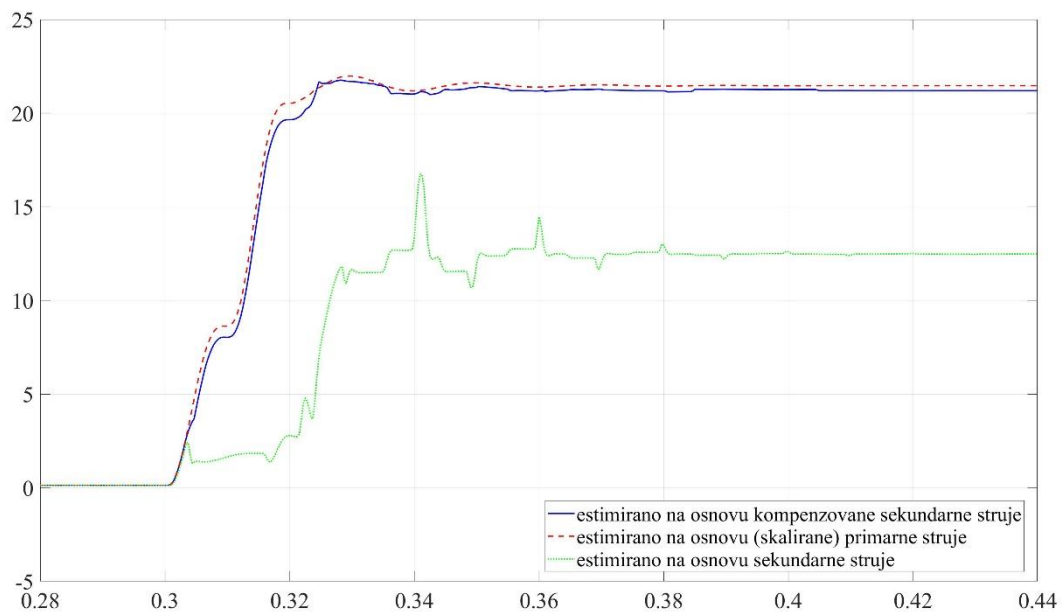
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



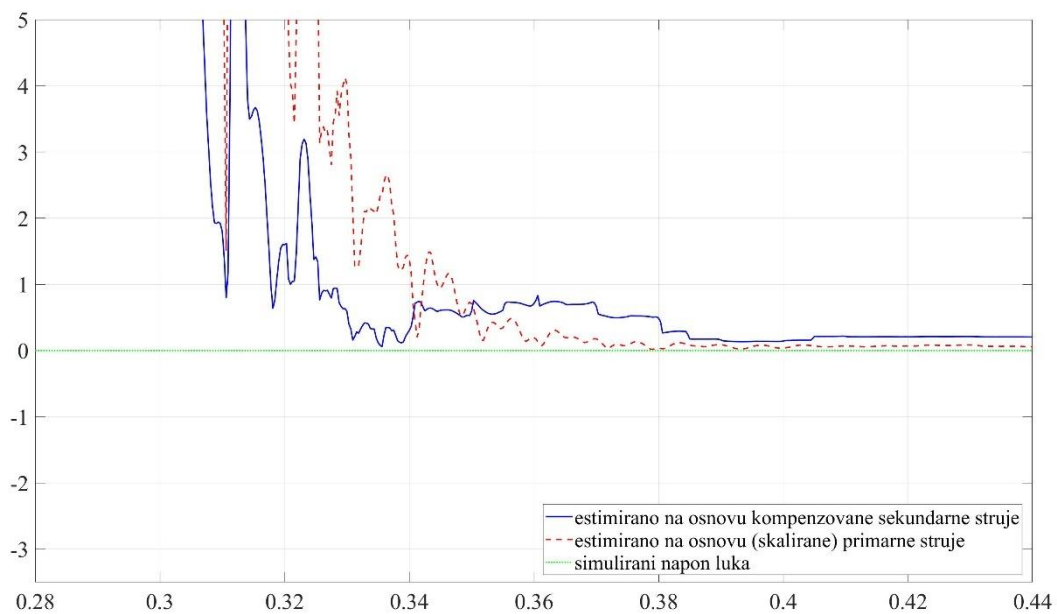
Slika 64 Remanentni fluks=60 % - kvar bez luka: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 65 Remanentni fluks=60 % - kvar bez luka: fluks u jezgru strujnog transformatora



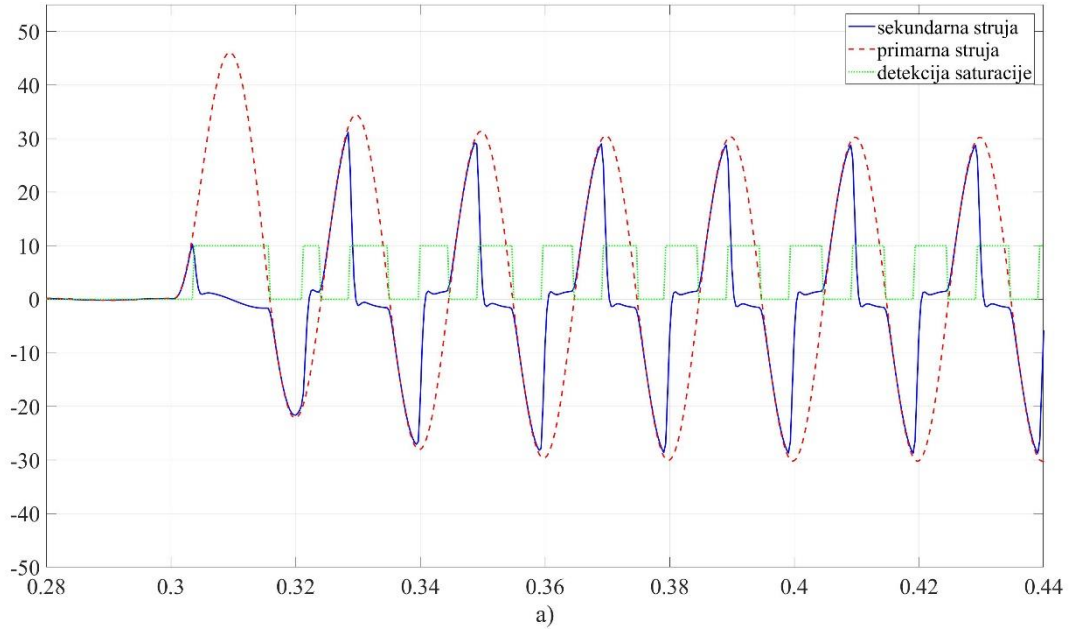
Slika 66 Remanentni fluks=60 % - kvar bez luka: efektivna vrednost struje



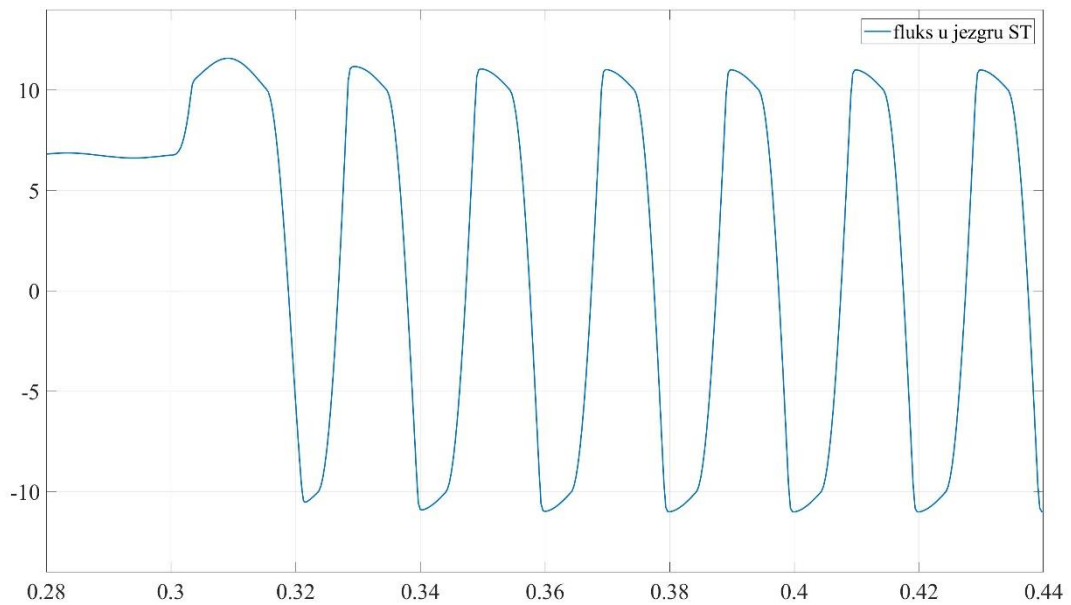
Slika 67 Remanentni fluks=60 % - kvar bez luka: napon luka

**Remanentni fluks: 70 % u donosu na fluks u kolenu krive magnećenja**

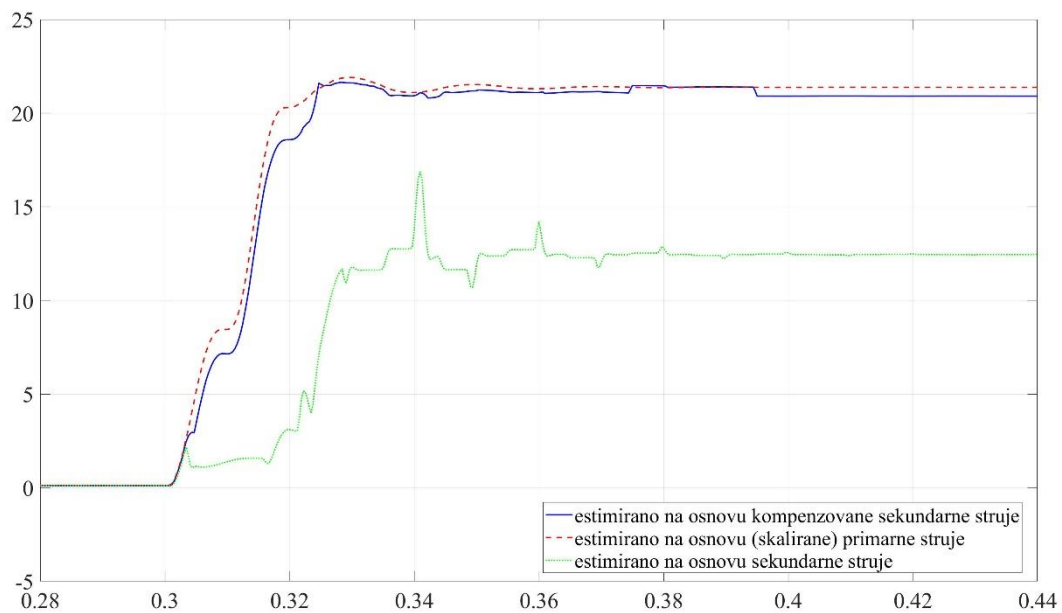
**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**



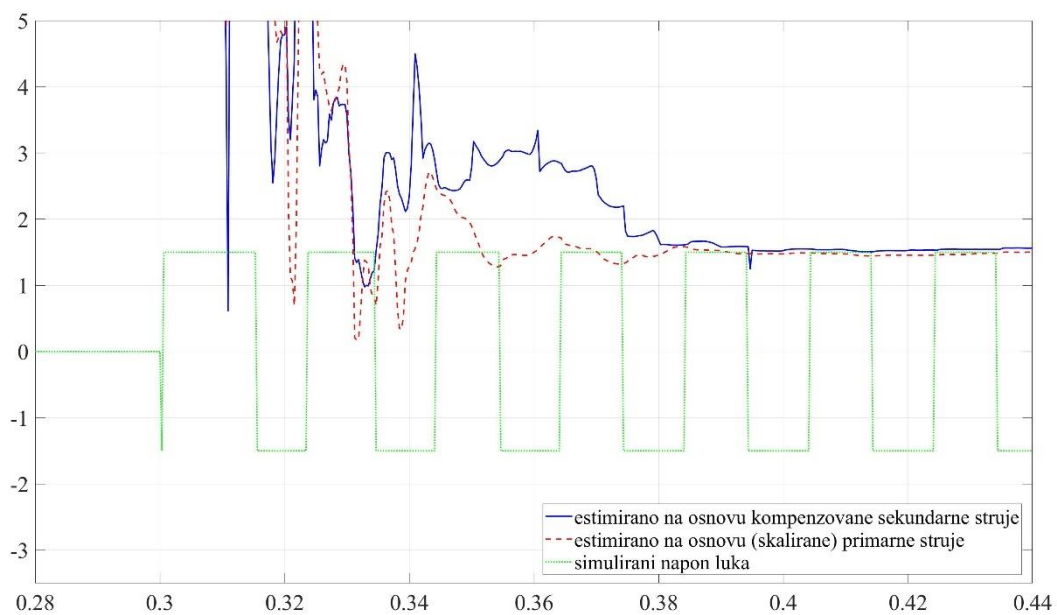
Slika 68 Remanentni fluks=70 % - kvar sa lukom: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 69 Remanentni fluks=70 % - kvar sa lukom: fluks u jezgru strujnog transformatora

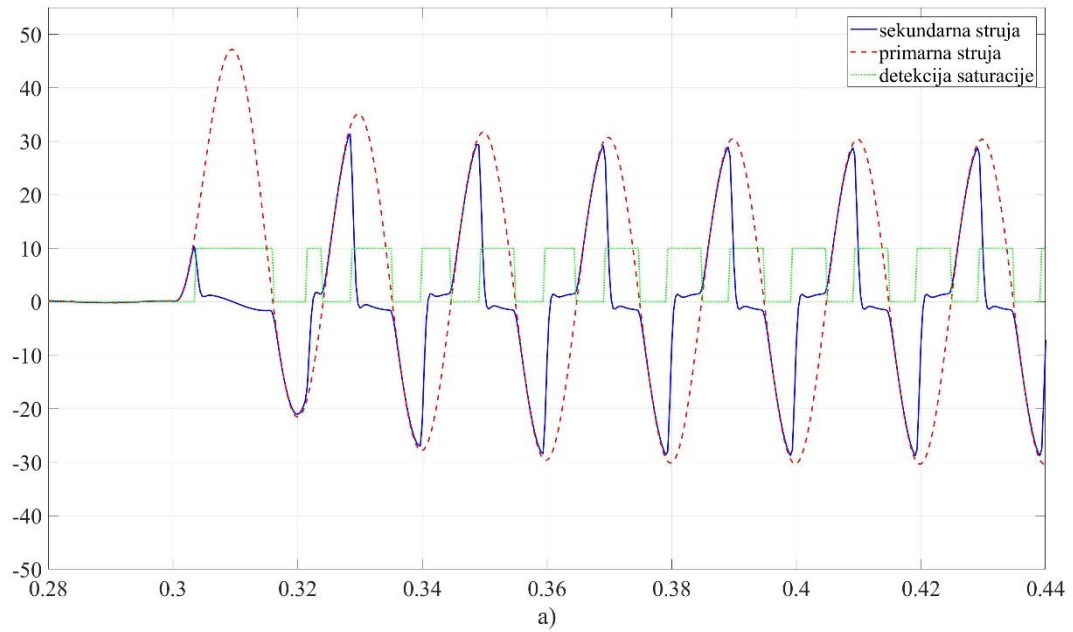


Slika 70 Remanentni fluks=70 % - kvar sa lukom: efektivna vrednost struje

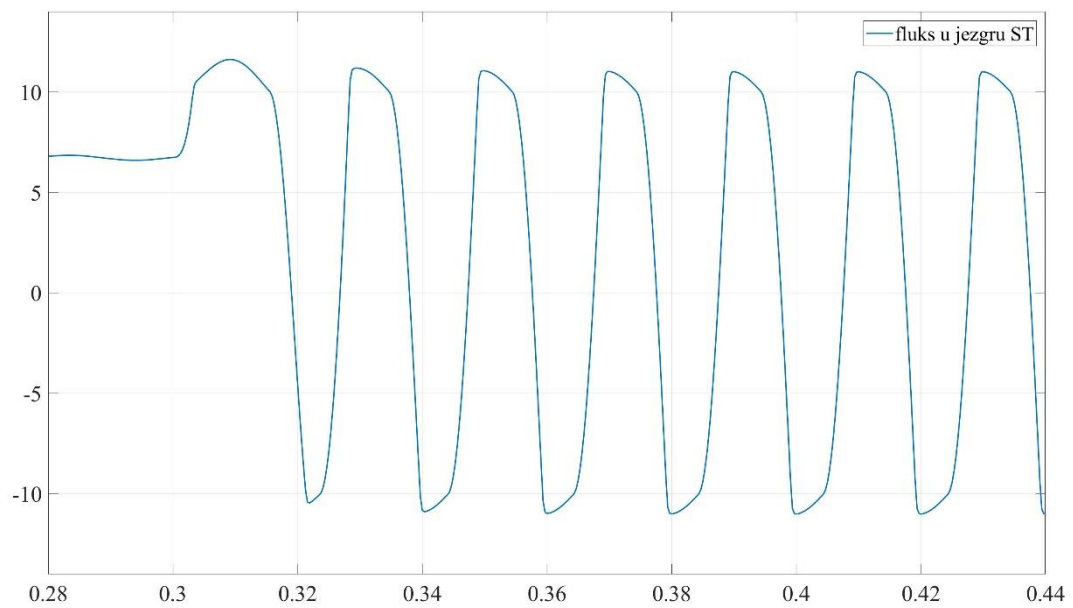


Slika 71 Remanentni fluks=70 % - kvar sa lukom: napon luka

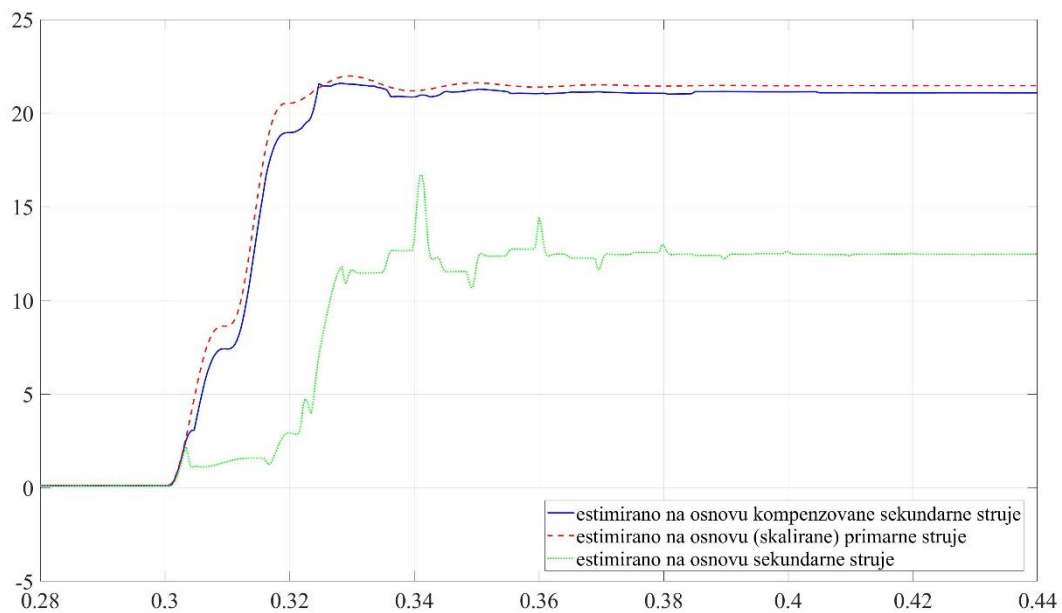
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



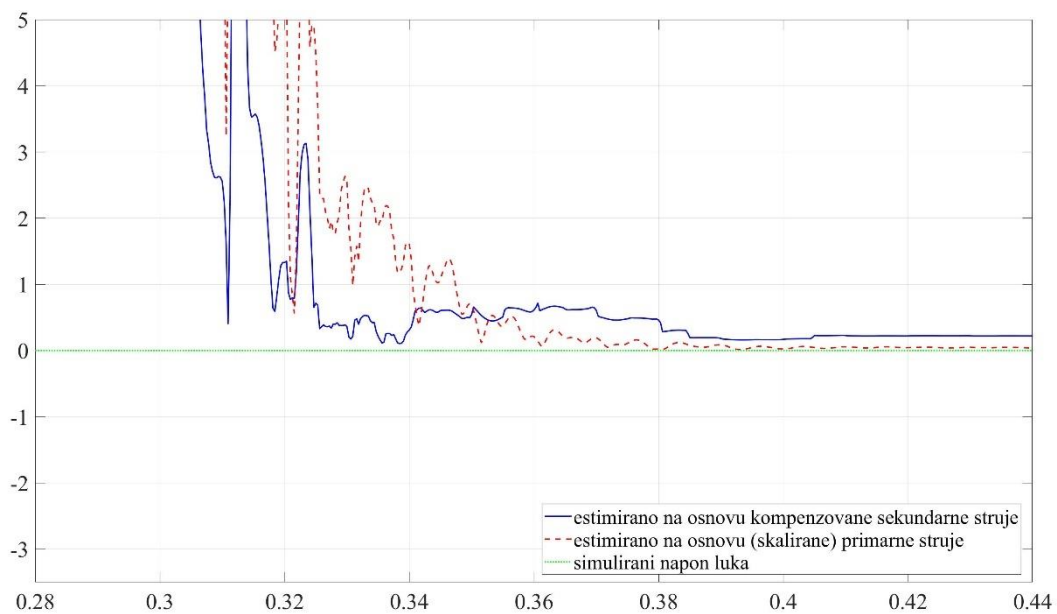
Slika 72 Remanentni fluks=70 % - kvar bez luka: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 73 Remanentni fluks=70 % - kvar bez luka: fluks u jezgru strujnog transformatora



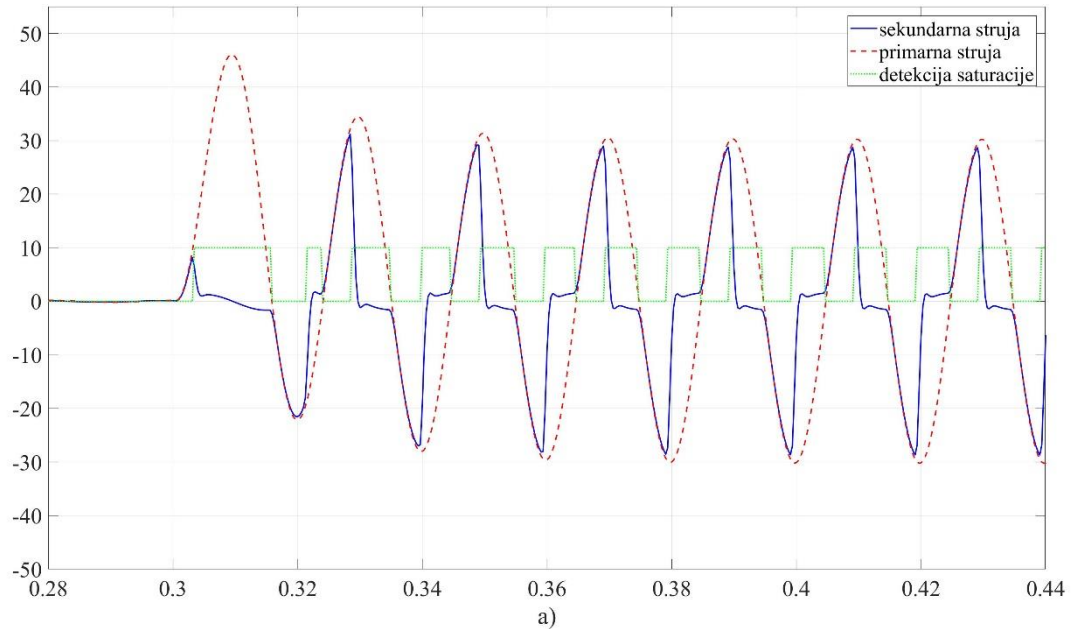
Slika 74 Remanentni fluks=70 % - kvar bez luka: efektivna vrednost struje



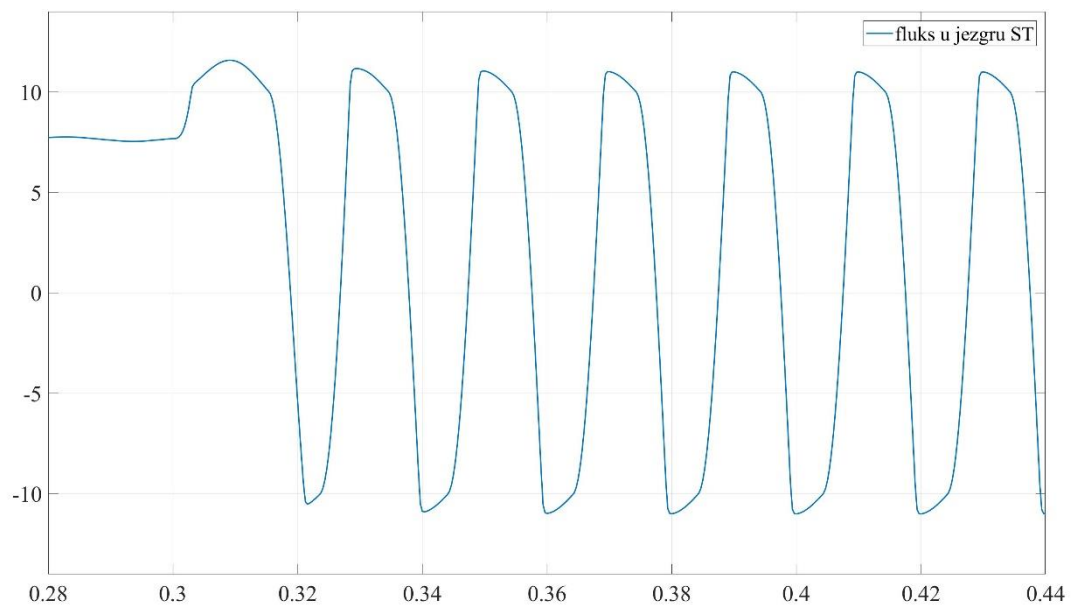
Slika 75 Remanentni fluks=70 % - kvar bez luka: napon luka

**Remanentni fluks: 80 % u donosu na fluks u kolenu krive magnećenja**

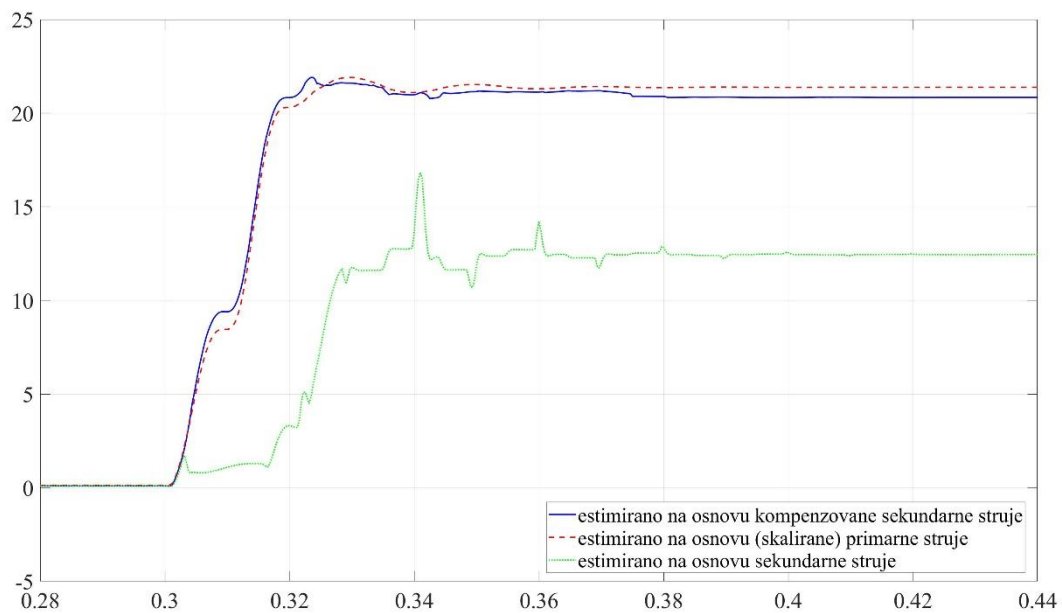
**Kvar sa električnim lukom (prolazni kvar)**



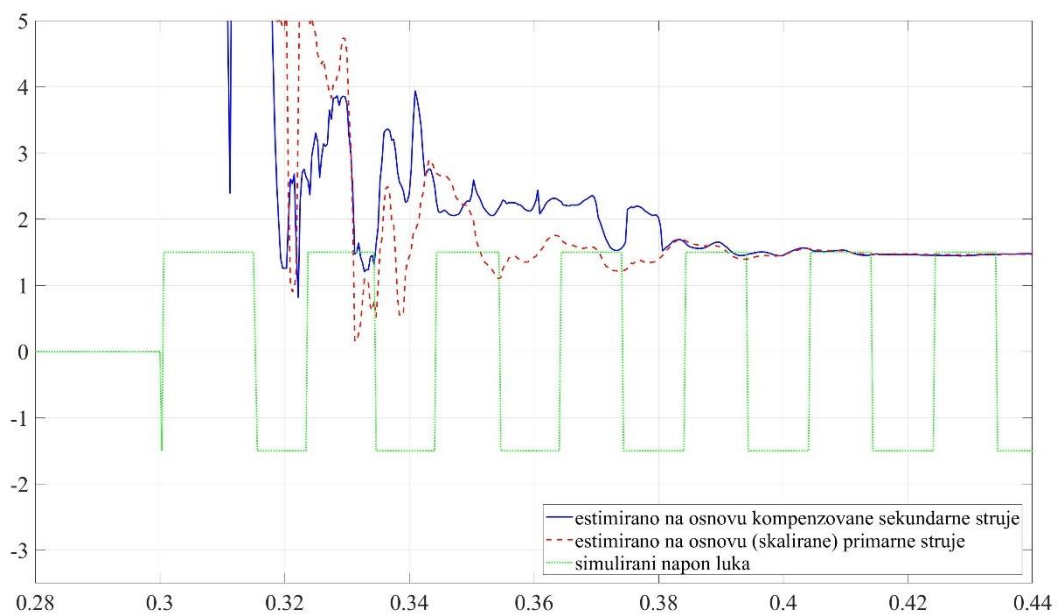
Slika 76 Remanentni fluks=80 % - kvar sa lukom: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 77 Remanentni fluks=80 % - kvar sa lukom: fluks u jezgru strujnog transformatora



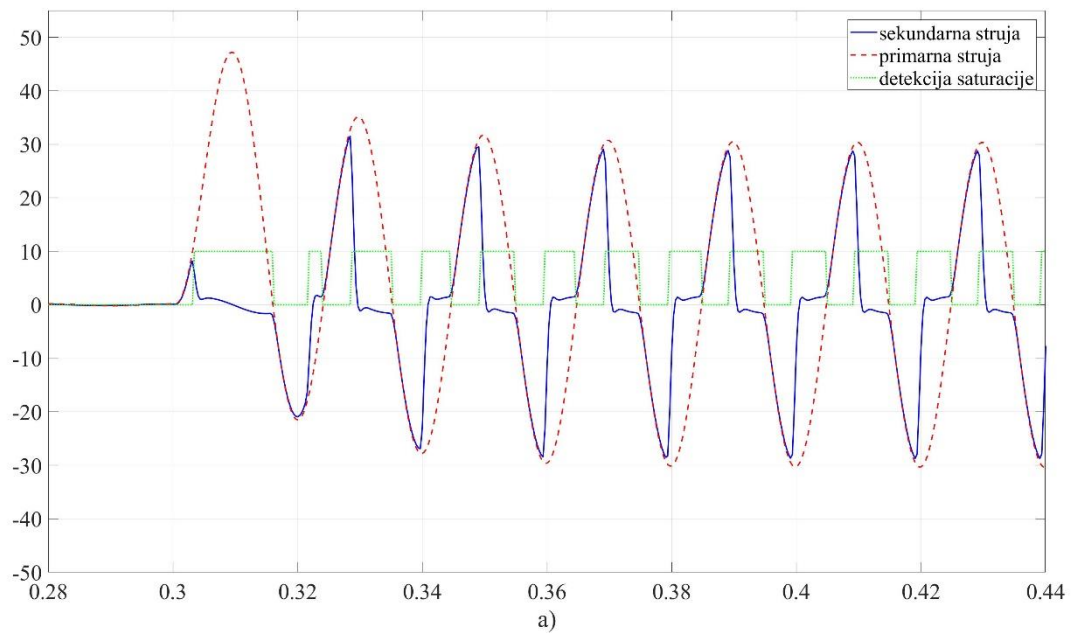
Slika 78 Remanentni fluks=80 % - kvar sa lukom: efektivna vrednost struje



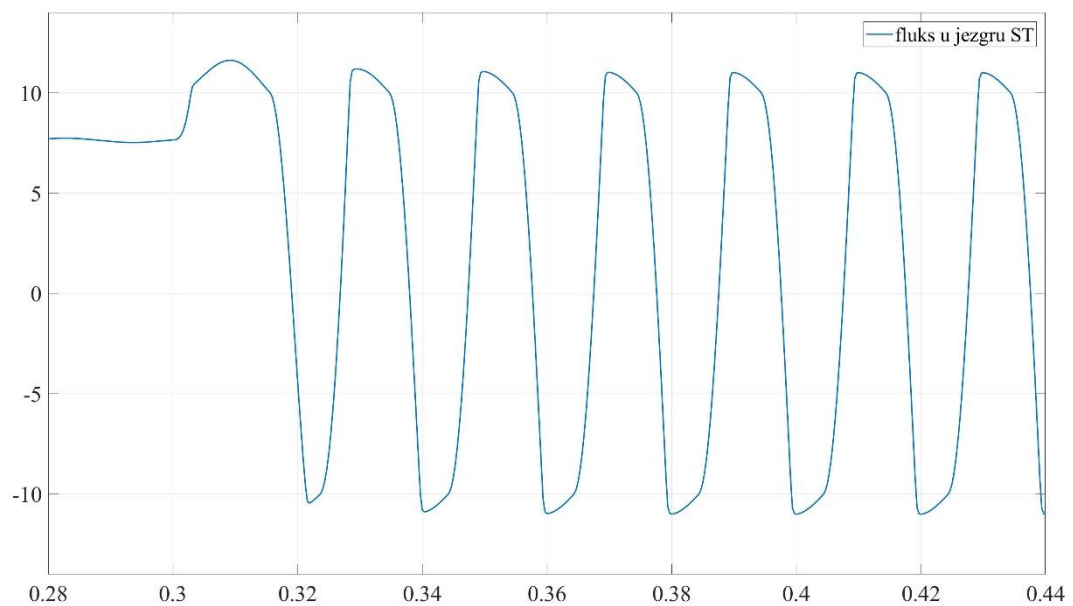
Slika 79 Remanentni fluks=80 % - kvar sa lukom: napon luka



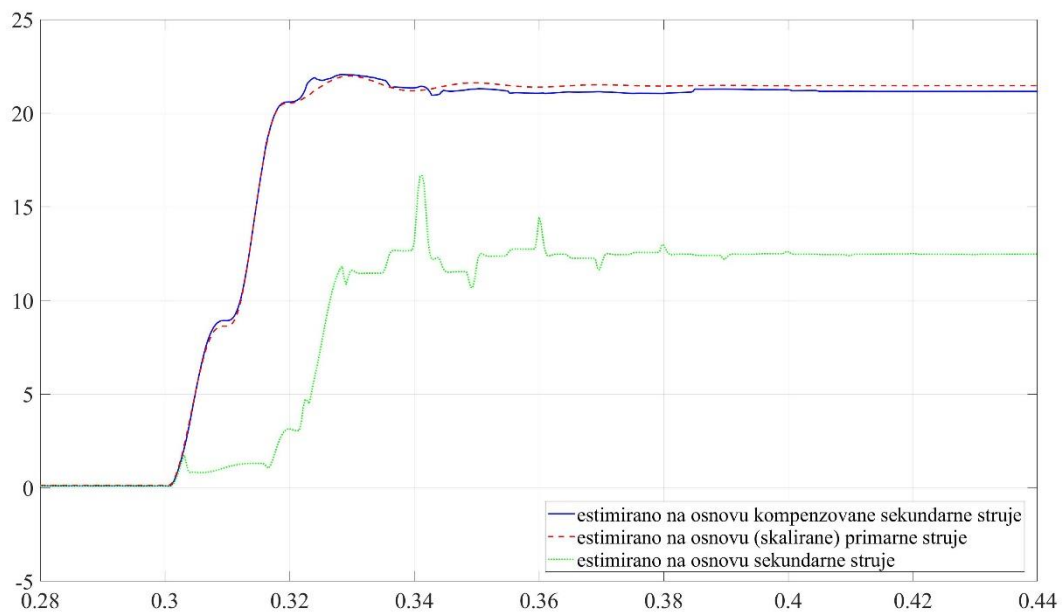
**Kvar bez električnog luka (trajni kvar)**



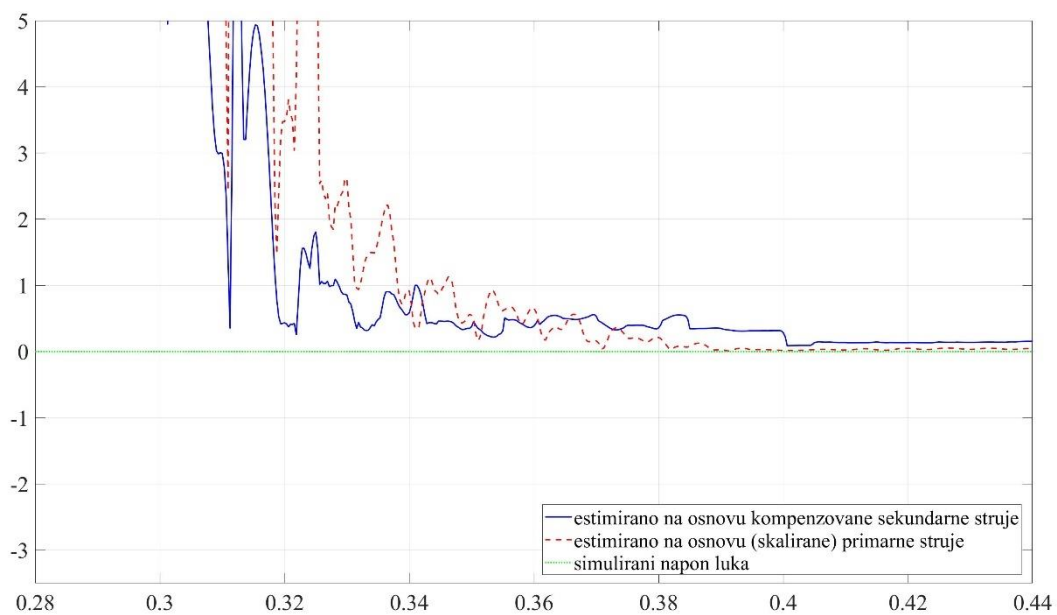
Slika 80 Remanentni fluks=80 % - kvar bez luka: struja primara, struja sekundara i detekcija zasićenja



Slika 81 Remanentni fluks=80 % - kvar bez luka: fluks u jezgru strujnog transformatora



Slika 82 Remanentni fluks=80 % - kvar bez luka: efektivna vrednost struje



Slika 83 Remanentni fluks=80 % - kvar bez luka: napon luka

U Tabeli 3 dat je pregled dobijenih rezultata u pogledu tačnosti algoritma:

Tabela 3 Uticaj remanentnog fluksa u jezgru strujnog transformatora na tačnost algoritma

Remanentni fluks (% u odnosu na koleno karakteristike magnećenja)	Prolazan kvar (kvar preko luka)	Greška [%]	
		Osnovni harmonik struje kvara	Napon luka
60	Da	1.86	5,51
	Ne	1.46	/
70	Da	2.22	6.42
	Ne	2.01	/
80	Da	2.55	2.21
	Ne	1.96	/

Sprovedena analiza pokazuje da prisustvo remanentnog fluksa u strujnom transformatoru nema značajnijeg uticaja na tačnost algoritma. U svim razmatranim slučajevima (remanentni fluks 60%, 70% i 80% u odnosu na fluks u kolenu karakteristike magnećenja), greška pri estimaciji efektivne vrednosti osnovnog harmonika struje ne prevazilazi 2.55%, dok greška u estimaciji napona luka ne prelazi 6.42%.

Može se konstatovati da bez obzira na prisustvo remanentnog fluksa, algoritam omogućava uspešnu kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora i nedvosmisleni identifikaciju prirode kvara.

## 6. Predloženi algoritam za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima

### 6.1 Izvođenje algoritma

U Poglavlju 4 izvršen je pregled postojećih algoritama iz oblasti detekcije električnog luka na nadzemnim vodovima. Može se zaključiti da većina postojećih algoritama za svoj rad, pored naponskih signala zahteva i strujne signale. Ovakav pristup, u slučaju zasićenja strujnog transformatora ne može omogućiti uspešnu detekciju električnog luka.

U ovom poglavlju predstavljen je novi algoritam za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima [14]. Algoritam se zasniva na korišćenju isključivo naponskih signala.

#### 6.1.1 Početna razmatranja

Kao i kod većine drugih algoritama iz oblasti detekcije električnog luka na nadzemnim vodovima, polazna pretpostavka jeste da se napon luka može predstaviti kao pravougaona četvrtka u fazi sa strujom luka:

$$v_l(t) = V_l \cdot \text{sgn}[i_k(t)] \quad (6.1)$$

U prethodnoj relaciji, sa  $V_l$  označen je napon pravougaone četvrtke,  $v_l$  je napon električnog luka,  $i(t)$  je struja luka (struja kvara),  $\text{sgn}$  – signum funkcija ( $\text{sgn}(x)=1, x>0$ ;  $\text{sgn}(x)=-1, x<0$ ).

Izraz za osnovni harmonik napona luka, koji se može dobiti primenom diskretne Furijeove transformacije na signal  $v_l$ , dat je relacijom (6.2):

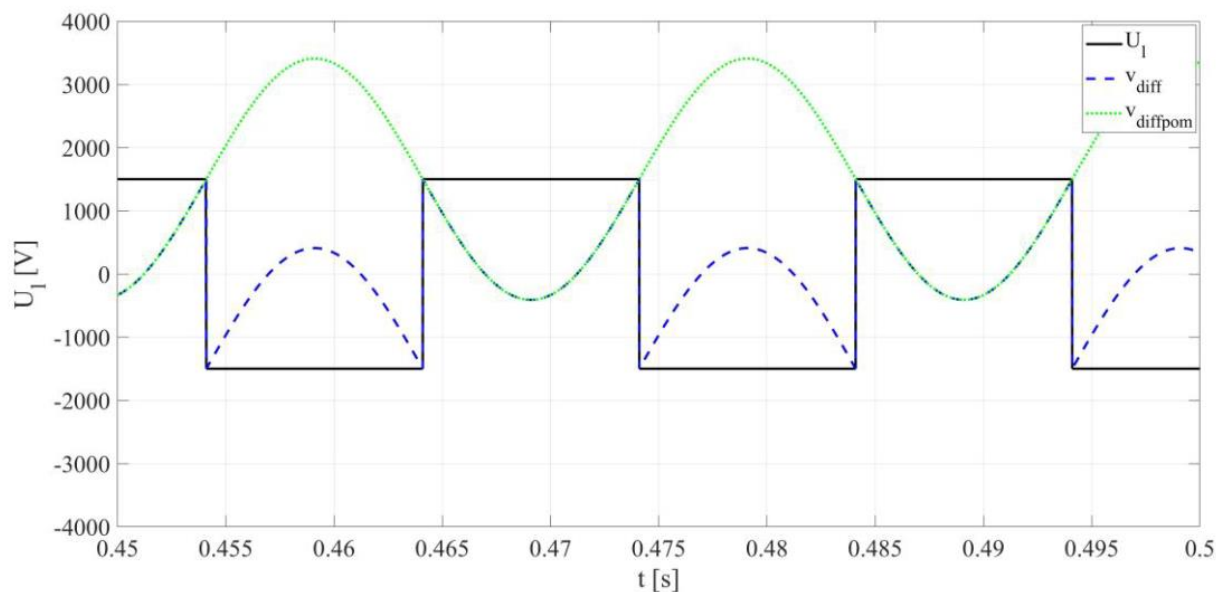
$$v_{l1}(t) = \frac{4}{\pi} \cdot V_l \cdot \sin(\omega t) \quad (6.2)$$

Kada se od napona luka oduzme njegov osnovni harmonik dolazi se do signala definisanog relacijom (6.3):

$$v_{diff}(t) = V_l \cdot \text{sgn}[i_k(t)] - \frac{4}{\pi} \cdot V_l \cdot \sin(\omega t) \quad (6.3)$$

Na ovom mestu, potrebno je na trenutak zamisliti da je za estimaciju napona pravougaone četvrtke ( $V_l$ ) na raspolaganju isključivo signal  $v_{diff}$ . U kasnijem tekstu biće objašnjen razlog uvođenja ovakve pretpostavke.

Jedan od načina da se na osnovu signala  $v_{diff}$  dođe do napona električnog luka, jeste formiranje pomoćnog signala  $v_{diffpom}$  (Slika 84).



Slika 84 Pomoćni signal  $v_{diffpom}$

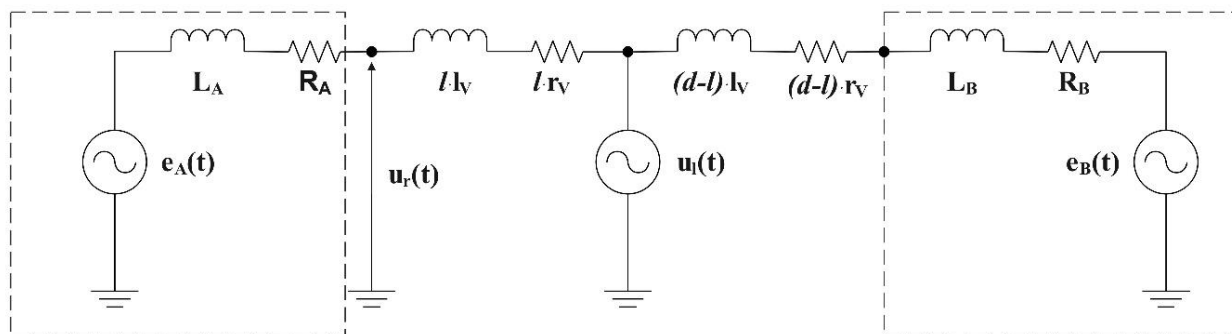
Signal  $v_{diffpom}$  dobijen je “podizanjem” signala  $v_{diff}$  u intervalima kada je napon luka negativan (način formiranja ovog signala takođe će biti elaboriran u narednim poglavljima).

Nakon formiranja signala  $v_{diffpom}$  jednostavno se može doći do napona pravougaone četvrtke. Naime, signal  $v_{diffpom}$  predstavlja zbir osnovnog harmonika napona luka (6.2) i napona pravougaone četvrtke (tj. vrednosti  $V_l$ ).

Primenom diskretne Furijeove transformacije na signal  $v_{diffpom}$  može se doći do efektivne vrednosti koja odgovara naponu pravougaone četvrtke ( $V_l$ ), pomnoženom sa koeficijentom  $k=4/\pi$  (u skladu sa relacijom (6.2)).

### 6.1.2 Preliminarna estimacija napona luka

Na Slici 85 prikazan je dvostrano napajani vod na kome je došlo do kvara preko električnog luka:



Slika 85 Ekvivalentna šema voda u kvaru (kvar sa električnim lukom)

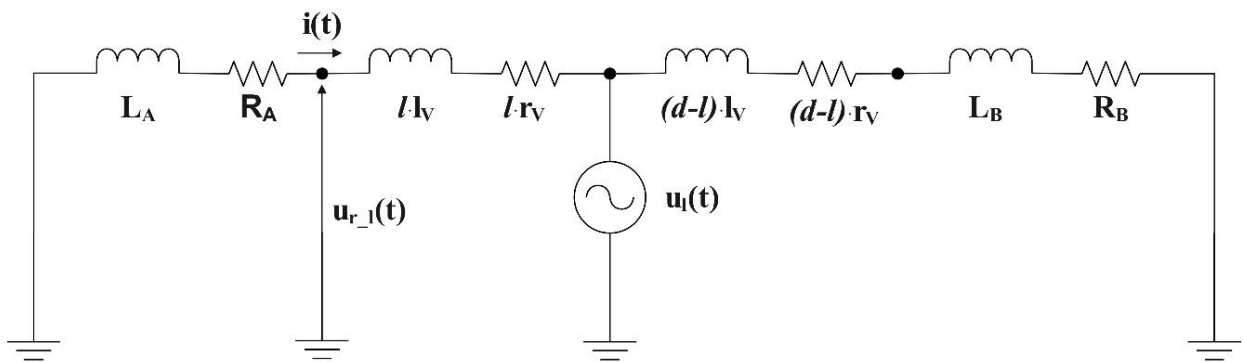
Oznake na slici imaju sledeće značenje:

- $L_A, R_A$  – induktivnost i aktivna otpornost Tevenenovog ekvivalenta mreže sa leve strane voda,
- $L_B, R_B$  – induktivnost i aktivna otpornost Tevenenovog ekvivalenta mreže sa desne strane voda,
- $e_A$  – napon Tevenenovog ekvivalenta mreže sa leve strane voda,
- $e_B$  – napon Tevenenovog ekvivalenta mreže sa desne strane voda,
- $u_l$  – napon električnog luka,
- $u_r$  – mereni napon (signal koji se prosleđuje releju),
- $l_v, r_v$  – podužna induktivnost i aktivna otpornost voda,
- $l$  – lokacija kvara, tj. rastojanje od početka voda (mesta releja) do mesta kvara,
- $d$  – dužina voda.

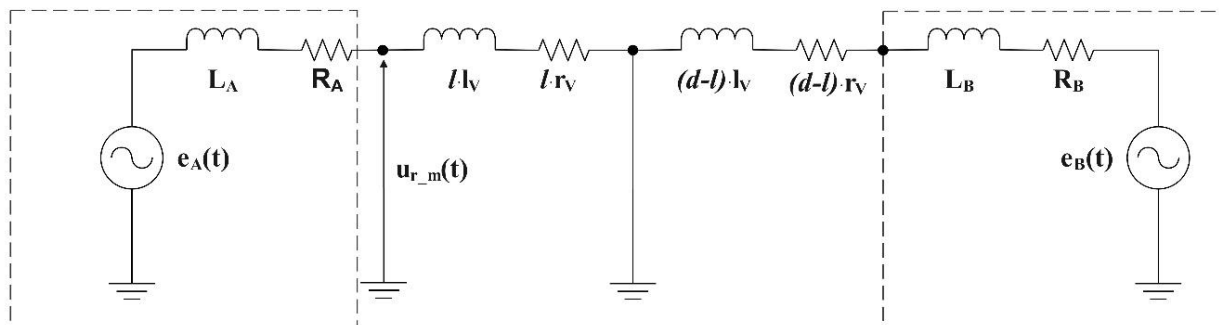
Analizom električnog kola prikazanog na Slici 85, mogu se uočiti tri naponska izvora: napon Tevenenovog ekvivalenta mreže sa leve i desne strane voda i napon električnog luka. Napon na mestu releja ( $u_r$ ) nastaje kao posledica delovanja ova tri naponska izvora.

Prikazani algoritam namenjen je za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima prenosne mreže. Imajući ovo u vidu može se usvojiti pretpostavka da su naponi Tevenenovog ekvivalenta mreže (sa leve i desne strane voda) prostoperiodične veličine, tj. mogu se zanemariti harmonijska izobličenja ovih napona. Prema tome, odstranjivanjem osnovnog harmonika od napona  $u_r$ , dolazi se do signala koji potiče isključivo od električnog luka. Daljom obradom tako dobijenog signala, dolazi se do napona električnog luka.

Primenom principa superpozicije, električno kolo prikazano na Slici 85, može se razložiti na električno kolo sa Slike 86 i električno kolo sa Slike 87.



Slika 86 Princip superpozicije – uticaj napona luka



Slika 87 Princip superpozicije – uticaj napona mreže

Napon  $u_{r_m}$  je napon na mestu releja koji potiče isključivo od aktivnih mreža sa leve i desne strane voda. Ovaj napon je prostoperiodičan.

Napon  $u_{r_l}$  je napon na mestu releja koji potiče isključivo od električnog luka. Kako bi se došlo do matematičkog izraza za napon  $u_{r_l}$ , polazi se najpre od izraza za napon električnog luka:

$$u_l(t) = \begin{cases} V_l, t \in (0, \frac{T}{2}) \\ -V_l, t \in (\frac{T}{2}, T) \end{cases} \quad (6.4)$$

U prethodnoj relaciji sa  $T$  je označen interval jedne osnovne periode. Pretpostavljeno je da je napon luka pozitivan u prvoj polovini periode, a da je negativan u drugoj polovini periode.

Za kolo sa Slike 86, može se postaviti sledeća diferencijalna jednačina:

$$i(t) \cdot R_e + \frac{di(t)}{dt} \cdot L_e = u_l(t) \quad (6.5)$$

Oznake  $R_e$  i  $L_e$  iz prethodne relacije, definisane su sledećim izrazima (ostale veličine predstavljene su na Slici 86):

$$R_e = R_A + r_V \cdot l \quad (6.6)$$

$$L_e = L_A + l_V \cdot l \quad (6.7)$$

Relacija (6.5) može se u Laplasovom domenu prikazati izrazima (6.8) i (6.9):

$$L_e \cdot s \cdot I(s) - L_e \cdot I_{01} + R_e \cdot I(s) = \frac{V_l}{s}, t \in (0, \frac{T}{2}) \quad (6.8)$$

$$L_e \cdot s \cdot I(s) - L_e \cdot I_{02} + R_e \cdot I(s) = -\frac{V_l}{s}, t \in (\frac{T}{2}, T) \quad (6.9)$$

Sređivanjem relacija (6.8) i (6.9), dobijaju se sledeći izrazi:

$$I(s) = \frac{V_l}{R_e} \cdot \frac{1}{s} - \frac{V_l}{R_e} \cdot \frac{1}{\frac{R_e}{L_e} + s} + I_{01} \cdot \frac{1}{\frac{R_e}{L_e} + s}, t \in (0, \frac{T}{2}) \quad (6.10)$$

$$I(s) = -\frac{V_l}{R_e} \cdot \frac{1}{s} + \frac{V_l}{R_e} \cdot \frac{1}{\frac{R_e}{L_e} + s} + I_{02} \cdot \frac{1}{\frac{R_e}{L_e} + s}, t \in (\frac{T}{2}, T) \quad (6.11)$$

Ponovnim povratkom u vremenski domen, dolazi se do izraza za struju  $i(t)$  u kolu sa Slike 86:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{V_l}{R_e} - \frac{V_l}{R_e} \cdot e^{-\frac{R_e}{L_e} t} + I_{01} \cdot e^{-\frac{R_e}{L_e} t}, & t \in (0, \frac{T}{2}) \\ -\frac{V_l}{R_e} + \frac{V_l}{R_e} \cdot e^{-\frac{R_e}{L_e} (t - \frac{T}{2})} + I_{02} \cdot e^{-\frac{R_e}{L_e} (t - \frac{T}{2})}, & t \in (\frac{T}{2}, T) \end{cases} \quad (6.12)$$

Velicine  $I_{01}$  i  $I_{02}$ , jednostavno se mogu odrediti na osnovu sledećih početnih uslova:

$$i(T/2^-) = i(T/2^+) \quad (6.13)$$

$$i(0^+) = -i(T/2^+) \quad (6.14)$$

Primenom relacija (6.13) i (6.14) dobija se da važi:

$$I_{01} = -\frac{V_l}{R_e} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{R_e}{L_e} \frac{T}{2}}}{1 + e^{-\frac{R_e}{L_e} \frac{T}{2}}} \quad (6.15)$$

$$I_{02} = \frac{V_l}{R_e} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{R_e}{L_e} \frac{T}{2}}}{1 + e^{-\frac{R_e}{L_e} \frac{T}{2}}} \quad (6.16)$$

Sada se napon  $u_{r\_l}$  može izraziti sledećim izrazom:

$$u_{r\_l}(t) = \begin{cases} A + B \cdot e^{-Ct}, & t \in (0, \frac{T}{2}) \\ -A - B \cdot e^{-C(t - \frac{T}{2})}, & t \in (\frac{T}{2}, T) \end{cases} \quad (6.17)$$

U prethodnoj relaciji oznake imaju sledeće značenje:

$$A = V_l \cdot \frac{R_A}{R_e} \quad (6.18)$$

$$B = V_l \cdot \left( \frac{L_A}{L_e} - \frac{R_A}{R_e} \right) \cdot \left( 1 + \frac{1 - e^{-\frac{R_e}{L_e} \frac{T}{2}}}{1 + e^{-\frac{R_e}{L_e} \frac{T}{2}}} \right) \quad (6.19)$$

$$C = \frac{R_e}{L_e} \quad (6.20)$$

Na ovom mestu potrebno je povući paralelu između napona električnog luka  $u_l$  (6.1) i napona na mestu releja koji potiče isključivo od električnog luka  $u_{r\_l}$  (6.17). Talasni oblik ova dva signala razlikuje se usled eksponencijalne komponente u izrazu (6.17) koja nastaje kao posledica izobličenja koje unosi  $R$ - $L$  kolo sačinjeno od induktivnosti i otpornosti mreže i nadzemnog voda.

Oduzimanjem osnovnog harmonika, od napona merenog na mestu releja, odstranjuje se uticaj mreže, odnosno signal  $u_{r\_m}$ . Međutim, pored toga odstranjuje se i osnovni harmonik napona  $u_{r\_l}$ .

Signal koji se dobija kada se od merenog napona na mestu releja odstrani njegov osnovni harmonik ( $u_{diff}$ ) posledica je isključivo električnog luka. Ova signal matematički se može izraziti na sledeći način:



$$u_{diff}(t) = u_r(t) - u_{r1}(t) = u_{r-l}(t) - u_{r-l1}(t) \quad (6.21)$$

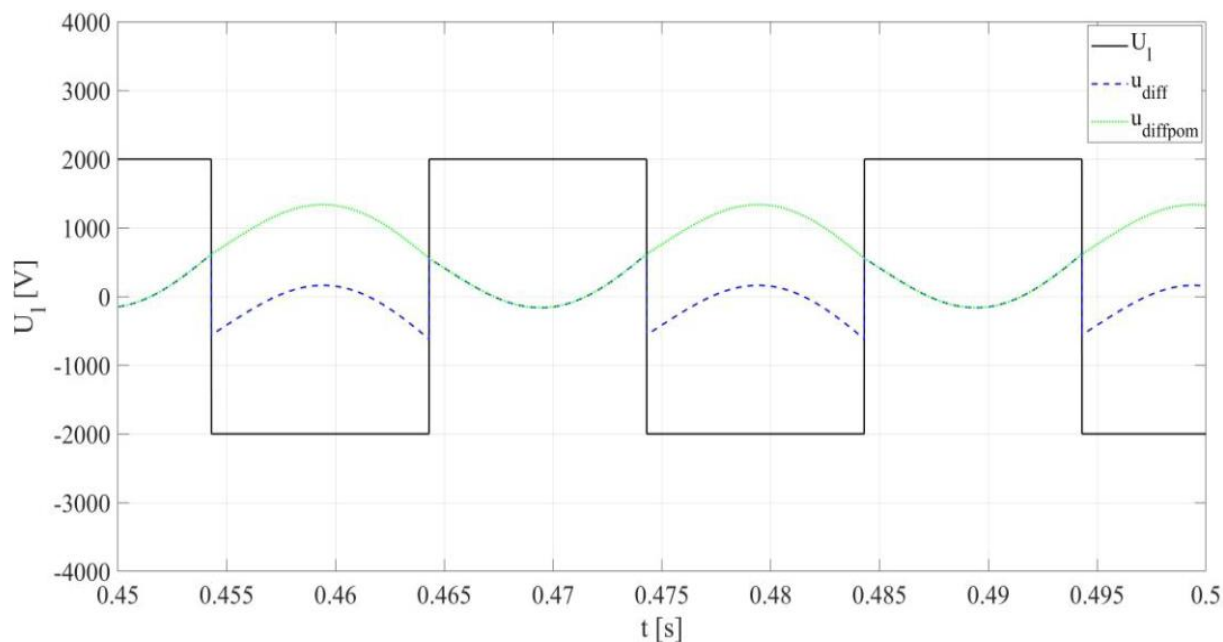
$$u_{diff}(t) = \begin{cases} A + B \cdot e^{-C \cdot t} - a_1 \cdot \cos(\omega t) - b_1 \cdot \sin(\omega t), t \in (0, \frac{T}{2}) \\ -A - B \cdot e^{-C \cdot (t - \frac{T}{2})} + a_1 \cdot \cos(\omega(t - \frac{T}{2})) + b_1 \cdot \sin(\omega(t - \frac{T}{2})), t \in (\frac{T}{2}, T) \end{cases} \quad (6.22)$$

gde je:

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T u_{r-l}(t) \cdot \cos(\omega t) dt = \frac{4}{T} \cdot \frac{B \cdot C}{C^2 + B^2} \cdot (1 + e^{-C \cdot T/2}) \quad (6.23)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T u_{r-l}(t) \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{8 \cdot A}{T \cdot \omega} + \frac{4}{T} \cdot \frac{B \cdot \omega}{C^2 + B^2} \cdot (1 + e^{-C \cdot T/2}) \quad (6.24)$$

Sada je pogodno postaviti paralelu između signala  $v_{diff}$  (6.3) i signala  $u_{diff}$  (6.22). Iako je izraz (6.22) daleko složeniji usled izobličenja koje unosi  $R-L$  kolo, može se uočiti da su talasni oblici ova dva signala veoma slični (Slika 84 i Slika 88).



Slika 88 Pomoćni signal  $u_{diffpom}$

Po analogiji sa signalom  $v_{diffpom}$ , potrebno je formirati signal  $u_{diffpom}$ . Signal  $u_{diffpom}$  dobija se “podizanjem” signala  $u_{diff}$  u intervalima kada je napon luka negativan (više o ovom postupku biće u nastavku).

Signal  $u_{diffpom}$  može se iskazati sledećom relacijom:

$$u_{diffpom}(t) = \begin{cases} A + B \cdot e^{-C \cdot t} - a_1 \cdot \cos(\omega t) - b_1 \cdot \sin(\omega t), t \in (0, \frac{T}{2}) \\ A + B \cdot (1 + e^{-C \cdot \frac{T}{2}}) - B \cdot e^{-C \cdot (t - \frac{T}{2})} + a_1 \cdot \cos(\omega(t - \frac{T}{2})) + b_1 \cdot \sin(\omega(t - \frac{T}{2})), t \in (\frac{T}{2}, T) \end{cases} \quad (6.25)$$

Na kraju, potrebno je primeniti diskretnu Furijeovu transformaciju na signal  $u_{diffpom}$  kako bi se došlo do korelacije između fazorskog reprezentata signala  $u_{diffpom}$  i napona pravougaone četvrtke:

$$\underline{U}_{diffpom} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{L_A}{L_e} \cdot \underline{V}_l = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{L_A}{L_A + l \cdot l_v} \cdot \underline{V}_l \quad (6.26)$$

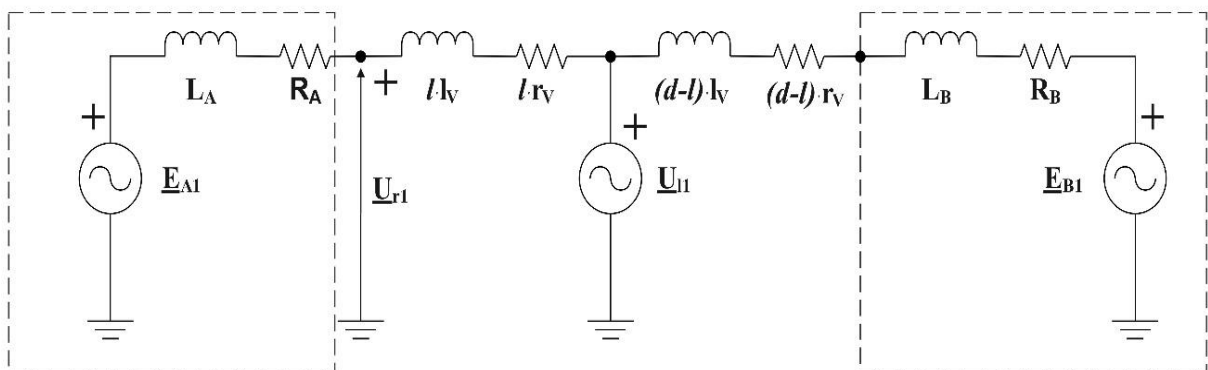
Analizom dobijene relacije može se zaključiti sledeće:

- Za estimaciju napona pravougaone četvrtke  $V_l$  potrebno je poznavati lokaciju kvara ( $l$ ).
- Za estimaciju napona pravougaone četvrtke  $V_l$  potrebno je poznavati parametre Thevenenovog ekvivalenta mreže ( $L_A$ ).

U narednom tekstu izložen je postupak za aproksimativno određivanje lokacije kvara  $l$ .

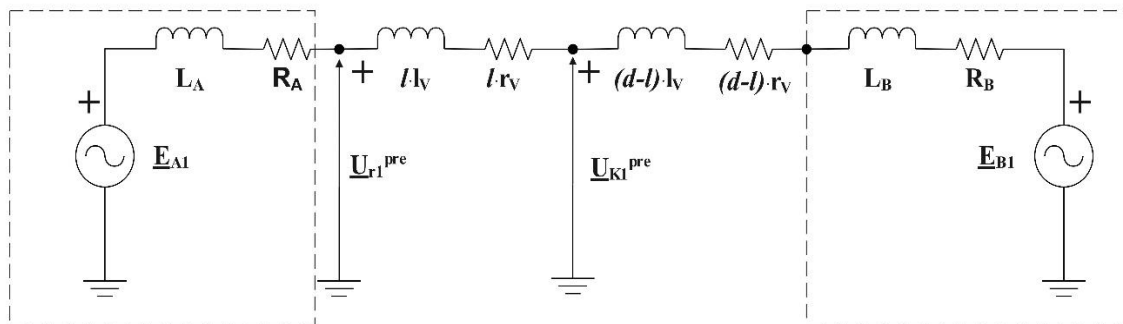
### 6.1.3 Aproksimativno određivanje lokacije kvara

Za potrebe aproksimativnog određivanja lokacije kvara, polazi se od kola na Slici 89. Oznake na Slici 89 imaju isto značenje kao i oznake na Slici 85, s tom razlikom da su na Slici 89 sve veličine predstavljene njihovim osnovno-harmoničnim komponentama (veličine na Slici 85 date su u vremenskom domenu).

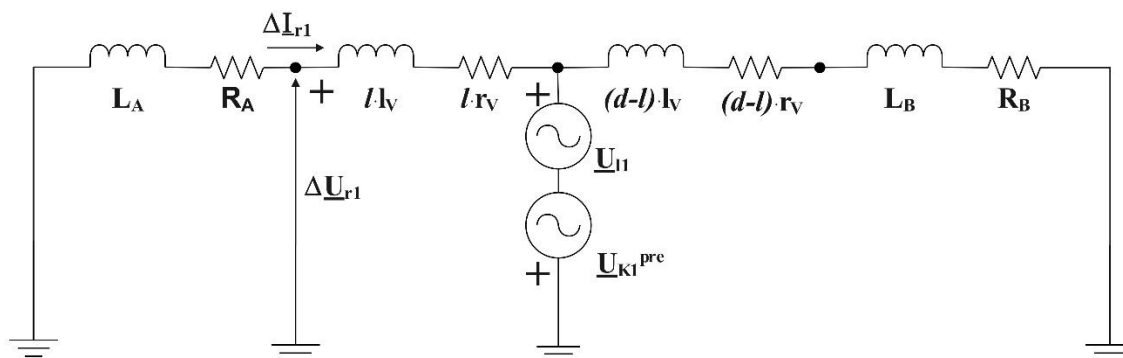


Slika 89 Ekvivalentna šema voda u kvaru (kvar sa električnim lukom) – analiza za osnovni harmonik

Ova slika se može razložiti na kolo sa Slike 90 (stanje pre kvara) i kolo sa Slike 91 (superponirano stanje kvara).



Slika 90 Princip superpozicije – stanje pre kvara



Slika 91 Princip superpozicije – superponirano stanje kvara

Za kolo sa Slike 90, može se postaviti sledeća relacija:

$$\underline{U}_{K1}^{pre} = \underline{U}_{r1}^{pre} - \underline{I}_1^{pre} \cdot l \cdot \underline{z}_{v1} \quad (6.27)$$

S druge strane, za kolo sa Slike 91, mogu se postaviti sledeće relacije:

$$\Delta \underline{U}_{r1} = \underline{U}_{l1} - \underline{U}_{K1}^{pre} + \Delta \underline{I}_1 \cdot l \cdot \underline{z}_{v1} \quad (6.28)$$

$$\Delta \underline{I}_1 = -\frac{\Delta \underline{U}_{r1}}{\underline{Z}_{A1}} = -\frac{\underline{U}_{r1} - \underline{U}_{r1}^{pre}}{\underline{Z}_{A1}} \quad (6.29)$$

Na osnovu relacija (6.26), (6.27), (6.28) i (6.29), dolazi se do sledećeg izraza:

$$(\underline{U}_{r1} - \underline{U}_{r1}^{pre}) + \frac{\underline{U}_{r1} - \underline{U}_{r1}^{pre}}{\underline{Z}_{A1}} \cdot l \cdot \underline{z}_{v1} + \underline{U}_{diffpom} \cdot (1 + l \cdot \frac{l_v}{L_A}) + \underline{U}_{r1}^{pre} - \underline{I}_1^{pre} \cdot l \cdot \underline{z}_{v1} = 0 \quad (6.30)$$

Na osnovu relacije (6.30) jednostavno se može izraziti lokacija kvara:

$$l = \frac{\underline{U}_{r1} - \underline{U}_{diffpom}}{(\underline{U}_{r1}^{pre} - \underline{U}_{r1}) \cdot \frac{\underline{z}_{v1}}{\underline{Z}_{A1}} + \underline{I}_1^{pre} \cdot \underline{z}_{v1} - \underline{U}_{diffpom} \cdot \frac{l_v}{L_A}} \quad (6.31)$$

## 6.1.4 Finalna estimacija napona luka

Kako bi se relacija (6.31) za određivanje lokacije kvara mogla primeniti u relaciji (6.26) za estimaciju napona luka (napona pravougaone četvrtke), uvode se određene aproksimacije:

- Pad napona koji izaziva radna struja (struja pre kvara) može se zanemariti:

$$\underline{I}_1^{pre} \cdot \underline{Z}_{w1} \approx 0 \quad (6.32)$$

- Osnovni harmonik napona na mestu releja dominantno zavisi od napona mreže. Posledično, može se usvojiti da važi:

$$\underline{U}_{r1} \gg \underline{U}_{diffpom} \quad (6.33)$$

- Aktivna otpornost Tevenenovog ekvivalenta mreže je mnogostruko manja od reaktanse Tevenenovog ekvivalenta mreže (algoritam namenjen za primenu u prenosnoj mreži gde je ovakva pretpostavka opravdana):

$$w \cdot L_A \gg R_A \quad (6.34)$$

Nakon uvođenja ovih aproksimacija, dolazi se do sledećeg izraza za procenu lokacije kvara:

$$l = w \cdot L_A \cdot \frac{\underline{U}_{R1}}{(\underline{U}_{R1}^{pre} - \underline{U}_{R1}) \cdot \underline{Z}_{w1}} \quad (6.35)$$

Potrebno je primetiti da u poslednjoj relaciji i dalje figurira induktivnost Tevenenovog ekvivalentna mreže ( $L_A$ ). Iz tog razloga, predstavljeni algoritam ne može se primeniti za estimaciju lokacije kvara.

Međutim, implementacijom relacije (6.35) u relaciju (6.26), dolazi do finalnog izraza za estimaciju napona pravougaone četvrtke u kome ne figurira pomenuti parametar Tevenenovog ekvivalenta mreže ( $L_A$ ):

$$\underline{V}_1 = \left(1 + \frac{\underline{U}_{r1}}{(\underline{U}_{r1}^{pre} - \underline{U}_{r1}) \cdot \underline{Z}_{w1}} \cdot w \cdot l_v\right) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \underline{U}_{diffpom} \quad (6.36)$$

Na osnovu relacije (6.36) može se zaključiti da je za estimaciju napona pravougaone četvrtke (koja reprezentuje napon luka) potrebno raspolagati sledećim veličinama:

- signal  $u_{diffpom}$  – dobija se na osnovu napona na mestu releja i njegovog osnovnog harmonika,
- osnovni harmonik napona na mestu releja za vreme kvara  $U_{r1}$ , i u periodu pre kvara  $U_{r1}^{pre}$ ,
- podužni parametri voda ( $l_v, r_v$ ).

## 6.1.5 Određivanje pomoćnog signala $u_{diffpom}$

U prethodnim izvođenjima pretpostavljeno je da je signal  $u_{diffpom}$  poznat. Kao što je rečeno ovaj signal dobija se “podizanjem” signala  $u_{diff}$  u intervalima kada je napon luka negativan, tako da u ovim intervalima signal predstavlja kontinualni nastavak signala iz intervala kada je napon luka pozitivan. Matematički se ovaj signal može definisati na sledeći način:

- Interval  $t_1-t_2$ :

$$u_{diffpom}(t) = u_{diff}(t) + u_{diff}(t_1) - u_{diff}(t_1 + T_{od}) \quad (6.37)$$

- Interval  $t_2-t_1$ :

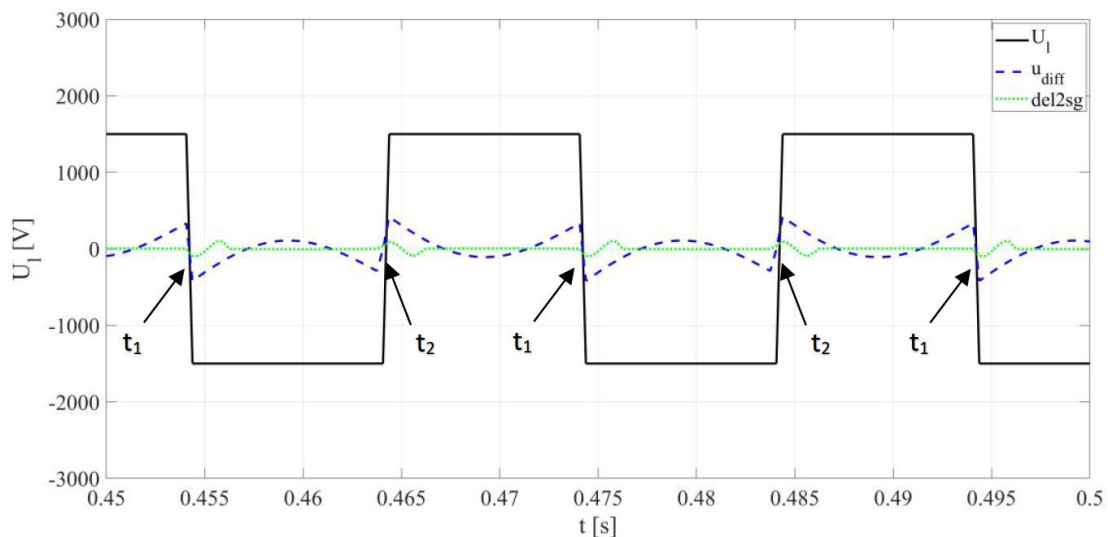
$$u_{diffpom}(t) = u_{diff}(t) \quad (6.38)$$

Sa  $t_1$  i  $t_2$  označeni su trenuci u kojima dolazi do skokovite promene signala  $u_{diff}$  (Slika 92), dok je sa  $T_{od}$  označen interval odabiranja.

Prema tome, određivanje signala  $u_{diffpom}$  svodi se na detektovanje trenutaka u kojima dolazi do skokovite promene signala  $u_{diff}$ , tj. određivanje trenutaka  $t_1$  i  $t_2$ . Kao kriterijumska funkcija za detektovanje ovih trenutaka može se primeniti Savitzky-Golay filter (polinom trećeg stepena i prozor dužine sedam odbiraka):

$$del2sg(n) = \{5 \cdot u_{diff}(n) - 3 \cdot u_{diff}(n-2) - 4 \cdot u_{diff}(n-3) - 3 \cdot u_{diff}(n-4) + 5 \cdot u_{diff}(n-6)\} / 42 \quad (6.39)$$

Promena signala definisanog relacijom (6.39) na Slici 92 označena je zelenom bojom. Poređenjem vrednosti ovog izraza sa unapred definisanim pragom, jednostavno se mogu odrediti trenuci skokovite promene signala  $u_{diff}$ , odnosno trenuci  $t_1$  i  $t_2$ .



Slika 92 Formiranje pomoćnog signala  $u_{diffpom}$

## 6.2 Testiranje algoritma pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink

Za potrebe testiranja predloženog algoritma korišćen je MATLAB/Simulink model koji je opisan u poglavlju 5.

Usvojene su sledeće polazne pretpostavke:

- lokacija kvara je na rastojanju od 50 km od početka voda,
- napon luka iznosi 1500 V,
- trenutak nastanka kvara je 0.245 s,
- otpornost rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba je zanemarena,
- impedansa mreže iznosi 7.54  $\Omega$ ,
- napon luka modelovan je kao pravougaona četvorka u fazi sa strujom luka.

Tokom testiranja algoritma, izvršeno je variranje gore navedenih polaznih pretpostavki u cilju analize uticaja na rad algoritma.

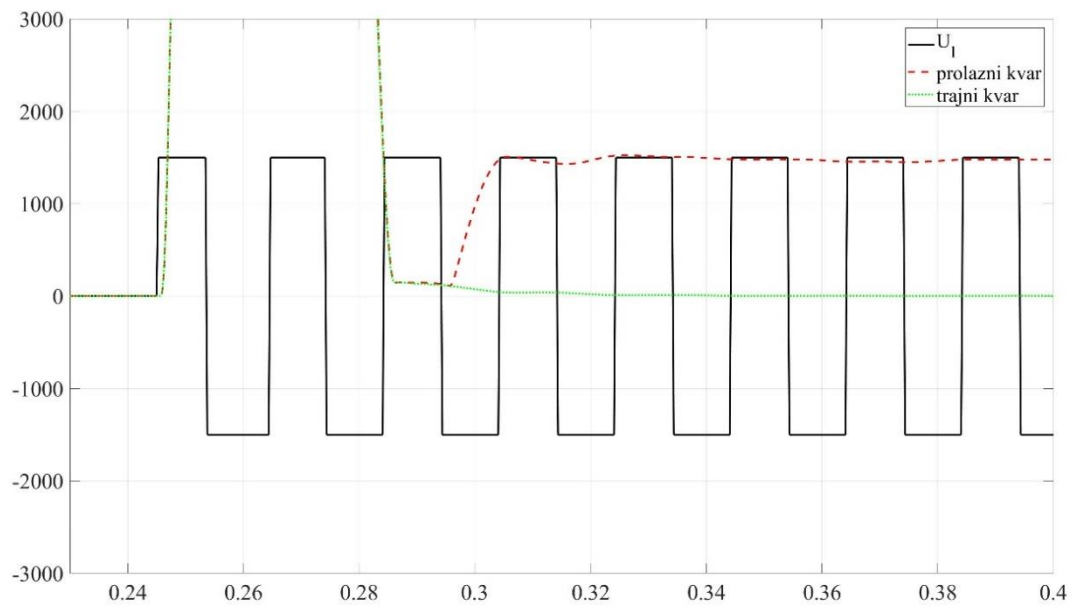
### 6.2.1 Analiza uticaja lokacije kvara

Prikazani algoritam polazi od pretpostavke da se napon električnog luka može estimirati na osnovu signala koji se dobija kao razlika merenog napona i njegovog osnovnog harmonika ( $u_{diff}$ ). Pomenuti signal u slučaju prolaznog kvara potiče isključivo od napona luka.

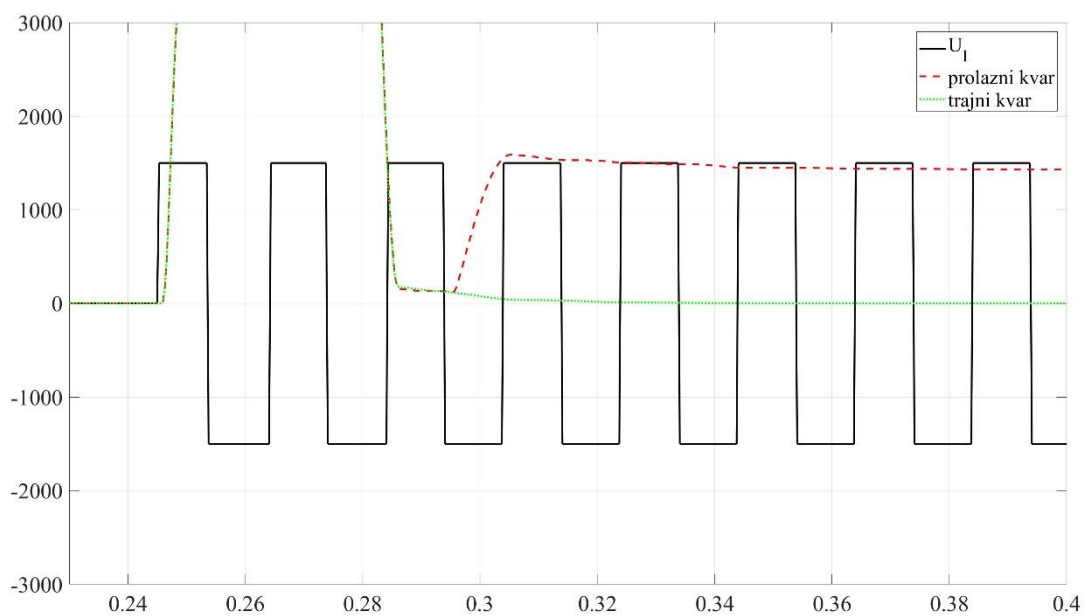
Imajući u vidu da je napon luka relativno mali (gotovo dva reda veličine manji u odnosu na radni napon) sa povećanjem rastojanja od početka voda do mesta kvara može se očekivati značajno slabljenje posmatranog signala  $u_{diff}$ . Ovome treba dodati i činjenicu da su očne kapacitivnosti voda zanemarene prilikom izvođenja algoritma. Iz navedenih razloga, može se očekivati značajan uticaj lokacije kvara na tačnost algoritma.

Kao što je već napomenuto, ukupna dužina posmatranog voda iznosi 150 km, a na mestu kvara simuliran je napon luka od 1500 V. Kvarovi su simulirani na sledećim lokacijama:  $l=30$  km,  $l=60$  km,  $l=90$  km,  $l=120$  km i  $l=150$  km.

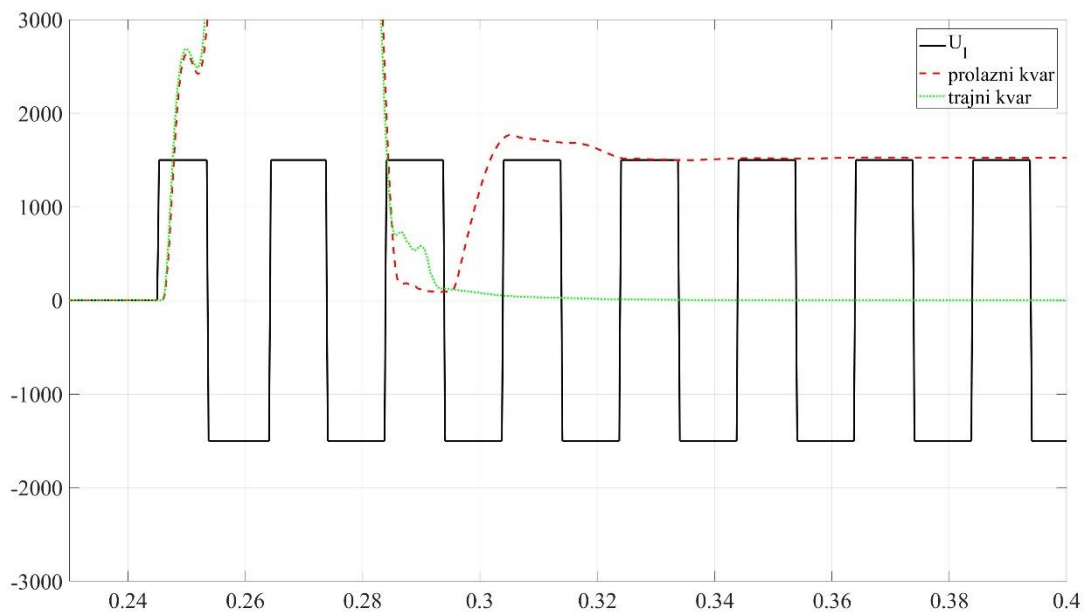
Na Slikama 93 – 97 prikazan je rad algoritma u slučaju kvara na različitim lokacijama.



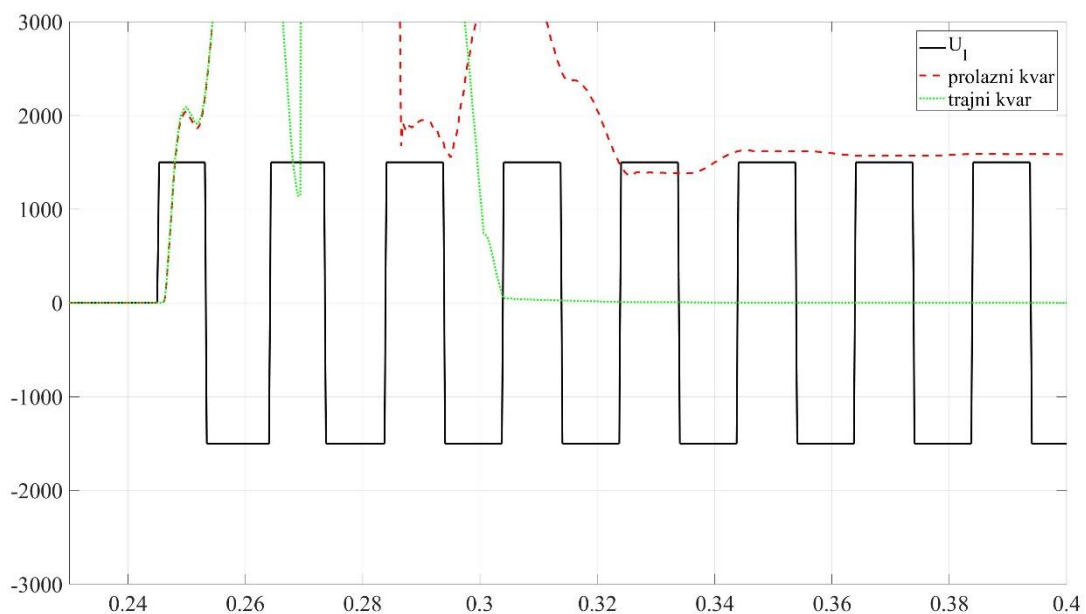
Slika 93 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=30$  km



Slika 94 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=60$  km

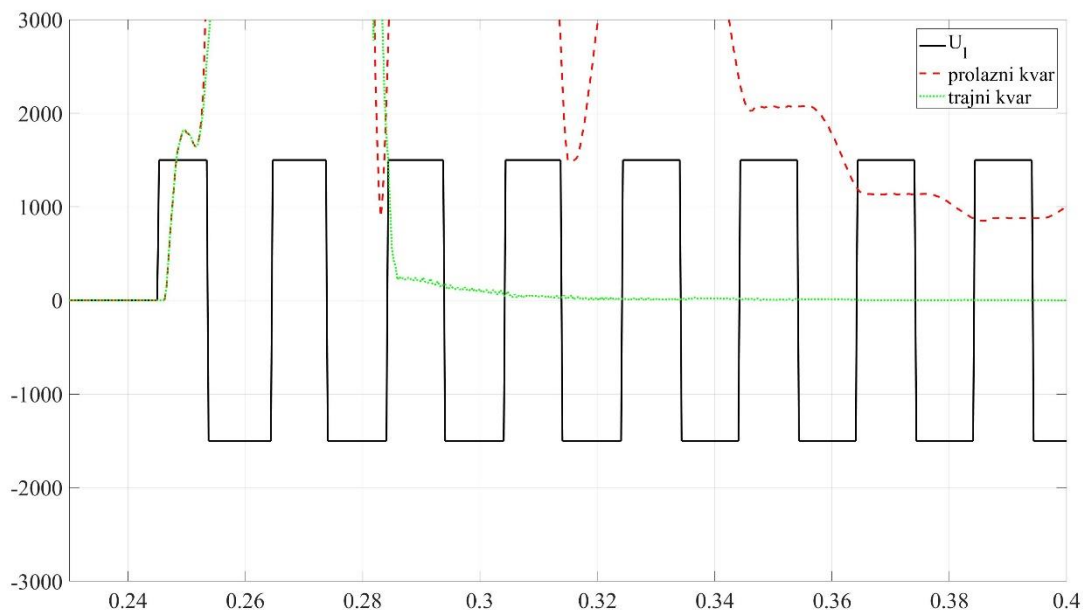


Slika 95 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=90$  km



Slika 96 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=120$  km





Slika 97 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=150$  km

Tačnost algoritma pri različitim lokacijama kvara prikazana je u Tabeli 4:

Tabela 4 Uticaj lokacije kvara na tačnost algoritma

Lokacija kvara (km)	Greška (%)
30	3.19
60	4.80
90	1.83
120	8.53
150	43.26

Na osnovu sprovedene analize može se konstatovati da povećanje rastojanja od početka voda do mesta kvara ima negativan uticaj na rad algoritma. Negativan uticaj se odražava pre svega na tačnost algoritma.

Pri kvarovima na  $l=30$  km,  $l=60$  km i  $l=90$  km, može se uočiti visoka preciznost algoritma (unutar granice od 5 %). Takođe, može se uočiti i da algoritam konvergira unutar relativno kratkog vremenskog intervala (do 60 ms).

Pri kvaru na  $l=120$  km može se uočiti nešto niža preciznost algoritma – greška u estimaciji napona luka iznosi 8.53 %. Takođe, može se uočiti da se vreme konvergencije algoritma povećalo na 80 ms. Međutim, potrebno je konstatovati da iako se preciznost estimacije napona luka smanjila, a vreme konvergencije povećalo, algoritam i dalje omogućava identifikaciju prirode kvara.

Međutim, pri kvaru na kraju voda ( $l=150$  km), algoritam ne uspeva da efikasno estimira napon luka. Naime, sprovedena analiza pokazuje da greška algoritma u ovom slučaju dostiže 43.26 %.

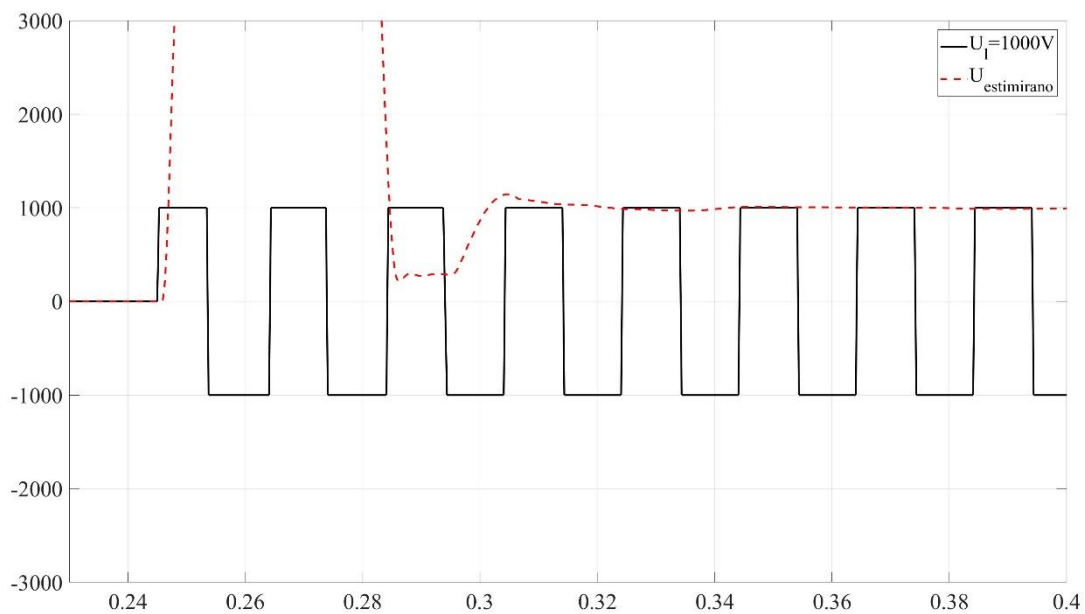
Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da algoritam pokazuje dobre performanse pri kvarovima na manjim rastojanjima od početka voda do mesta kvara (do 100 km). S druge strane, u slučaju dugačkih vodova algoritam ne daje odgovarajuće rezultate i ne može se uspešno primeniti za identifikaciju prirode kvara.

## 6.2.2 Analiza uticaja vrednosti napona luka

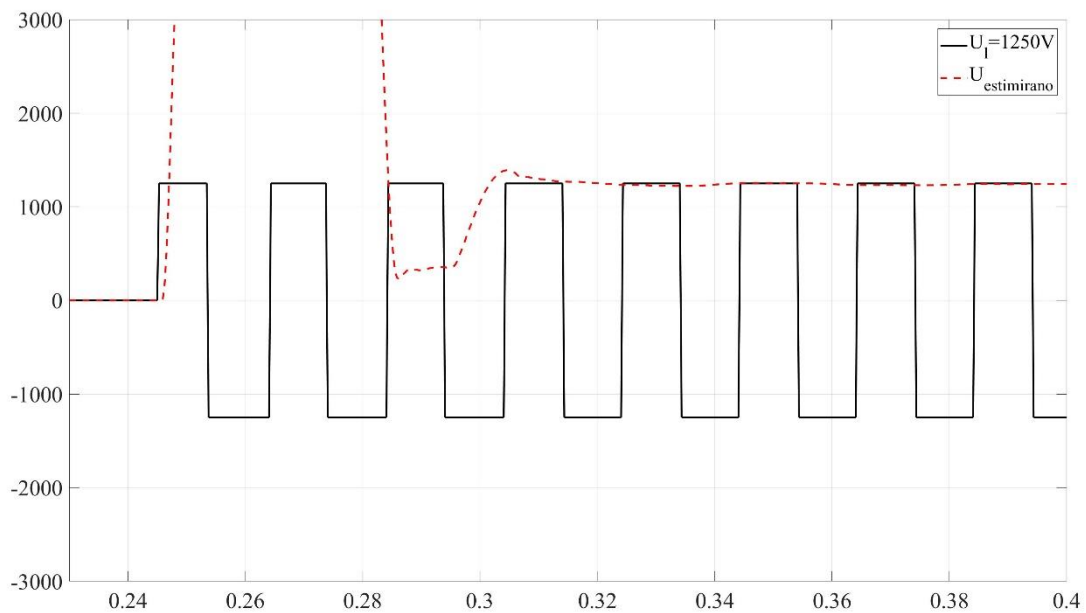
Na nadzemnim vodovima električni luk javlja se između rogova ili reketa izolatorskih lanaca, ili između faznih provodnika i zemlje. Napon električnog luka praktično ne zavisi od struje luka, već samo prati njen polaritet. Za električno polje unutar luka se može reći da je približno konstantno i iznosi od 1400 do 1500 V/m.

U okviru ovog poglavlja sagledan je uticaj vrednosti napona električnog luka na rad algoritma. Analizirane su sledeće vrednosti napona luka:  $U_l=1000$  V,  $U_l=1250$  V,  $U_l=1500$  V,  $U_l=1750$  V i  $U_l=2000$  V.

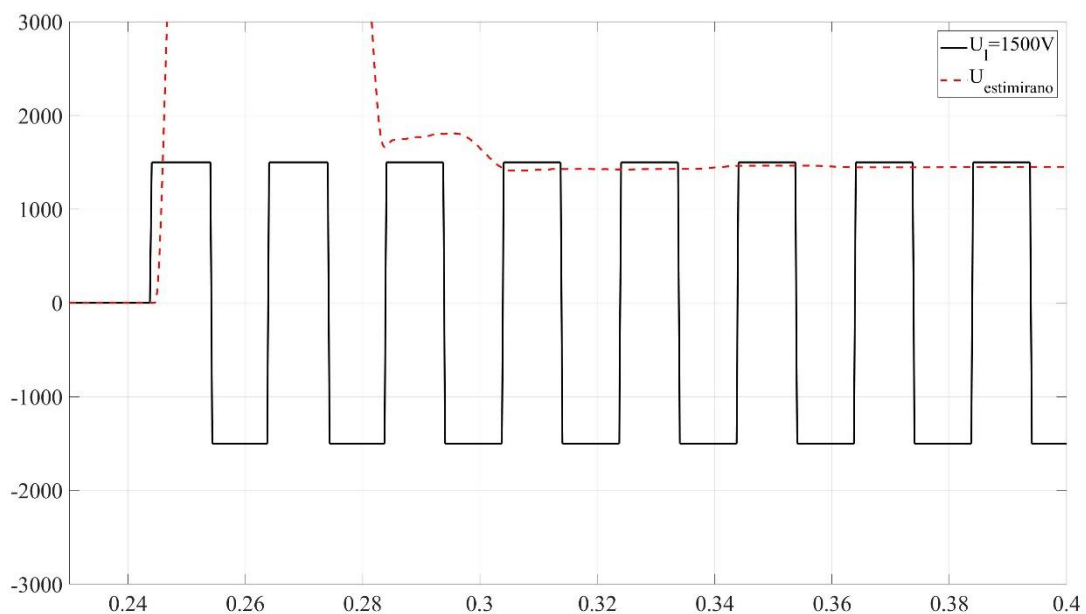
Na Slikama 98 - 102 prikazani su rezultati sprovedene analize.



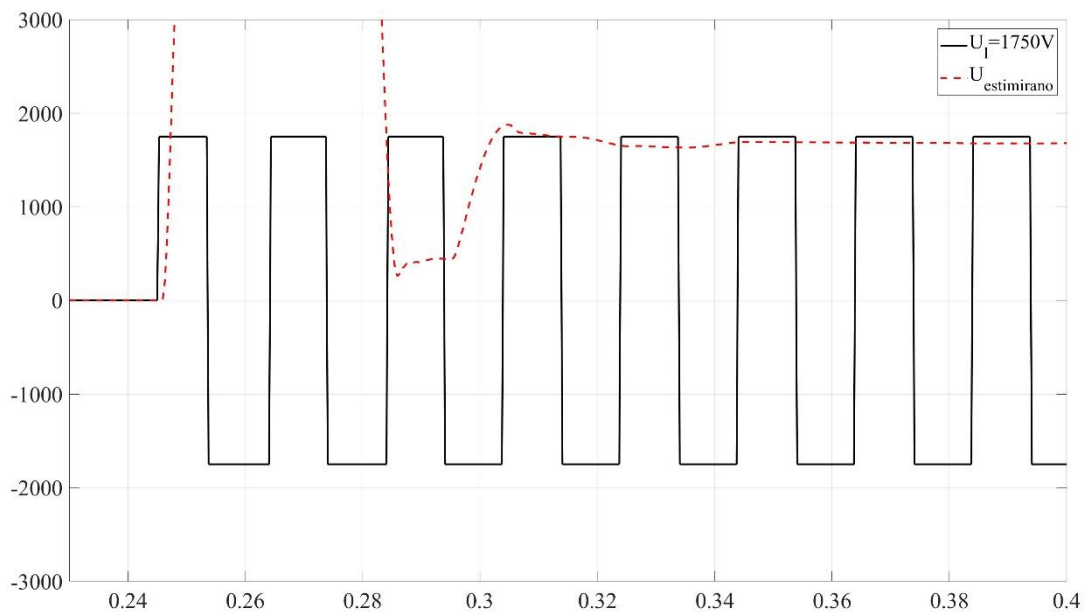
Slika 98 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1000$  V



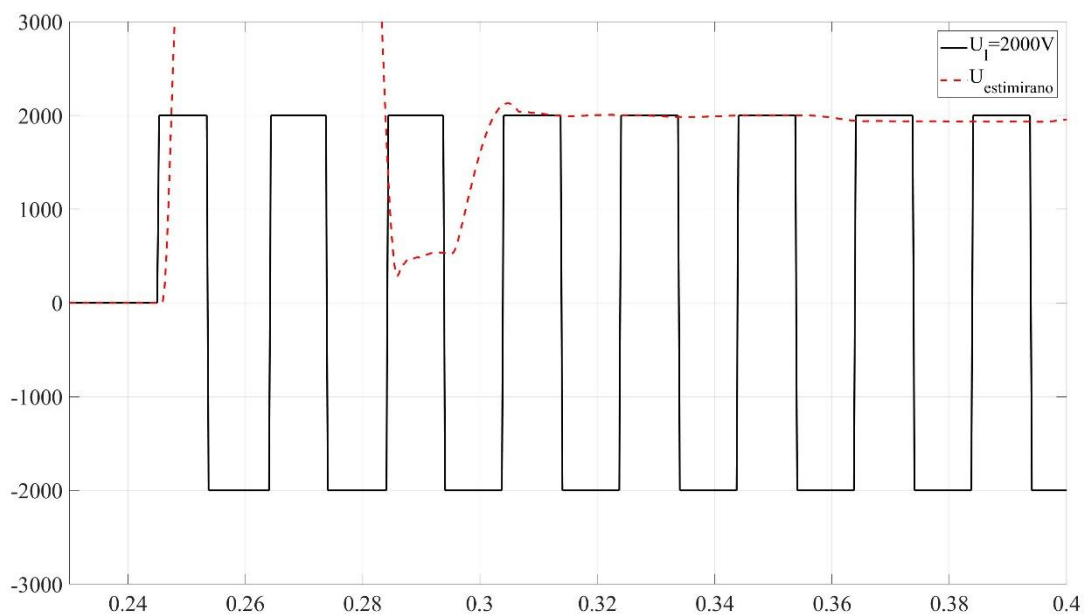
Slika 99 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1250V$



Slika 100 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1500V$



Slika 101 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1750V$



Slika 102 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=2000V$

Tačnost algoritma pri različitim naponima luka prikazana je u Tabeli 5:

Tabela 5 Uticaj napona električnog luka na tačnost algoritma

Napon luka (V)	Greška (%)
1000	1.59
1250	1.81
1500	4.02
1750	4.36
2000	3.81

Sprovedena analiza pokazuje da se različite vrednosti napona luka ne odražavaju na tačnost algoritma, kao ni na brzinu konvergencije. Naime, u svim razmatranim slučajevima, greška pri estimaciji napona luka ne prelazi 5% (brzina konvergencije u svim razmatranim slučajevima iznosi oko 60 ms). Prema tome, može se konstatovati da bez obzira na vrednost napona luka, algoritam omogućava nedvosmislenu identifikaciju prirode kvara.

### 6.2.3 Analiza uticaja trenutka nastanka kvara

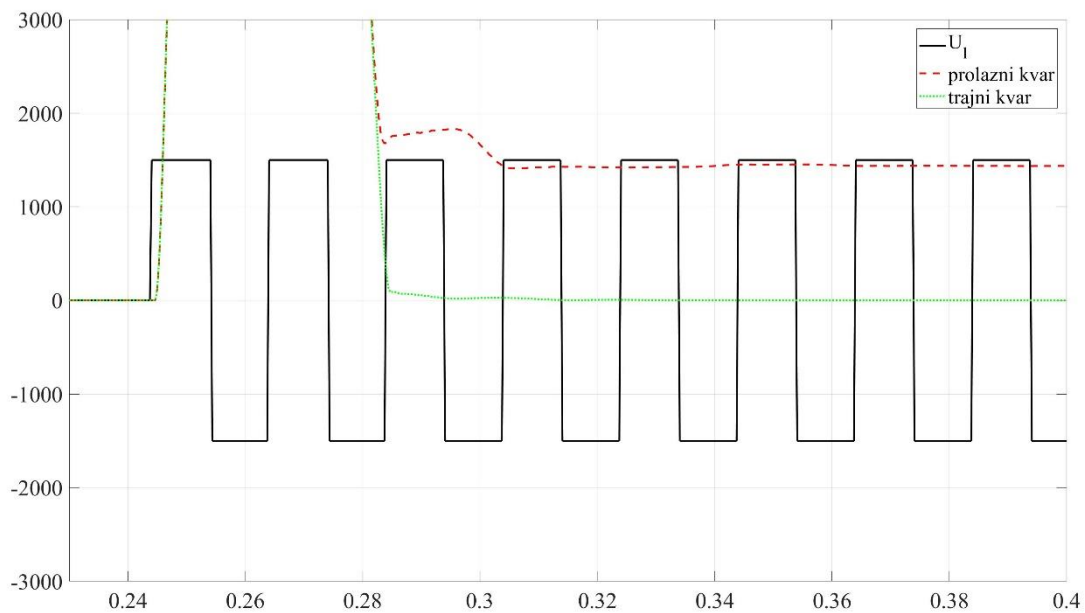
Brzina konvergencije je od posebne važnosti za rad algoritma za detekciju električnog luka. Primenom savremenih releja i prekidača postiže se veoma brzo isključenje kvara – kod kvarova u prenosnoj mreži, vreme proteklo od trenutka nastanka kvara do trenutka isključenja struje kvara tipično iznosi od 70 ms do 100 ms. Upravo je ovo vremenski interval unutar kog algoritam treba da identifikuje prirodu kvara.

Prilikom izvođenja algoritma zanemaren je uticaj jednosmerne komponente struje kvara. Iako se algoritam bazira na korišćenju isključivo naponskih signala, prisustvo jednosmerne komponente u struji kvara se implicitno odražava na rad algoritma. Naime, jedna od polaznih pretpostavki prilikom razmatranja samog električnog luka jeste da je napon luka u fazi sa strujom luka (strujom kvara). Posmatrano na nivou jedne osnovne periode, u slučaju kada struja kvara sadrži jednosmernu komponentu, vremenski interval unutar kog je struja kvara pozitivna nije jednak vremenskom intervalu unutar kog je struja kvara negativna. Usled toga, vremenski interval unutar kog je napon luka pozitivan nije jednak vremenskom intervalu unutar kog je napon luka negativan. Ova činjenica nije uvažena prilikom izvođenja algoritma, što se može negativno odraziti na njegov rad, a pre svega na brzinu konvergencije algoritma.

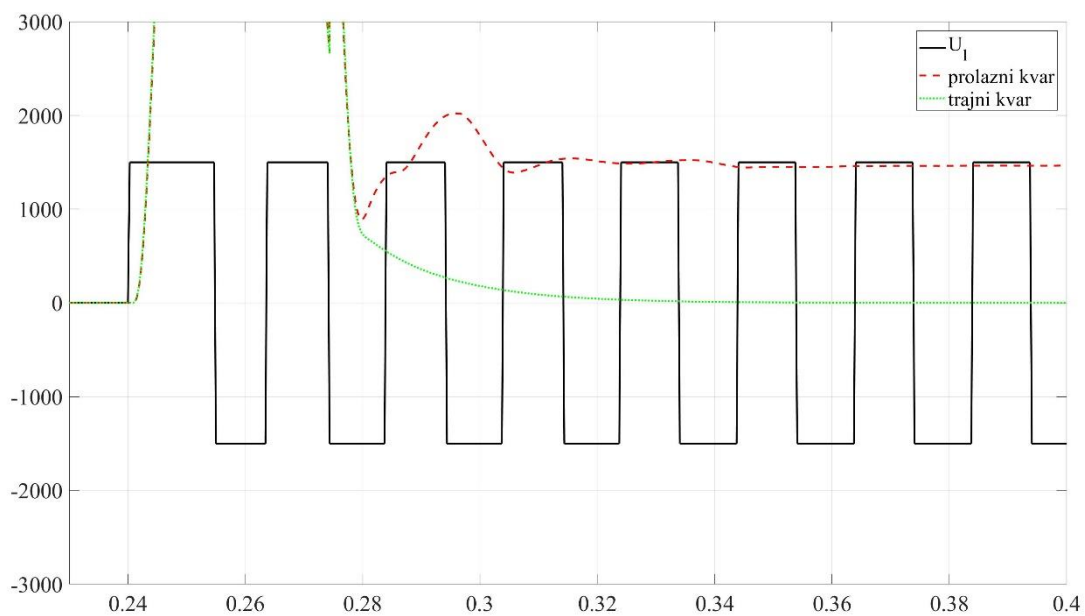
U okviru ovog poglavlja testiran je rad algoritma pri četiri različita trenutka nastanka kvara:  $t_k=0.24$  s,  $t_k=0.245$  s,  $t_k=0.25$  s i  $t_k=0.255$  s.

Trenuci nastanka kvara odabrani su tako da za  $t_k=0.24$  s i  $t_k=0.25$  s, jednosmerna komponenta struje kvara bude maksimalna, a da za  $t_k=0.245$  s i  $t_k=0.255$  s, jednosmerna komponenta struje kvara praktično ne postoji.

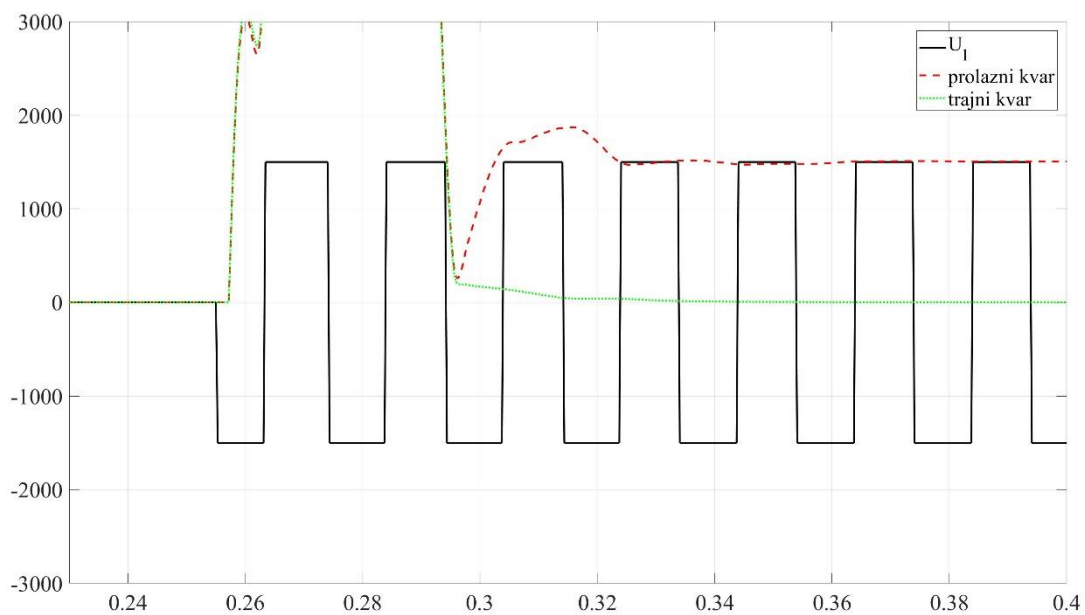
Na Slikama 103 – 106 prikazani su rezultati sprovedene analize.



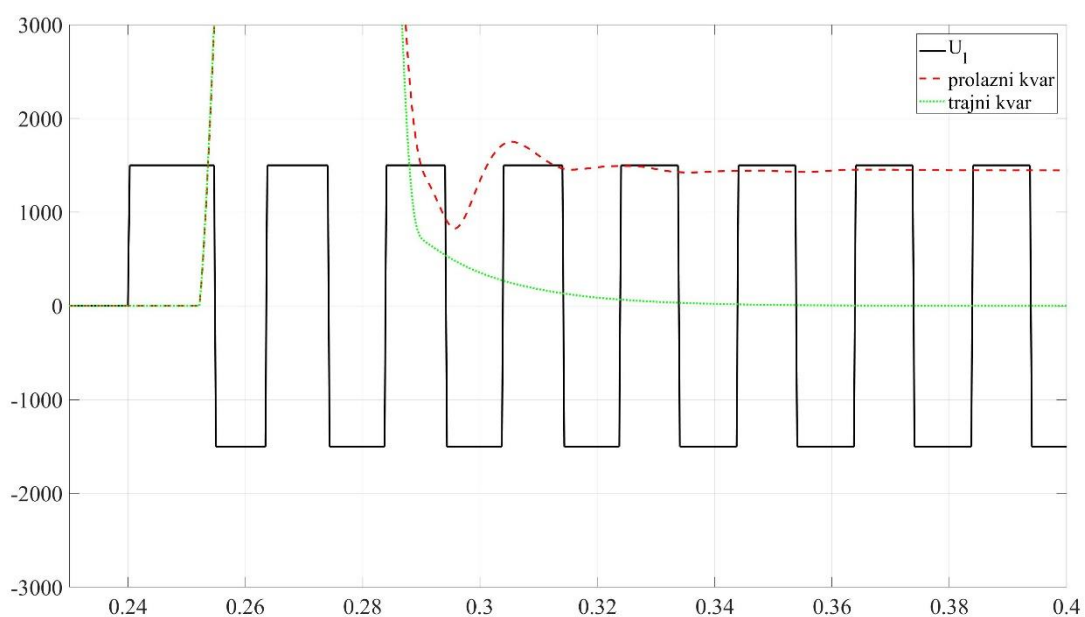
Slika 103 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.245$  s



Slika 104 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.24$  s



Slika 105 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.255$  s



Slika 106 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.25$  s

Brzina konvergencije algoritma u različitim analiziranim slučajevima, tabelarno je prikazana ispod.

Tabela 6 Uticaj jednosmerne komponente struje kvara na brzinu konvergencije algoritma

Trenutak kvara (ms)	DC komponenta prisutna (DA/NE)	Vreme konvergencije
0.245	NE	60 ms
0.24	DA	70 ms
0.255	NE	70 ms
0.25	DA	70 ms

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da trenutak nastanka kvara, odnosno prisustvo jednosmerne komponente u struji kvara, nema značajnijeg uticaja na brzinu konvergencije algoritma. Naime, u svim razmatranim slučajevima, algoritam konvergira unutar vremenskog intervala od 70 ms (pri kvaru  $t_k=0.245$  s vreme konvergencije iznosi 60 ms). Uticaj jednosmerne komponente struje kvara na brzinu konvergencije algoritma nije od presudnog značaja usled činjenice da jednosmerna komponenta struje kvara opada tokom vremena čime se i njen uticaj smanjuje.

Poređenjem vrednosti napona luka koju algoritam estimira u slučaju prolaznog kvara (napon sa električnim lukom) sa vrednošću koju estimira u slučaju trajnog kvara, može se uočiti da algoritam omogućava identifikaciju prirode kvara već nakon 50 ms od trenutka nastanka kvara.

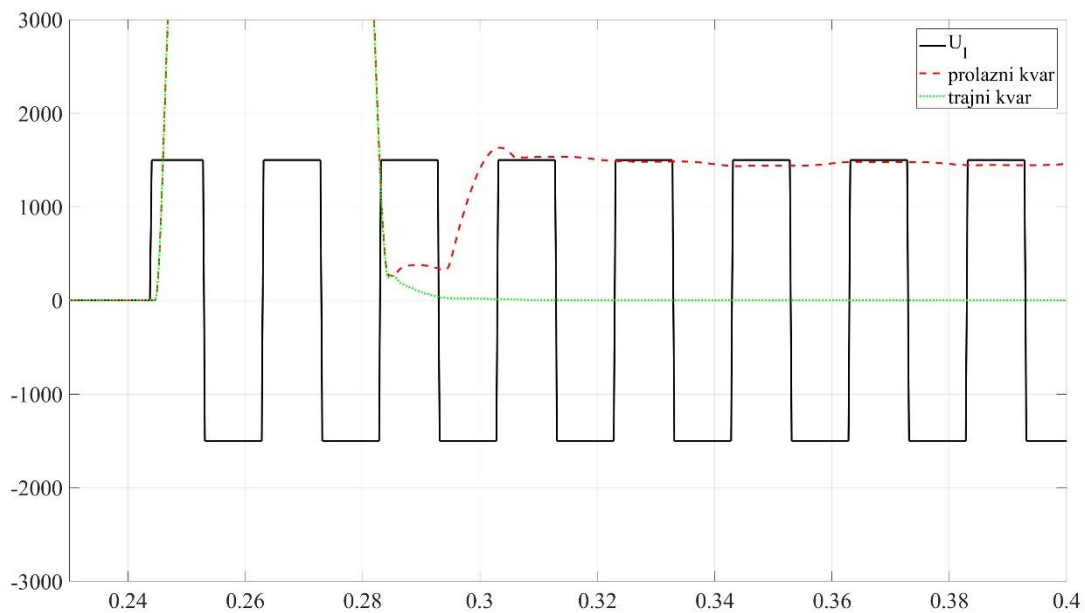
#### 6.2.4 Analiza uticaja otpornosti rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba

Otpornost rasprostiranja uzemljivačkog sistema predstavlja otpornost zemlje između površine elektroda uzemljivačkog sistema i udaljene referentne zemlje koja je na nultom potencijalu [65]. Otpornost rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba mora imati malu vrednost, kako bi se izbeglo da u slučaju zemljospoja, ili atmosferskog pražnjenja, napon dodira ili napon koraka budu iznad standardnom zahtevanih vrednosti. Pored toga, visoke vrednosti otpornosti rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba, u slučaju atmosferskog pražnjenja mogu rezultirati pojavom velike razlike potencijala između stuba i faznog provodnika, što za posledicu može imati pojavu povratnog preskoka.

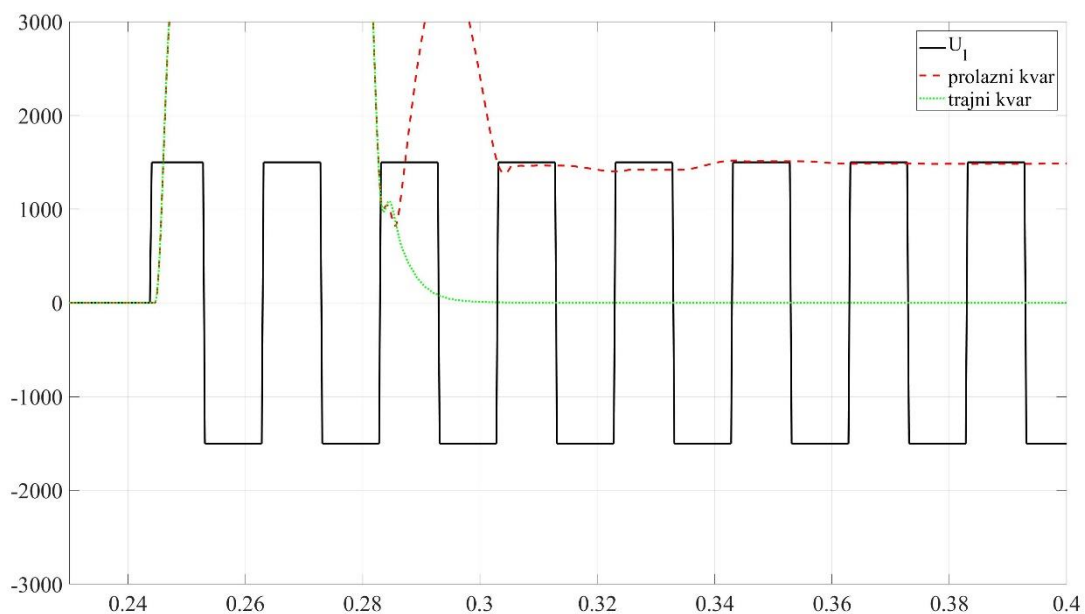
Iako otpornost rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba obično ima relativno male vrednosti (tipično do  $10 \Omega$ ), ona se ne može izbeći. S druge strane, prilikom izvođenja algoritma, pošlo se od pretpostavke da na mestu kvara postoji isključivo električni luk, odnosno zanemareno je postojanje otpornosti uzemljivačkog sistema. Testiranje algoritma izvršeno je za sledeće vrednosti otpornosti uzemljivačkog sistema stuba:  $R=10 \Omega$ ,  $R=20 \Omega$  i  $R=30 \Omega$ .

Rezultati sprovedene analize dati su na Slikama 107 – 109.

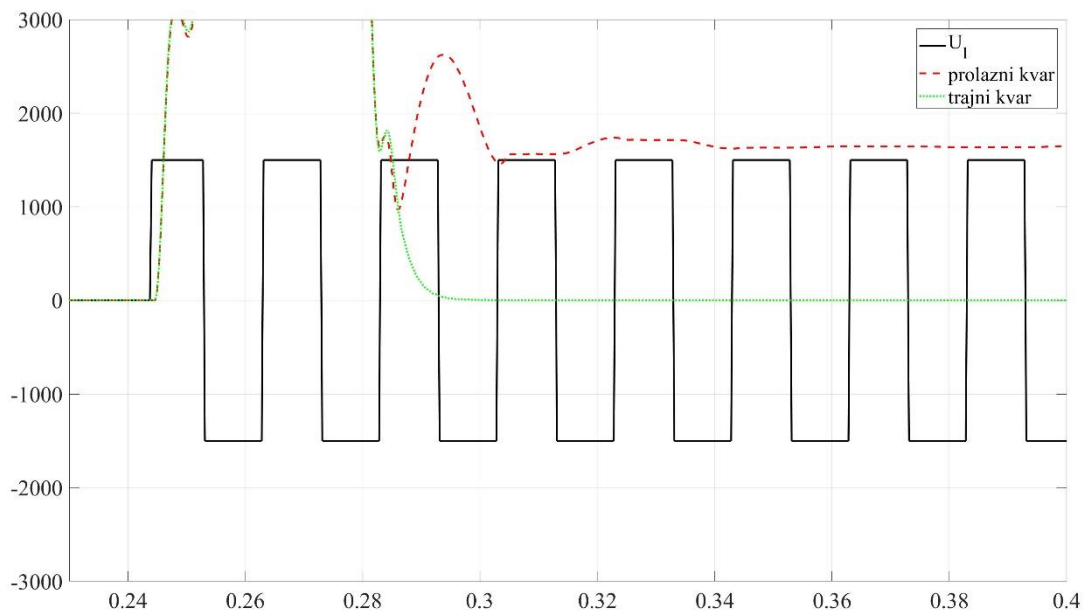




Slika 107 Estimirani napon luka – otpornost uzemljenja stuba:  $R=10 \Omega$



Slika 108 Estimirani napon luka – otpornost uzemljenja stuba:  $R=20 \Omega$



Slika 109 Estimirani napon luka – otpornost uzemljenja stuba:  $R=30 \Omega$

Tačnost algoritma u razmatranim slučajevima tabelarno je prikazana ispod:

Tabela 7 Uticaj otpornosti rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba na tačnost algoritma

Otpornost rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba [ $\Omega$ ]	Greška [%]
10	4.14
20	5.1
30	11.89

Sprovedena analiza pokazuje da otpornost uzemljivačkog sistema stuba ima negativan uticaj na rad algoritma. Naime, sa povećanjem otpornosti uzemljivačkog sistema stuba, tačnost algoritma se smanjuje, i u slučaju otpornosti uzemljivačkog sistema stuba od  $30 \Omega$  dostiže vrednost od gotovo 12 %. Međutim, može se konstatovati da bez obzira na sniženu preciznost algoritma, on i dalje obezbeđuje nedvosmisleni identifikaciju prirode kvara.

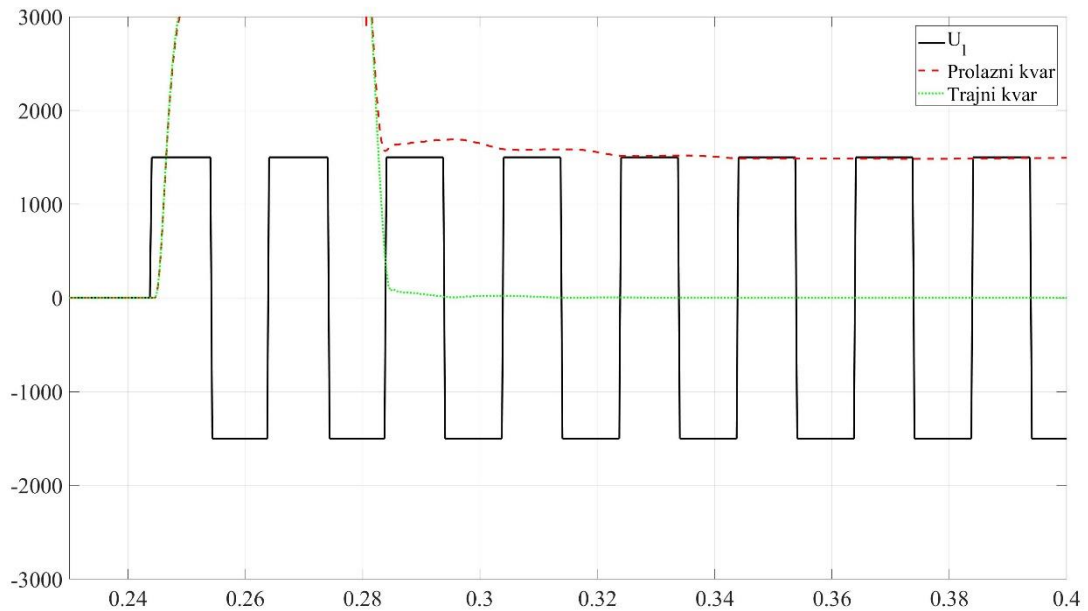
## 6.2.5 Analiza uticaja impedanse mreže

Snaga kratkog spoja u određenoj tački sistema (a time i impedansa sistema u toj tački), varira u toku vremena. Naime, usled normalne fluktuacije opterećenja sistema, menja se uklopno stanje sistema, što za rezultat ima promenu snage kratkog spoja.

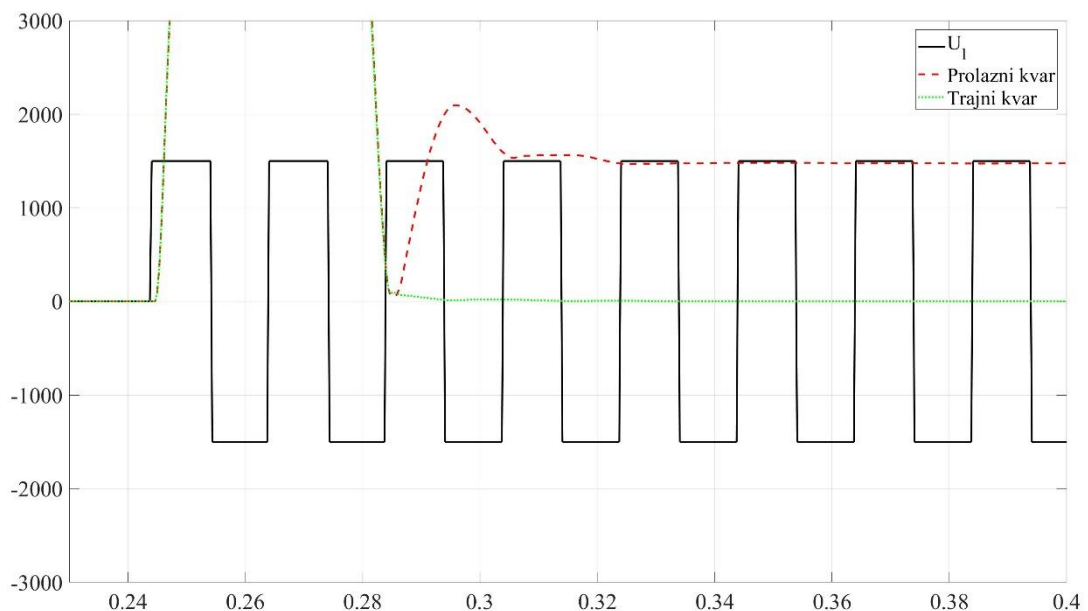
Imajući ovo u vidu, može se reći da impedansa sistema posmatrano sa mesta releja, u proizvoljnom vremenskom trenutku, nije poznata veličina. Prema tome, važno je da algoritam za detekciju električnog luka ne pokazuje osetljivost na promenu impedanse mreže, naročito ako se ima u vidu činjenica da u pojedinim sistemima varijacije impedanse mreže mogu biti značajne.

U cilju verifikacije teorijskih tvrdnji da prikazani algoritam nije osjetljiv u odnosu na impedansu mreže, izvršene su simulacije u kojima je mreža sa leve strane voda (na mestu releja) modelovana na sledeći način:  $Z=3.77 \Omega$ ,  $Z=5.65 \Omega$ ,  $Z=7.55 \Omega$ ,  $Z=9.42 \Omega$  i  $Z=11.31 \Omega$  (navedene impedanse odgovaraju snagama kratkog spoja od: 3200 MVA, 2140 MVA, 1600 MVA, 1280 MVA i 1070 MVA).

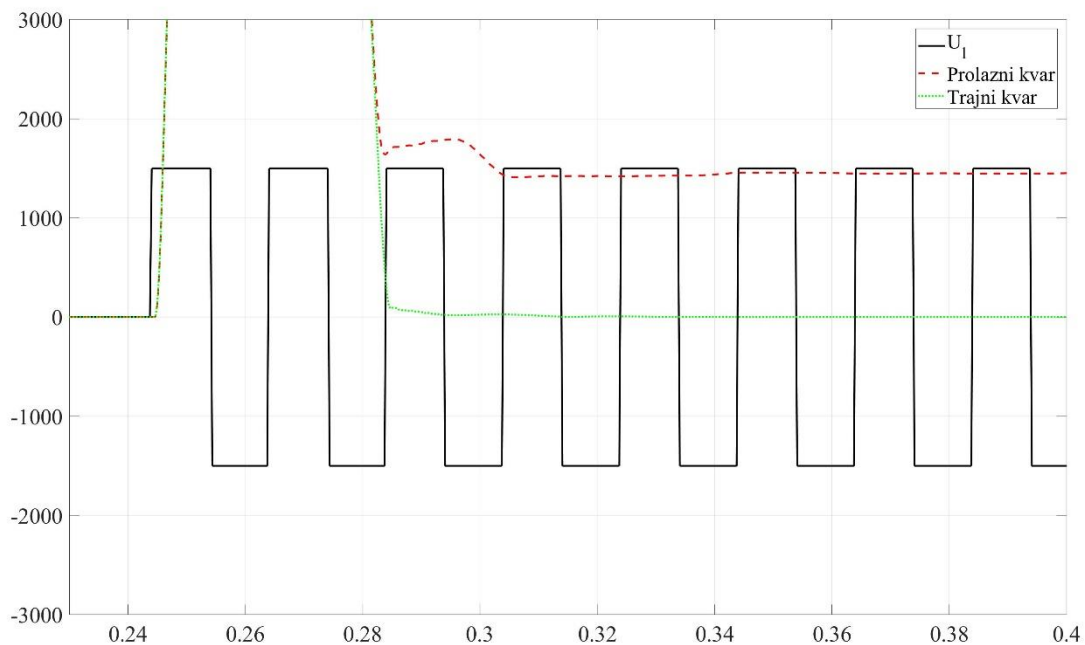
Rezultati sprovedene analize prikazani su u nastavku (Slika 110 - Slika 114).



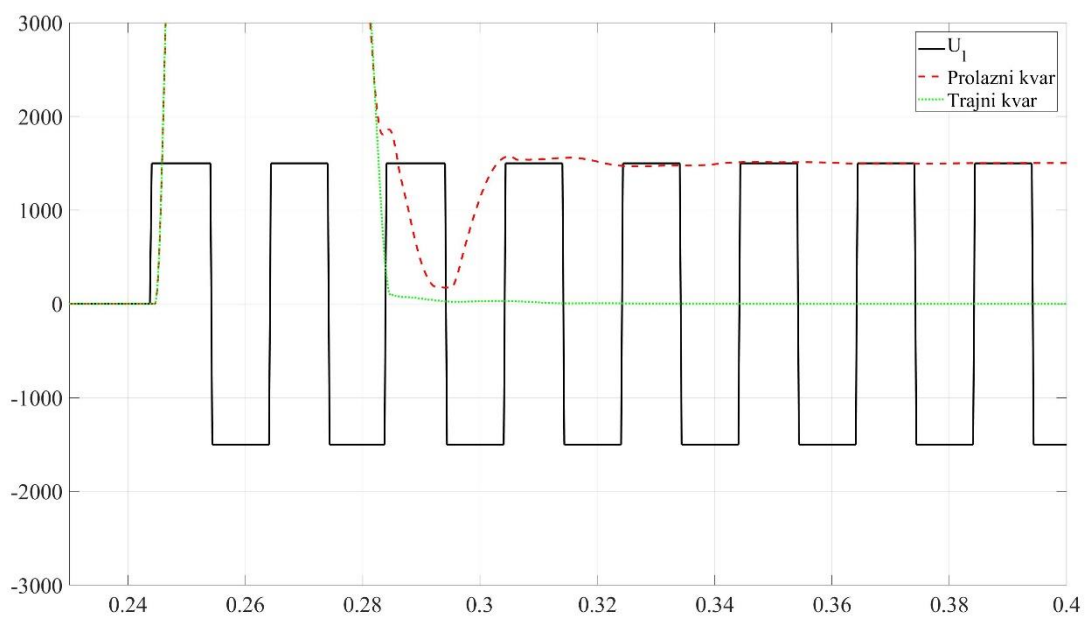
Slika 110 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=3.77 \Omega$



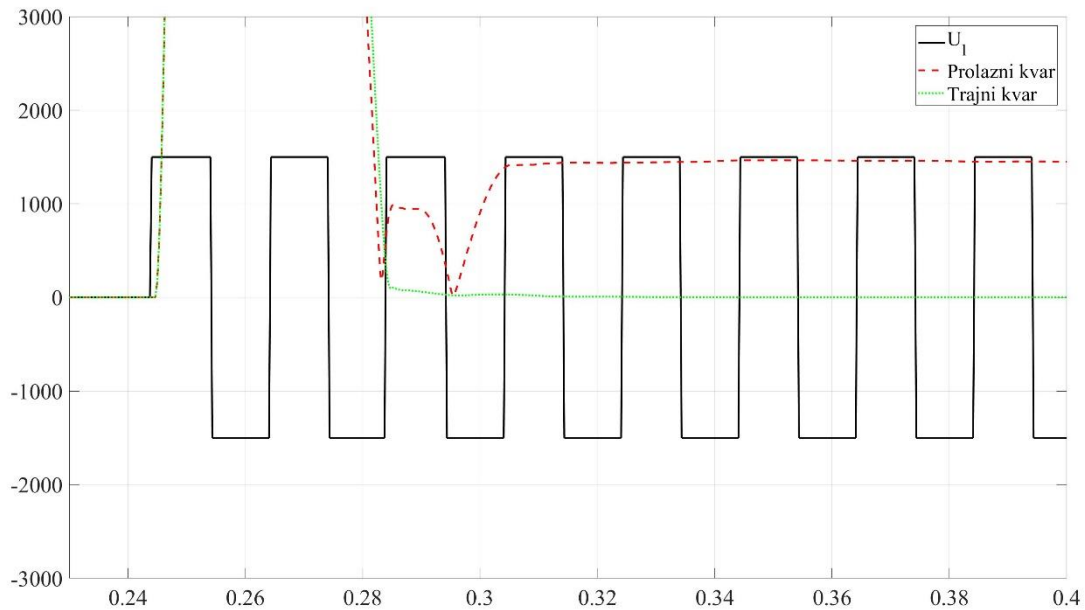
Slika 111 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=5.65 \Omega$



Slika 112 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=7.55 \Omega$



Slika 113 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=9.42 \Omega$



Slika 114 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=11.31 \Omega$

Tačnost algoritma pri različitim impedansama mreže prikazana je u Tabeli 8:

Tabela 8 Uticaj impedanse mreže na tačnost algoritma

Impedansa mreže ( $\Omega$ )	Greška (%)
3.77	1.42
5.65	2.25
7.55	4.02
9.42	0.41
11.31	4.21

Sproverena analiza pokazuje da bez obzira na značajne varijacije u impedansi mreže, greška u estimaciji napona luka ne prevazilazi 5%, što ukazuje da se algoritam može uspešno primeniti bez obzira na uklopno stanje sistema. Takođe, potrebno je uočiti da ne postoje značajnija odstupanja ni kada je reč o vremenima konvergencije - vreme konvergencije iznosi približno 60 ms.

## 6.2.6 Analiza uticaja talasnog oblika električnog luka

U prethodnim simulacijama napon električnog luka modelovan je kao pravougaona četvrtka u fazi sa strujom luka. Ovo je najjednostavniji, ali i najčešće primenjivan model električnog luka za analize u oblasti relejne zaštite. U okviru ovog poglavlja analiziran je uticaj realnijeg modela električnog luka na rad algoritma.

Pored modela pravougaone četvrtke, najčešće primenjivani modeli električnog luka su:

### 1. Cassie-ov model električnog luka

Cassie-ov model je pogodan za opisivanje električnog luka u oblasti velikih struja luka.

Vremenska zavisnost napona i struje luka, kod Cassie-ovog modela opisana je sledećim relacijama:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left( \frac{u^2}{U_C^2} - 1 \right) \quad (6.40)$$

$$u = \frac{i}{g} \quad (6.41)$$

U prethodnim izrazima sa  $u$ ,  $i$  i  $g$  označeni su napon, struja i admitansa električnog luka,  $\tau$  označava vremensku konstantu luka, a  $U_C$  napon gorenja luka.

### 2. Mayr-ov model električnog luka

Mayr-ov model je pogodan za opisivanje električnog luka u oblasti malih struja luka ( $u$  neposrednoj okolini trenutka u kome struja prolazi kroz nulu).

Vremenska zavisnost napona i struje luka, kod Mayr-ovog modela opisana je sledećim relacijama:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left( \frac{u \cdot i}{P_{out}} - 1 \right) \quad (6.42)$$

$$u = \frac{i}{g} \quad (6.43)$$

U prethodnoj relaciji  $P_{out}$  predstavlja snagu hlađenja luka (ostale veličine imaju isto značenje kao i u slučaju Cassie-ovog modela luka).

### 3. Habedank-ov model električnog luka

Habedank-ov model električnog luka otklanja nedostatke Cassie-ovog i Mayr-ovog modela električnog luka. Kod Habedank-ovog modela električnog luka, admitansa luka predstavljena je kao redna veza admitansi Cassie-ovog i Mayr-ovog modela luka. Prema tome, ovaj model električnog luka se može primeniti za kompletan opseg struja.

Jednačine koje definišu Habedank-ov model električnog luka date su u nastavku:

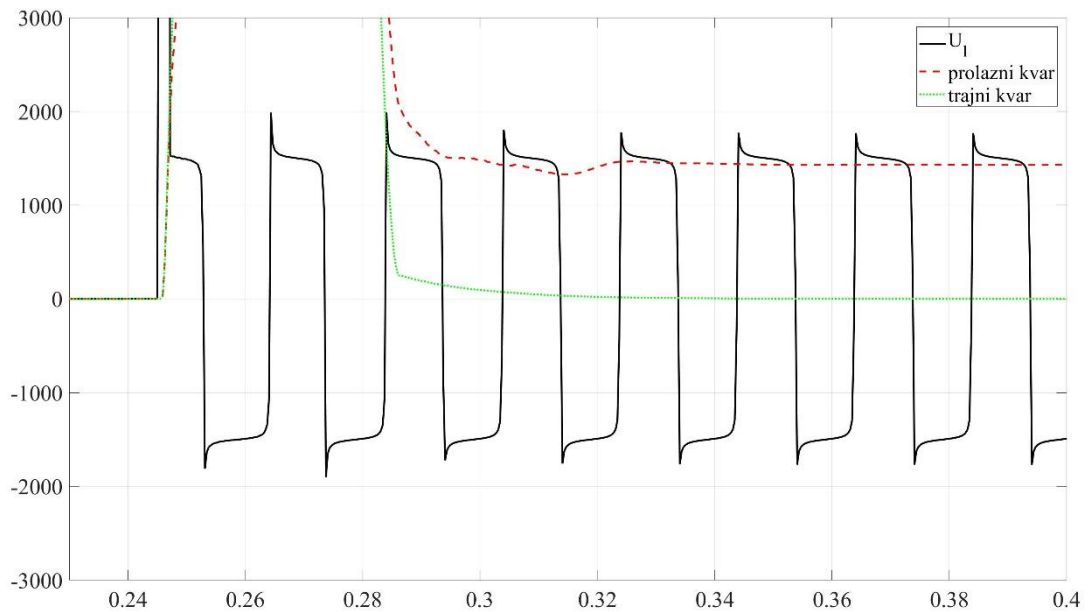
$$\frac{1}{g_m} \cdot \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \cdot \left( \frac{u^2 \cdot g^2}{P_{out} \cdot g_m} - 1 \right) \quad (6.44)$$

$$\frac{1}{g_c} \cdot \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \cdot \left( \left( \frac{u \cdot g}{U_C \cdot g_c} \right)^2 - 1 \right) \quad (6.45)$$

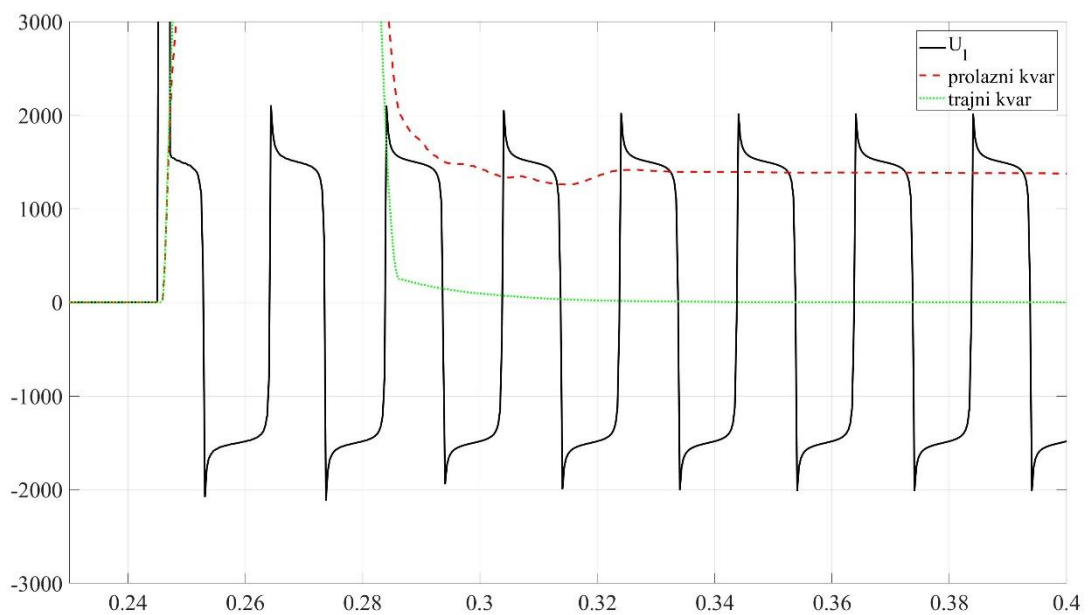
$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (6.46)$$

$$u = \frac{i}{g} \quad (6.47)$$

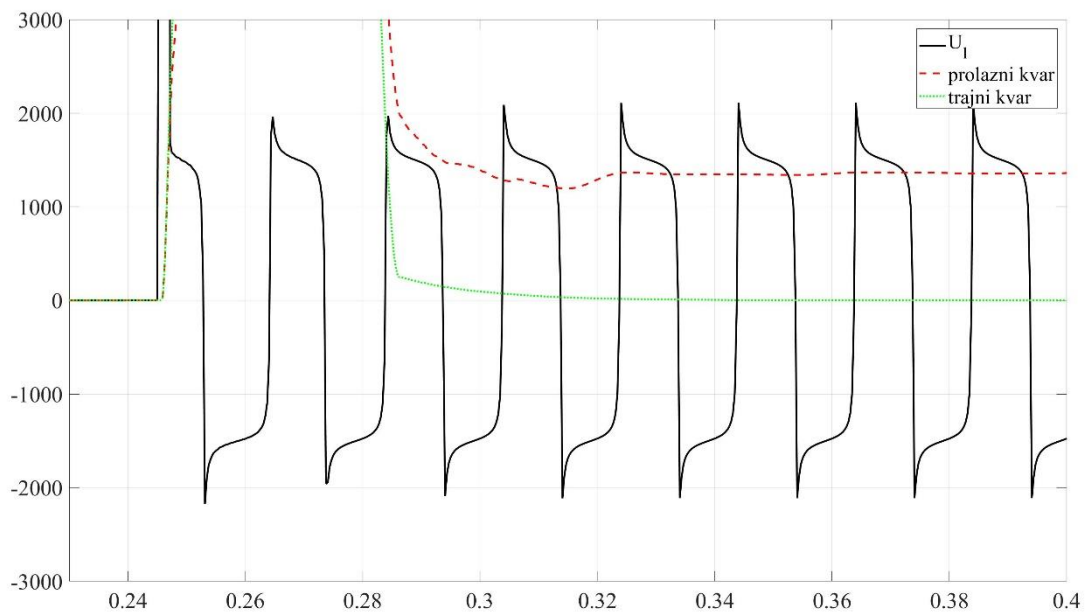
Imajući u vidu prethodno izlaganje na ovom mestu izvršeno je modelovanje električnog luka korišćenjem Hadedank-ovog modela električnog luka. Simulacije su izvršene sa sledećim vrednostima vremenskih konstanti luka:  $\tau_c=100 \mu\text{s}$ ,  $\tau_c=200 \mu\text{s}$ ,  $\tau_c=300 \mu\text{s}$ ,  $\tau_c=400 \mu\text{s}$  i  $\tau_c=500 \mu\text{s}$ .



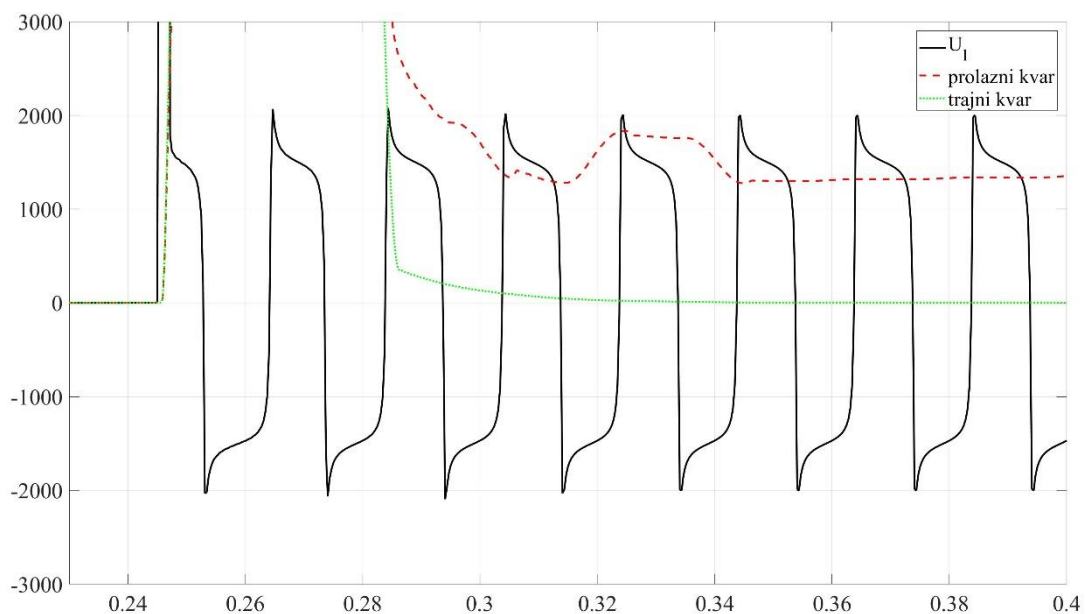
Slika 115 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=100 \mu\text{s}$



Slika 116 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=200 \mu\text{s}$

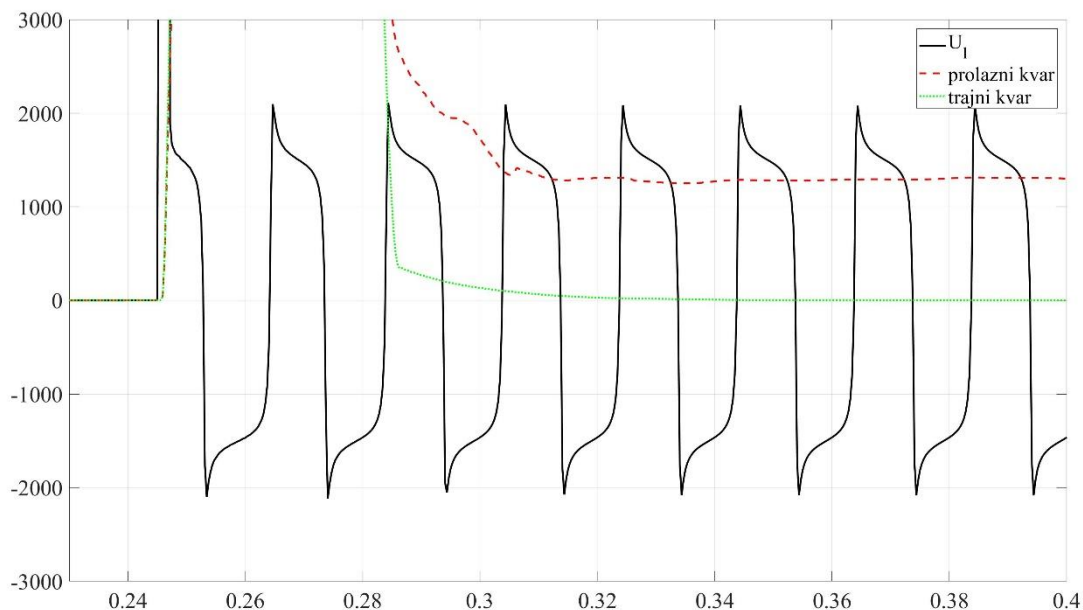


Slika 117 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=300 \mu s$



Slika 118 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=400 \mu s$





Slika 119 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=500 \mu s$

Tačnost algoritma pri različitim vremenskim konstantama luka prikazana je u Tabeli 9:

Tabela 9 Uticaj talasnog oblika napona luka na tačnost algoritma

Vremenska konstanta luka $\tau_c$ ( $\mu s$ )	Greška (%)
100	5.33
200	8.00
300	10.60
400	13.30
500	16.67

Sprovedena analiza pokazuje da sa povećanjem vremenske konstante luka, algoritam estimira niže vrednosti napona električnog luka. Ovo je posledica sve većeg odstupanja talasnog oblika napona luka od pravougaone četvrtke. Međutim, može se zaključiti da bez obzira na to, algoritam omogućava nedvosmisleni identifikaciju prirode kvara.

### 6.2.7 Analiza rada algoritma u slučaju međufaznog kvara

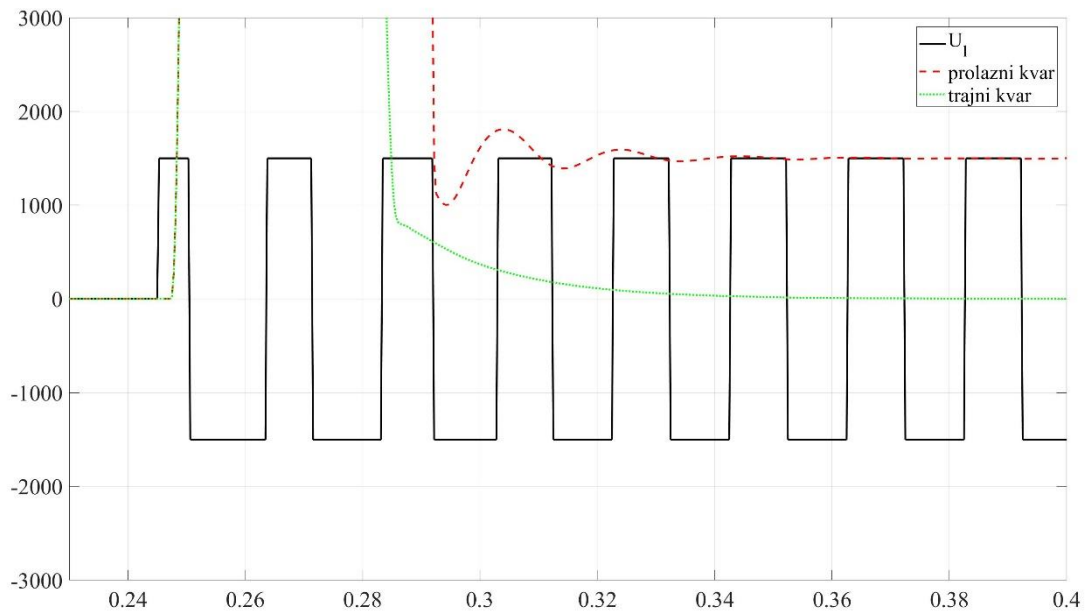
Kao što je već napomenuto, izvođenje algoritma dato u poglavlju 6.1 prikazano je za slučaj jednofaznog kvara. Međutim, algoritam se na isti način može primeniti i u slučaju međufaznog kvara. Jedina razlika u odnosu na slučaj jednofaznog kvara, ogleda se u činjenici da je u slučaju međufaznog kvara, algoritmu potrebno proslediti međufazni napon umesto faznog.

U narednom tekstu ilustrovan je rad algoritma u slučaju međufaznog kvara. Analiziran je uticaj istih veličina kao i u slučaju jednofaznog kvara, izuzev uticaja otpornosti rasprostiranja

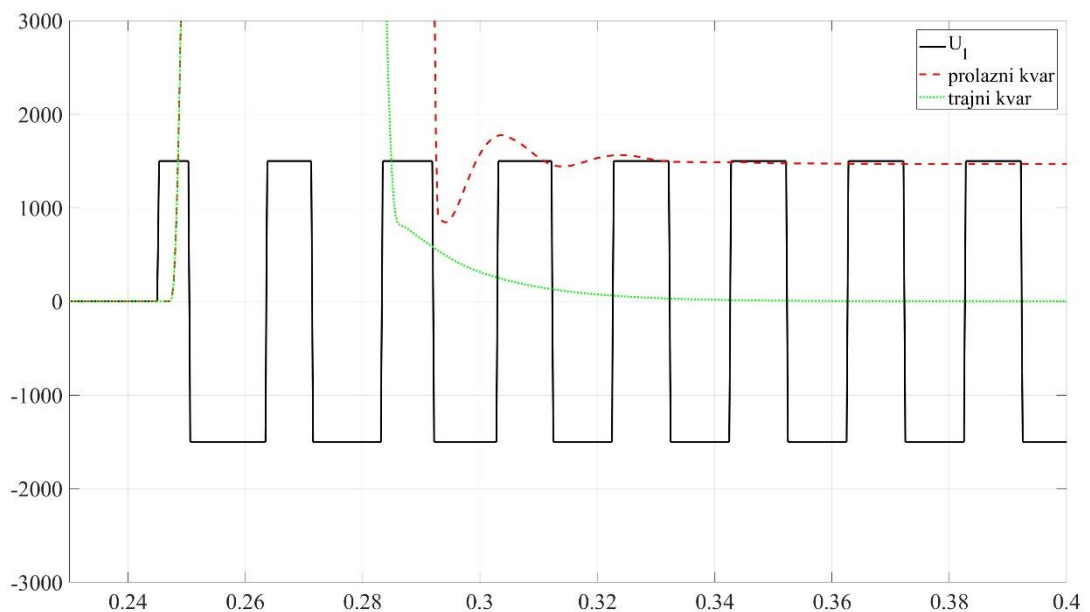
uzemljivačkog sistema stuba, imajući u vidu da kod kvara bez zemlje ova veličina ne može uticati na krajnje rezultate.

Zaključci doneseni prilikom analize rada algoritma u slučaju jednofaznog kvara, u potpunosti su primenljivi i kod međufaznih kvarova. Iz tog razloga, na ovom mestu se neće ulaziti u ponovnu analizu dobijenih rezultata.

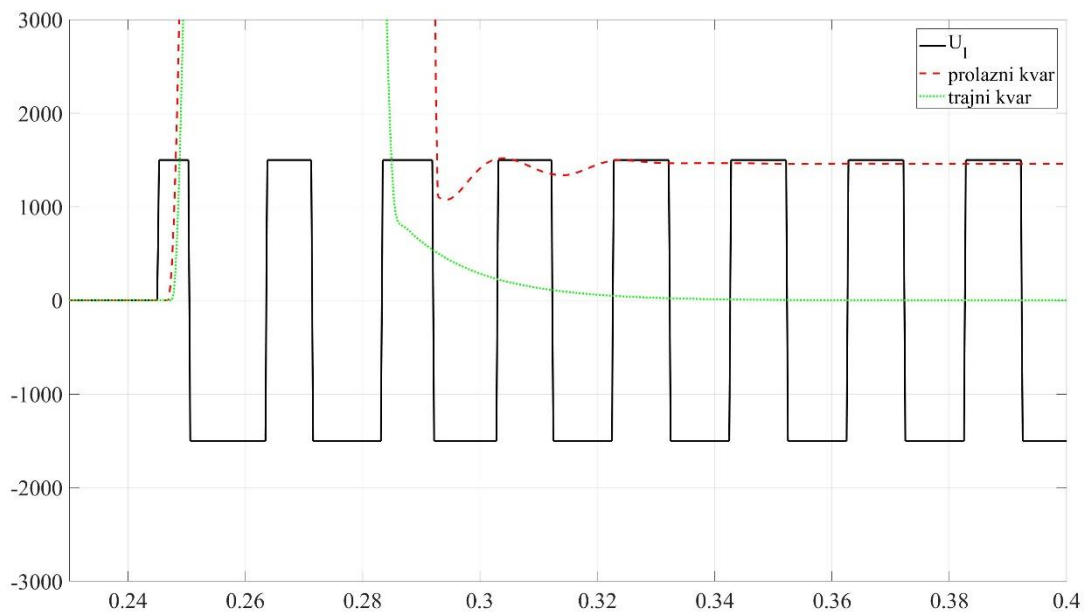
### Analiza uticaja lokacije kvara



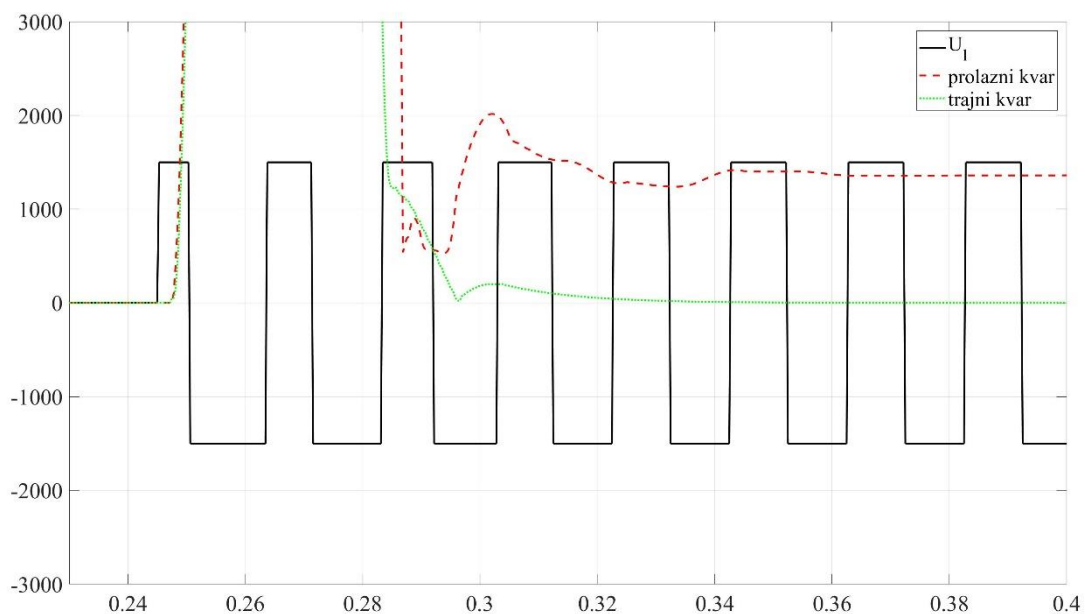
Slika 120 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=30$  km (međufazni kvar)



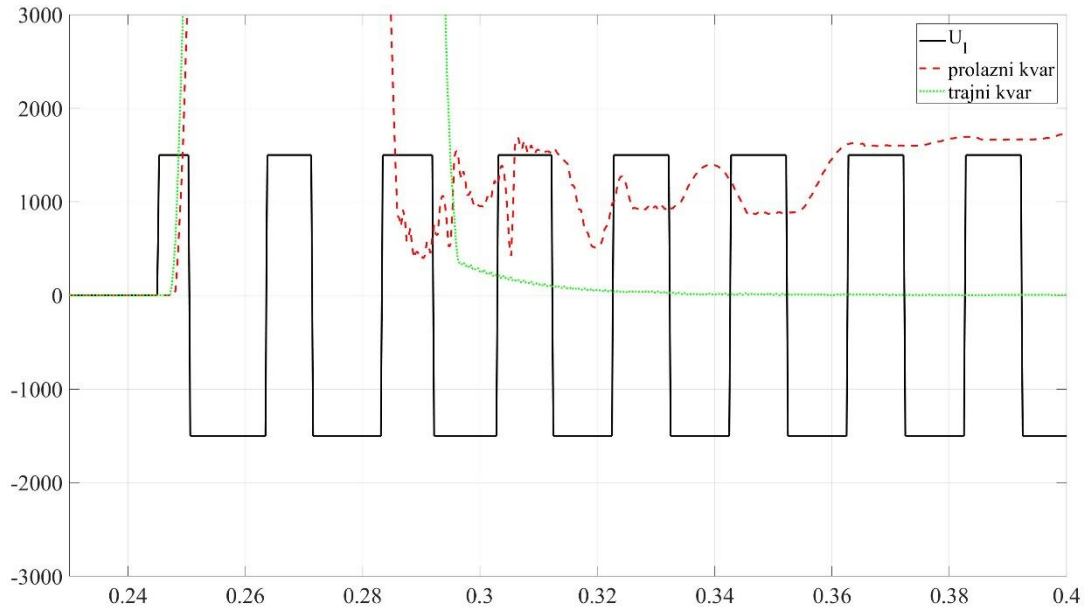
Slika 121 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=60$  km (međufazni kvar)



Slika 122 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=90$  km (međufazni kvar)



Slika 123 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=120$  km (međufazni kvar)



Slika 124 Estimirani napon luka – lokacija kvara:  $l=150$  km (međufaznikvar)

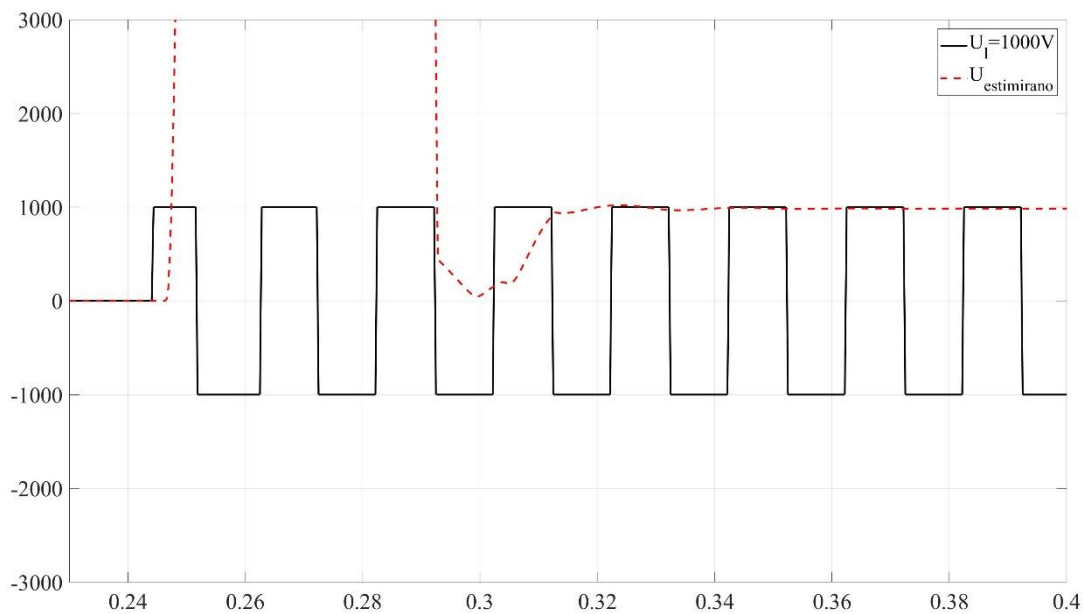
U Tabeli 10 dat je pregled grešaka dobijenih pri različitim lokacijama kvara.

Tabela 10 Uticaj lokacije kvara na tačnost algoritma (međufazni kvar)

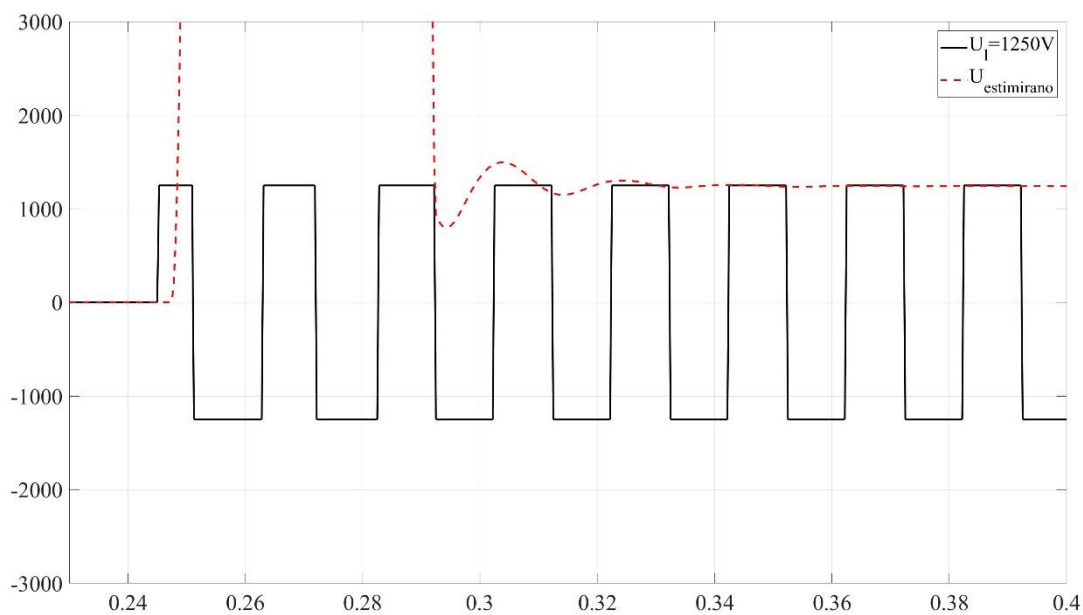
Lokacija kvara (km)	Greška (%)
30	1.41
60	2.15
90	2.68
120	9.55
150	59.67

Kao i u slučaju jednofaznog kvara, može se zaključiti da algoritam gubi na preciznosti sa porastom rastojanja od početka voda do mesta kvara. Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da se algoritam može primeniti isključivo na kraće vodove (do 100 km).

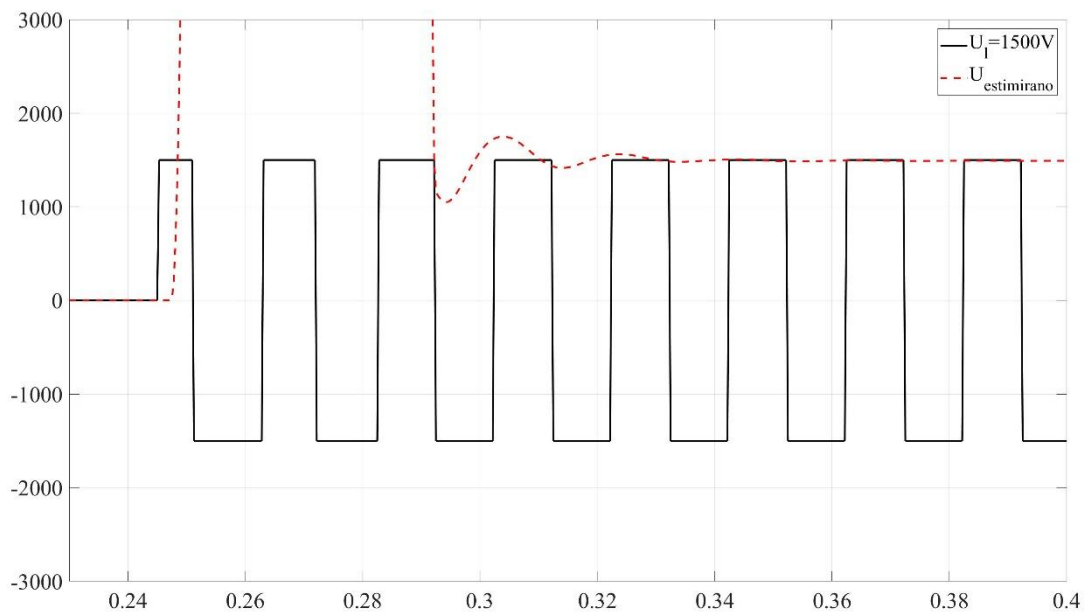
**Analiza uticaja vrednosti napona luka**



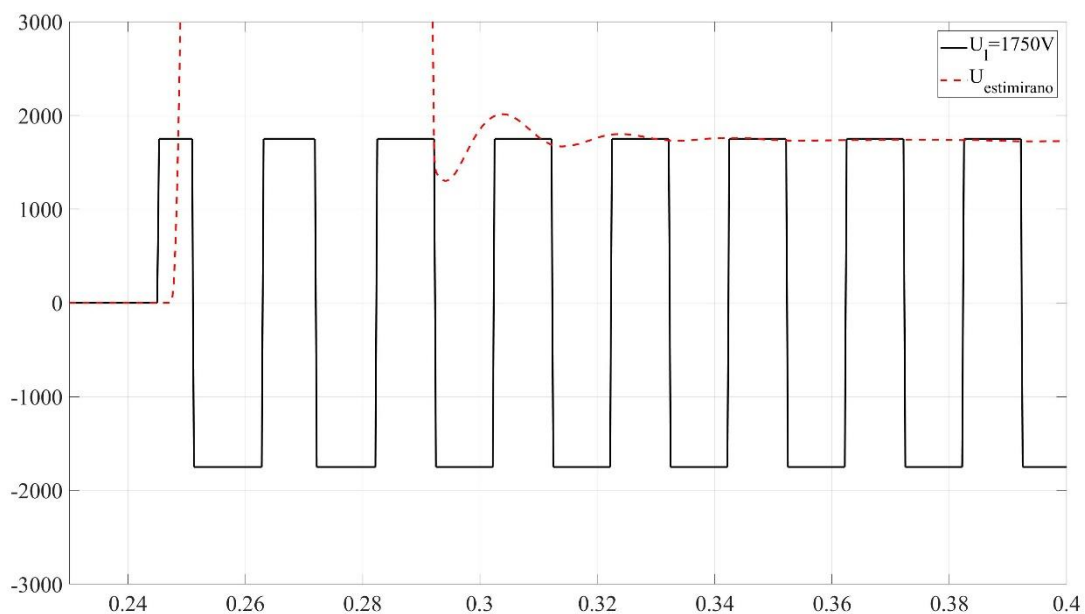
Slika 125 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1000 V$  (međufazni kvar)



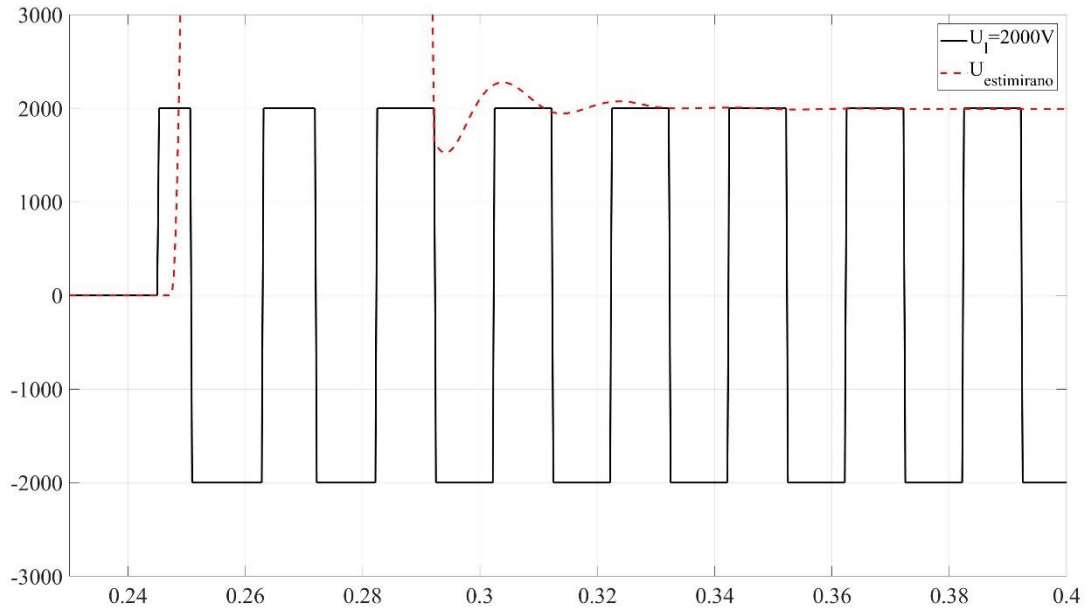
Slika 126 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1250 V$  (međufazni kvar)



Slika 127 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1500\text{ V}$  (međufazni kvar)



Slika 128 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=1750\text{ V}$  (međufazni kvar)



Slika 129 Estimirani napon luka – napon luka:  $U_l=2000 V$  (međufazni kvar)

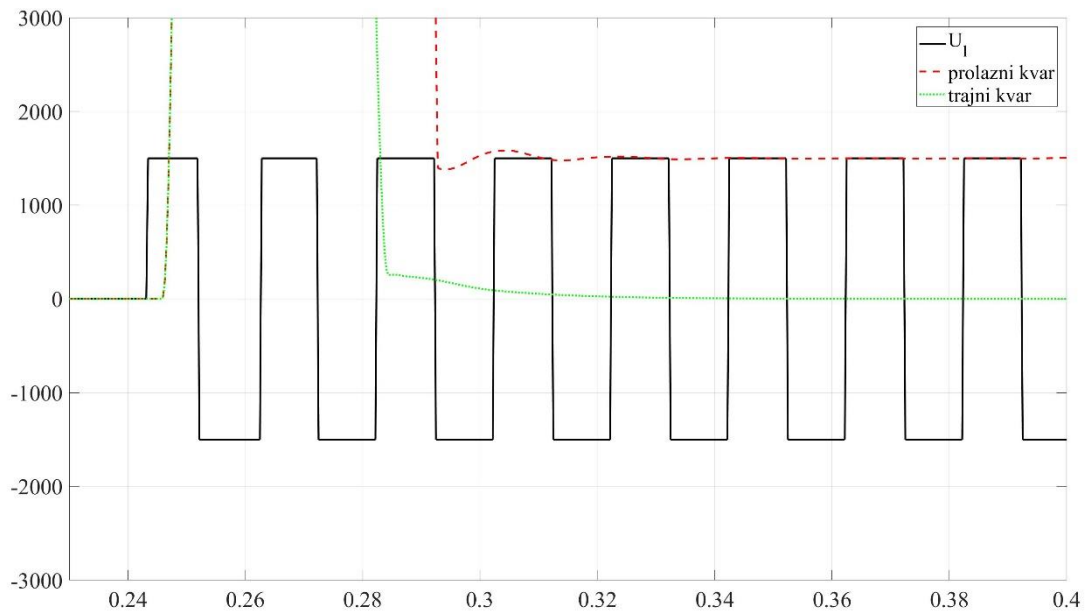
Tačnost algoritma pri različitim naponima luka dat je u Tabeli 11:

Tabela 11 Uticaj napona električnog luka na tačnost algoritma (dvofazni kvar)

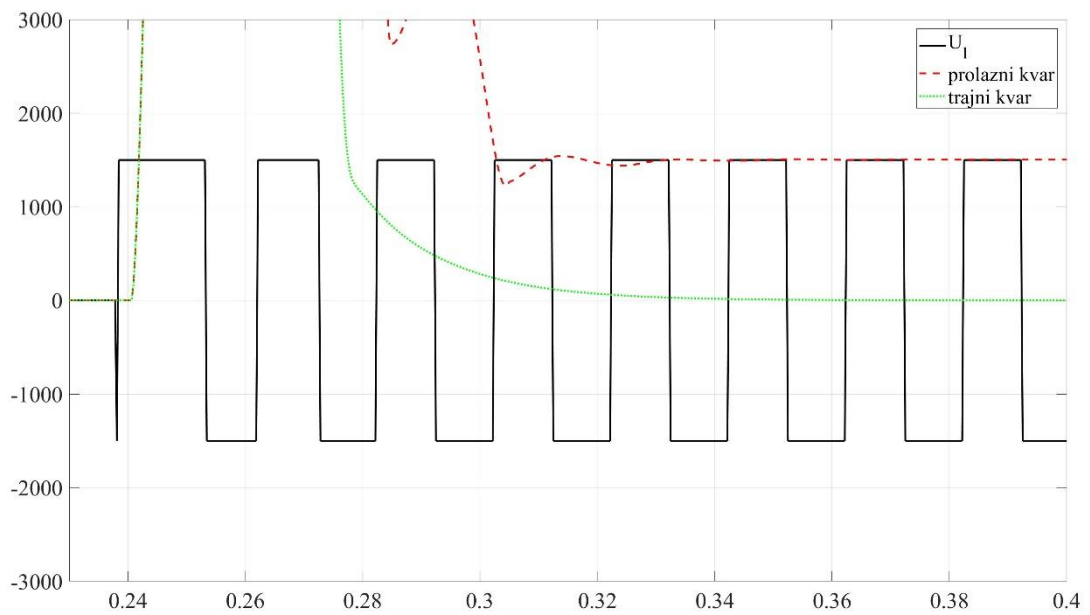
Napon luka (kV)	Greška (%)
1000	1.98
1250	1.16
1500	0.68
1750	2.71
2000	0.70

Sprovedena analiza ukazuje na visoku preciznost algoritma, bez obzira na simulirane vrednosti napona luka – u svim razmatranim slučajevima, greška algoritma ne prevazilazi 3 %.

**Analiza uticaja trenutka nastanka kvara**

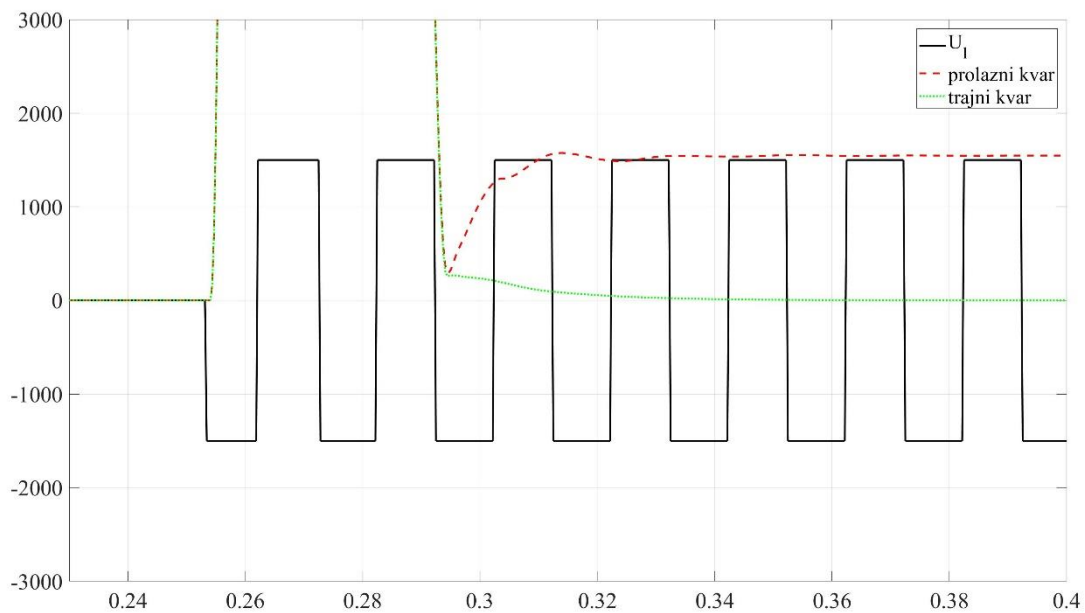


Slika 130 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.245$  s (međufazni kvar)

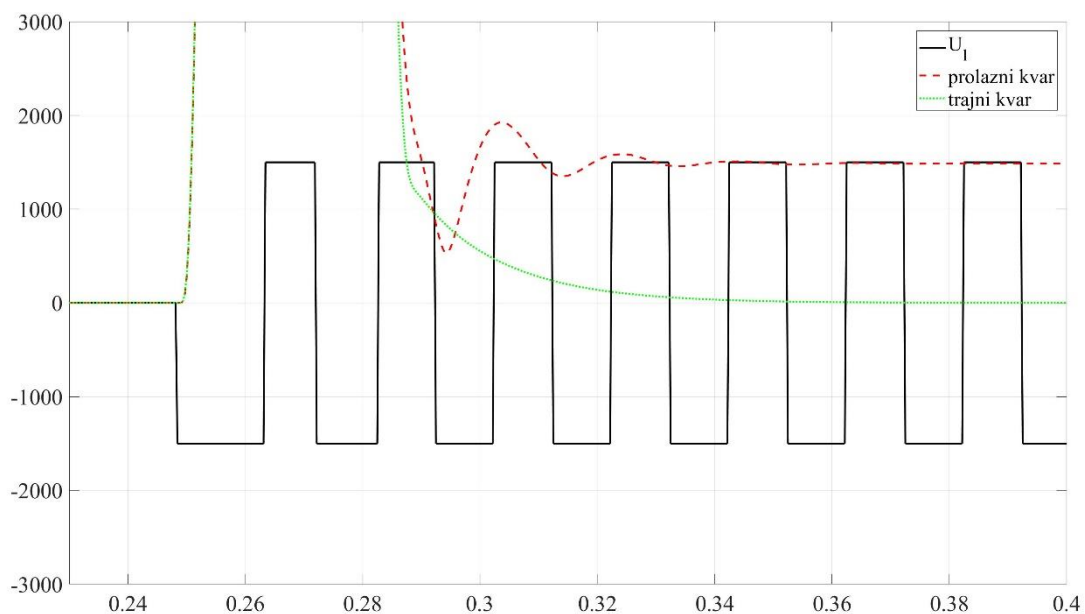


Slika 131 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.24$  s (međufazni kvar)





Slika 132 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.255$  s (međufazni kvar)



Slika 133 Estimirani napon luka – trenutak nastanka kvara:  $t_k=0.25$  s (međufazni kvar)

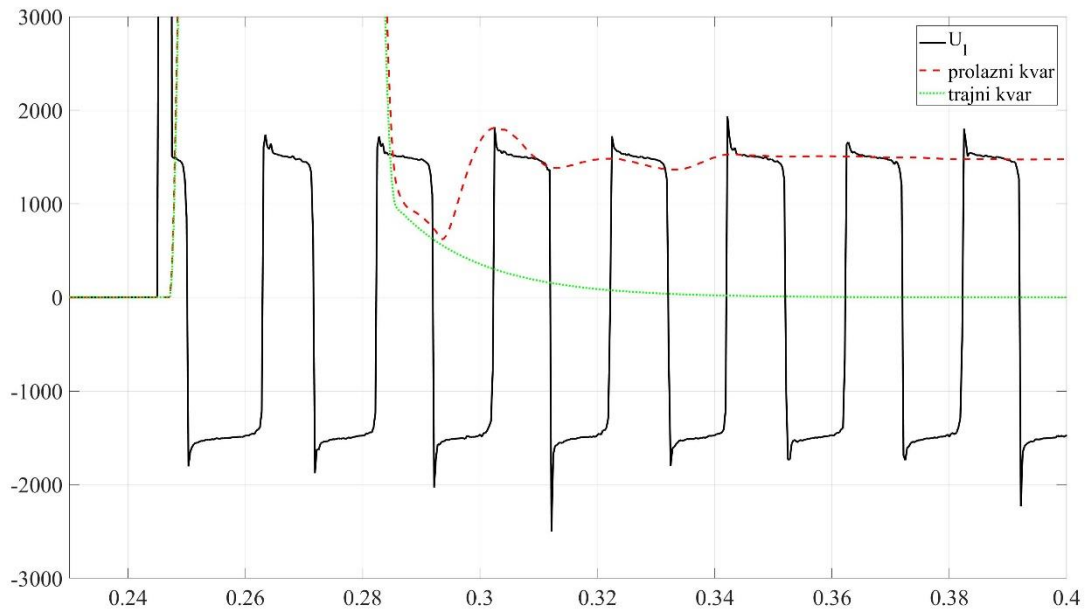
Brzina konvergencije algoritma u različitim analiziranim slučajevima data je u Tabeli 12.

Tabela 12 Uticaj jednosmerne komponente struje kvara na brzinu konvergencije algoritma (dvofazni kvar)

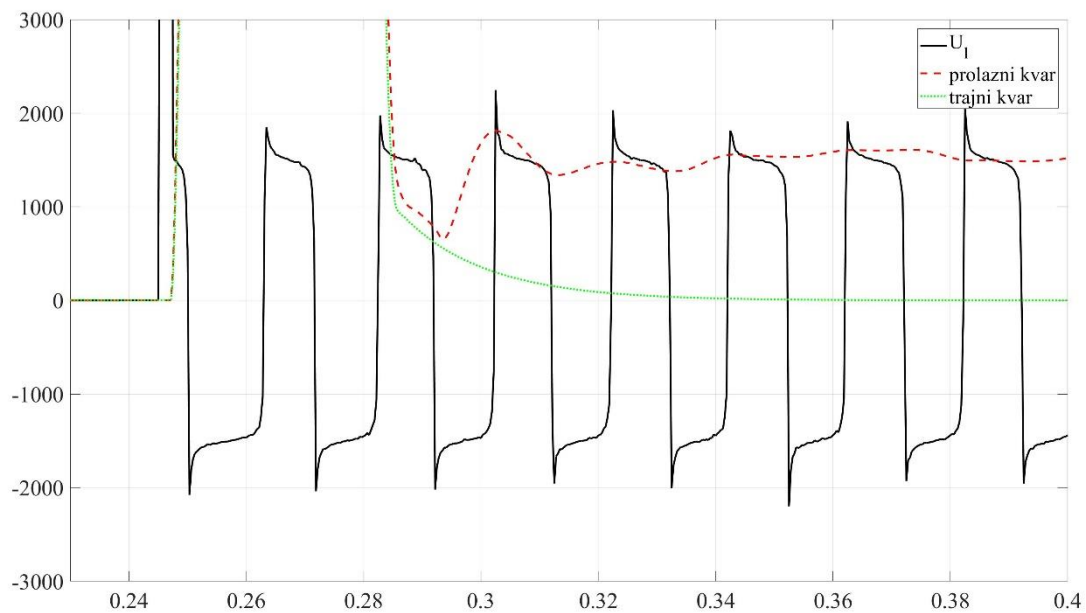
Trenutak kvara (ms)	DC komponenta prisutna (DA/NE)	Vreme konvergencije
0.243	NE	70 ms
0.238	DA	90 ms
0.2533	NE	70 ms
0.24825	DA	90 ms

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da trenutak nastanka kvara, odnosno prisustvo jednosmerne komponente u struji kvara, nema značajnijeg uticaja na brzinu konvergencije algoritma.

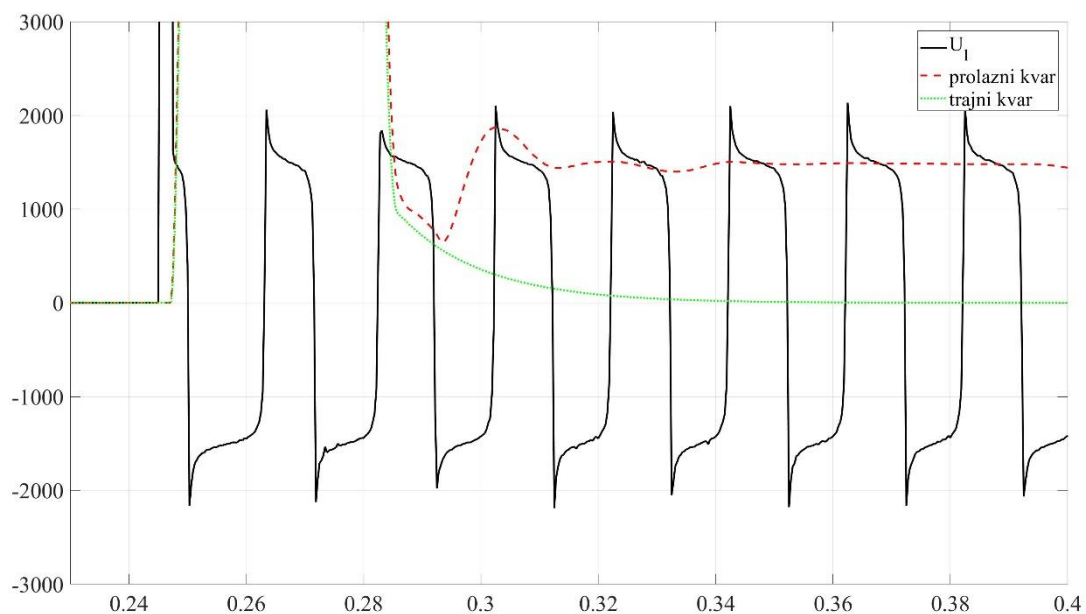
#### Analiza uticaja talasnog oblika napona luka



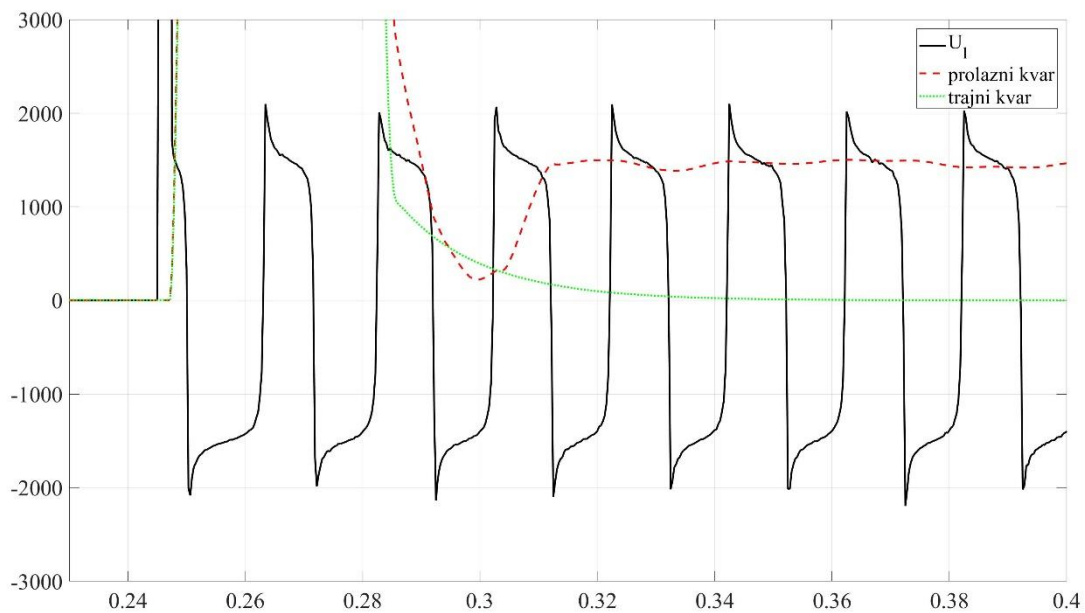
Slika 134 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=100 \mu s$  (međufazni kvar)



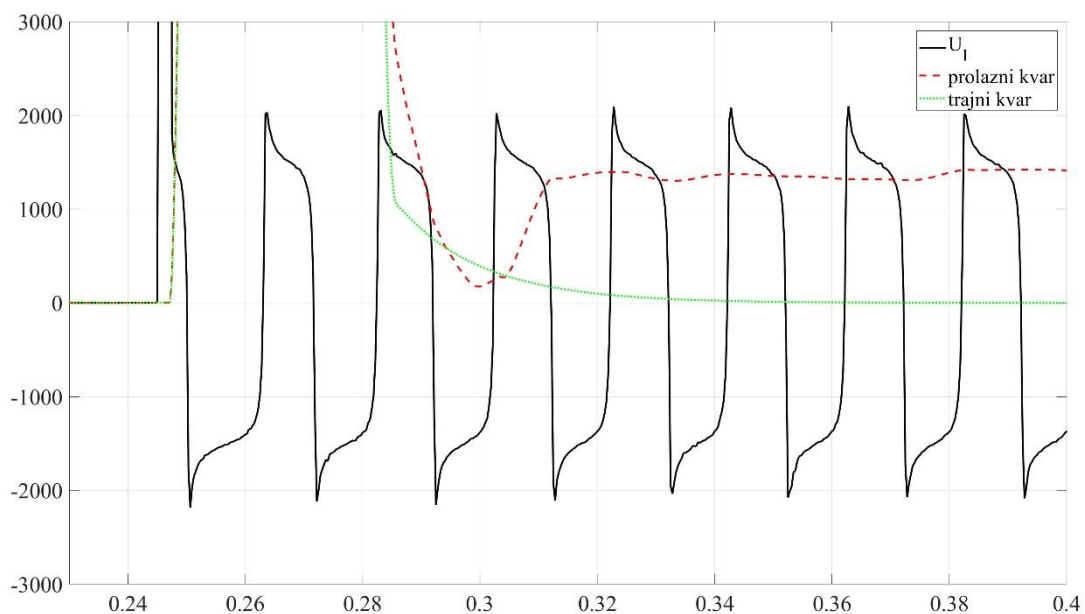
Slika 135 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=200 \mu s$  (međufazni kvar)



Slika 136 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=300 \mu s$  (međufazni kvar)



Slika 137 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=400 \mu s$  (međufazni kvar)



Slika 138 Estimirani napon luka – vremenska konstanta luka:  $\tau_c=500 \mu s$  (međufazni kvar)

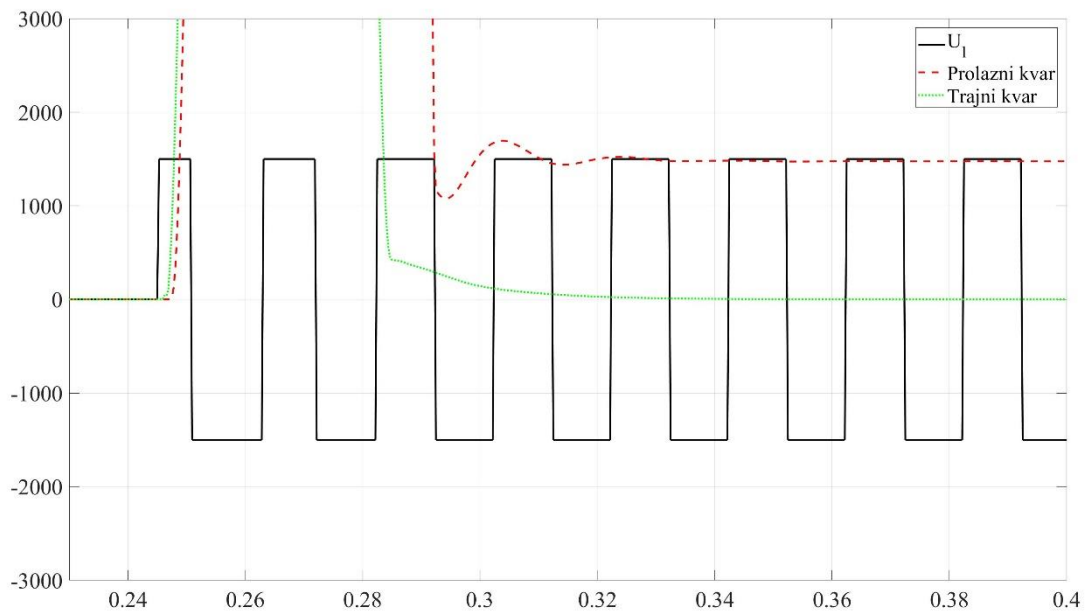
Tačnost algoritma pri različitim impedansama mreže prikazana je u Tabeli 13:

Tabela 13 Uticaj talasnog oblika napona luka na tačnost algoritma (dvofazni kvar)

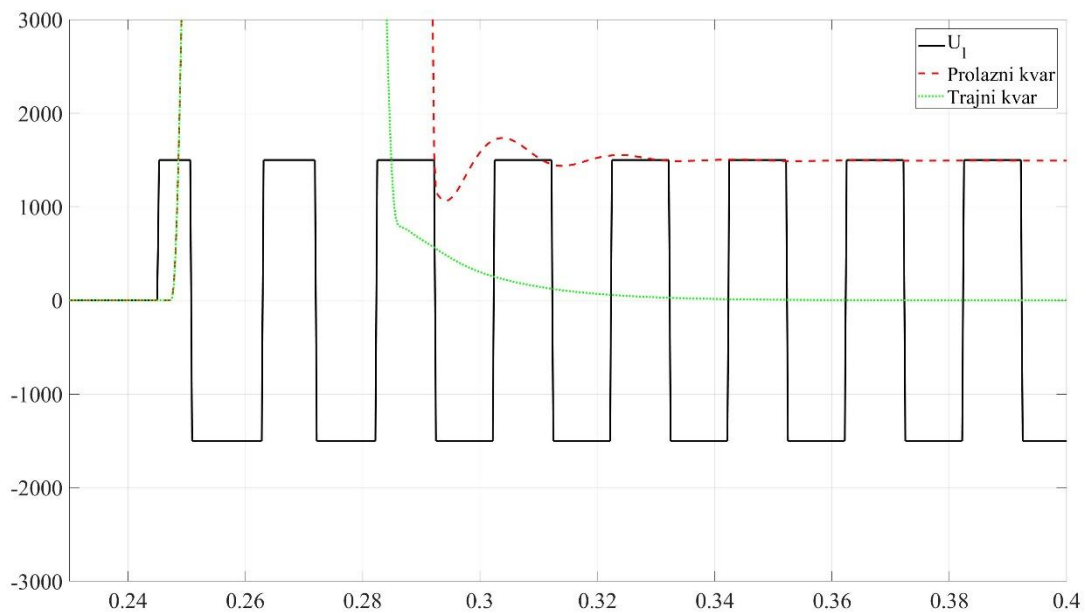
Vremenska konstanta luka $\tau_c$ ( $\mu\text{s}$ )	Greška (%)
100	4.21
200	7.26
300	10.27
400	12.69
500	14.04

Može se zaključiti da bez obzira na talasni oblik napona luka algoritam omogućava nedvosmislenu identifikaciju prirode kvara.

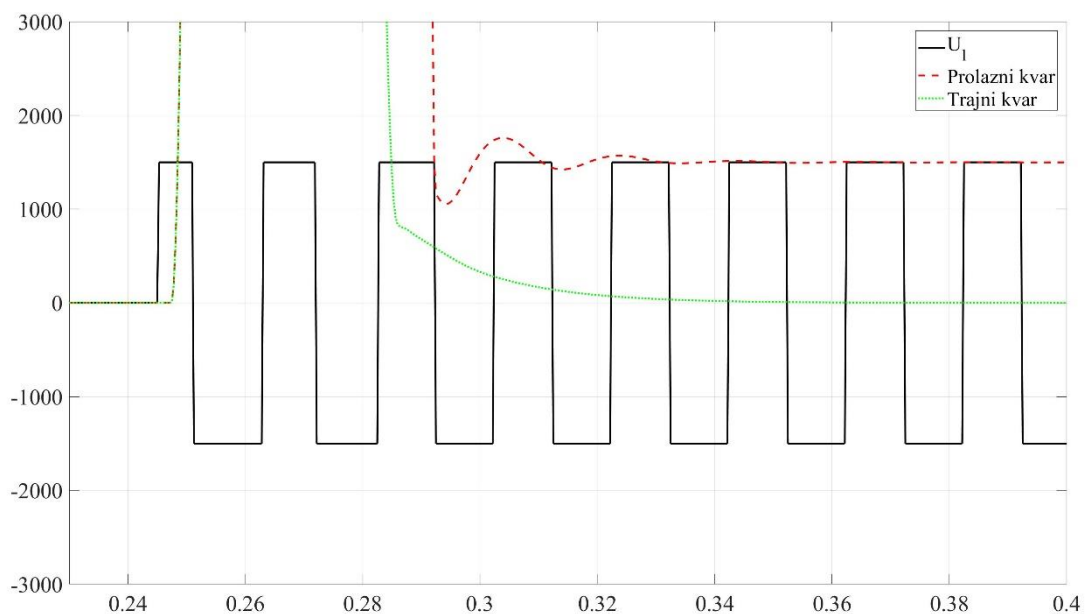
### Analiza uticaja impedanse mreže



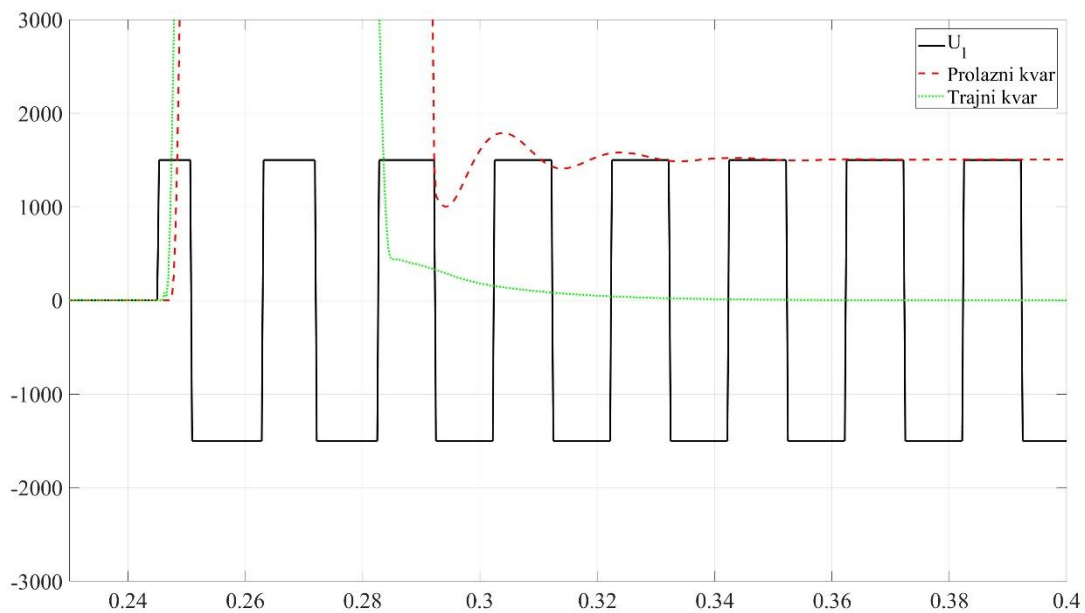
Slika 139 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=3.77 \Omega$  (međufazni kvar)



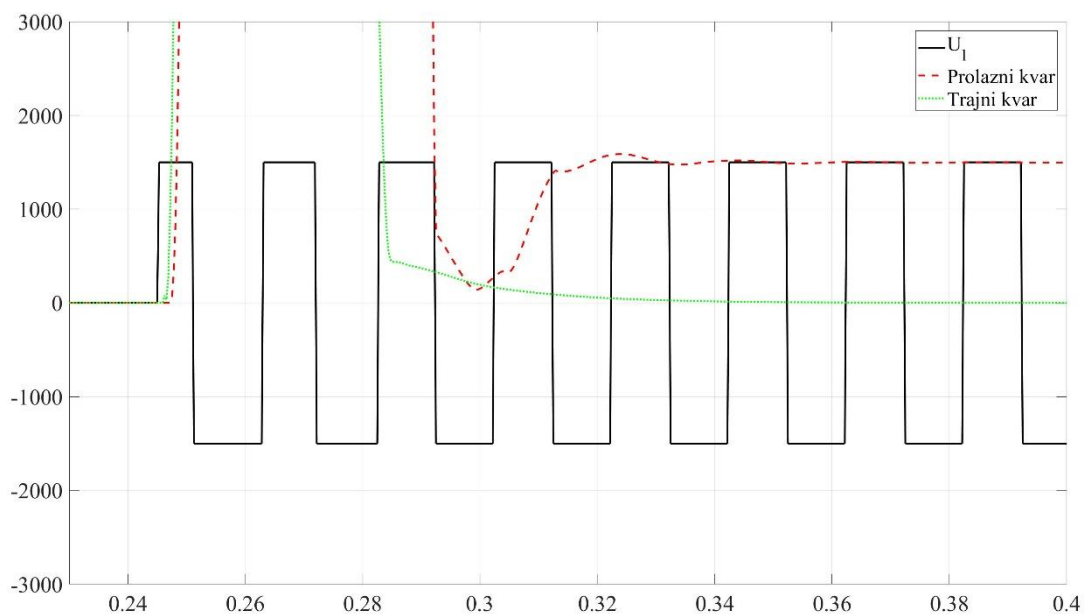
Slika 140 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=5.65 \Omega$  (međufazni kvar)



Slika 141 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=7.54 \Omega$  (međufazni kvar)



Slika 142 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=9.42 \Omega$  (međufazni kvar)



Slika 143 Estimirani napon luka – impedansa mreže:  $Z=11.31 \Omega$  (međufazni kvar)

Tačnost algoritma pri različitim impedansama mreže prikazana je u Tabeli 14:

*Tabela 14 Uticaj impedanse mreže na tačnost algoritma (dvofazni kvar)*

<b>Impedansa mreže (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Greška (%)</b>
7.55	0.68
5.65	0.51
3.77	1.68
9.42	0.61

Sprovedena analiza pokazuje da bez obzira na značajne varijacije u impedansi mreže, greška u estimaciji napona luka ne prevazilazi 2%.



## **7. Testiranje algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora na snimcima kvara**

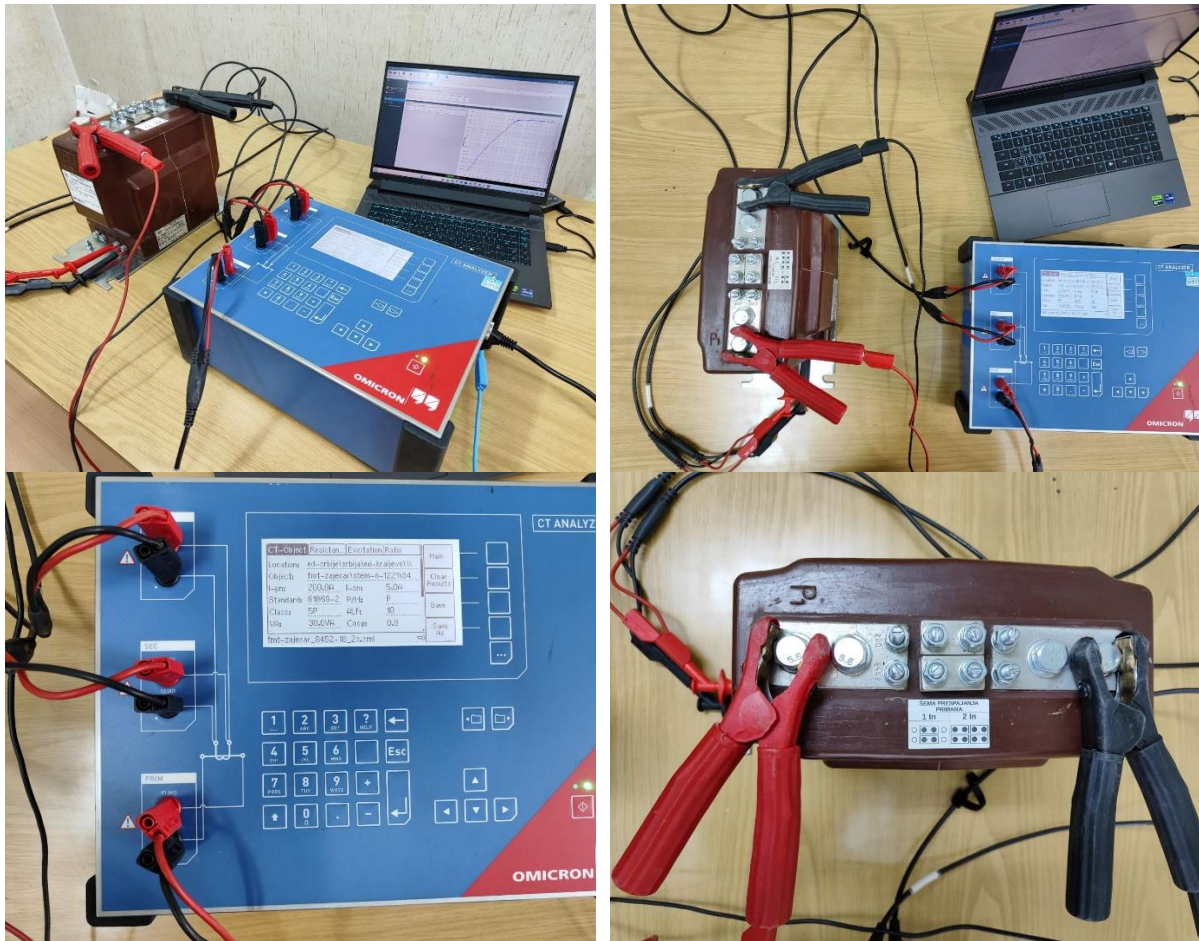
Testiranje algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora koji je izložen u poglavlju 5, izvršeno je na signalu preuzetom sa releja u pogonu. Snimak kvara pri kome je došlo do zasićenja strujnog transformatora preuzet je sa releja instaliranom na 10 kV izvodu u okviru sistema Elektroprivrede Srbije.

Osnovne informacije o releju sa koga je preuzet snimak date su u nastavku:

- Pozicija releja: TS 35/10 kV Jovac, izvod Kamenica
- Naponski nivo: 10 kV
- Proizvođač releja: INGEPAC
- Tip releja: PL300
- Prenosni odnos strujnog transformatora: 200/5 A

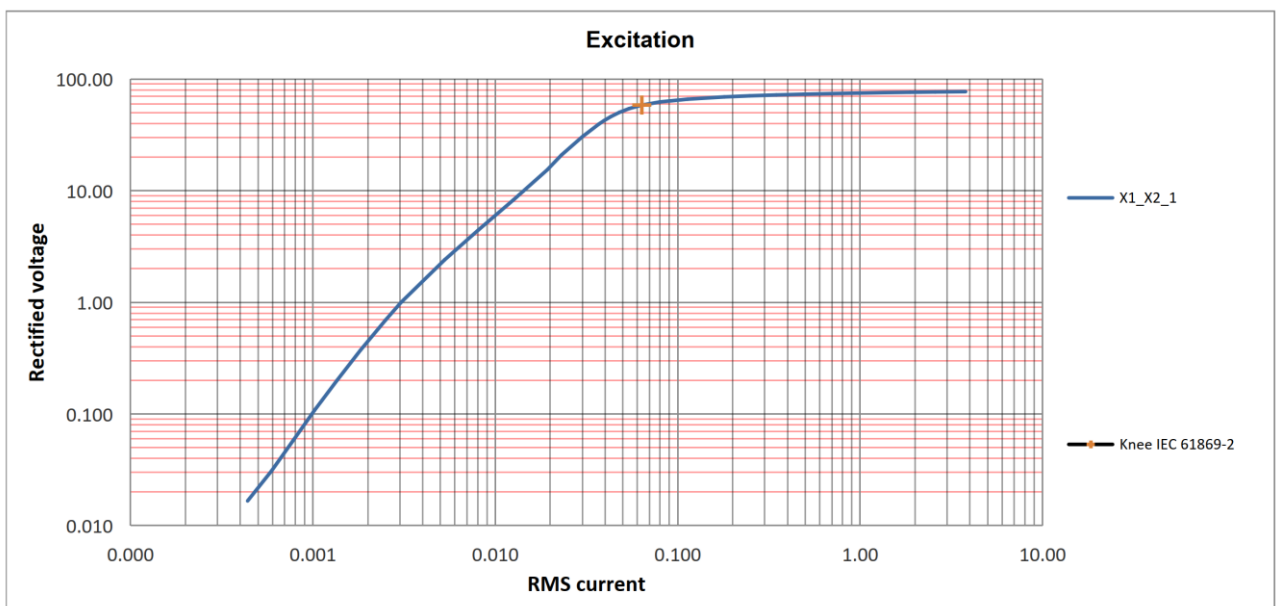
Snimci su sa releja preuzeti u comtrade formatu, a zatim je nad njima primenjen algoritam za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora korišćenjem MATLAB programskog paketa.

Primena predloženog algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora zahteva poznavanje karakteristika strujnog transformatora: krive magnećenja i parametara ekvivalentne šeme. Imajući u vidu da bi snimanje karakteristika strujnog transformatora na izvodu Kamenica zahtevalo isključivanje konzuma čitavog izvoda, izvršeno je snimanje karakteristika drugog strujnog transformatora istih karakteristika kao i strujni transformator na posmatranom izvodu (isti prenosni odnos, isti proizvođač, ista godina proizvodnje). Snimanje je vršeno korišćenjem uređaja CT ANALYZER kompanije OMICRON. Na Slici 144 je prikazan postupak snimanja karakteristika strujnog transformatora.



Slika 144 Snimanje karakteristika strujnog transformatora

Snimljena kriva magnećenja strujnog transformatora prikazana je na Slici 145:



Slika 145 Kriva magnećenja ispitivanog strujnog transformatora

Izveštaj o parametrima strujnog transformatora koji je generisan uređajem CT ANALYZER dat je na Slici 146.

Asset		Object		Location	
Ipn	200.0 A	Manufacturer	fmt-zajecar	Company	ed-srbije
Isn	5.0 A	Type	stem-n-1221	Country	srbija
Rated burden	30.0 VA /0.80	Serial number	8452-18	Station	ed-kraljevo
Operating burden	30.0 VA /0.80	Core	2s	Feeder	
Standard	IEC 61869-2	Tap		Phase	
Application	Protection	Optional		IEC-ID	
Class	5P	Comment			
Frequency	50.0 Hz				
Rct max					
ALF	10.0				
Ts					

Secondary winding resistance		Primary winding resistance	
R-meas (23.0 °C)	0.226 Ω	R-meas (23.0 °C)+Rlead	0.226 Ω
R-ref (75.0 °C)	0.272 Ω	R-ref (75.0 °C)+Rlead	0.272 Ω

Burden			
Burden	cos φ:	Z	V-meas I-meas

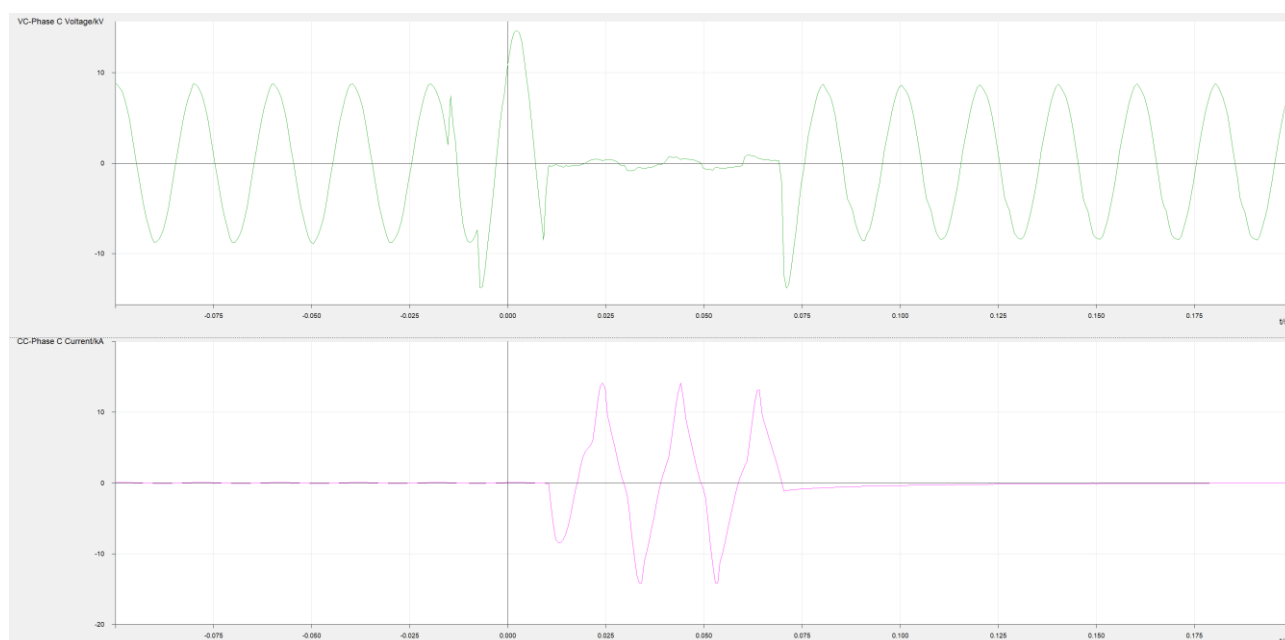
Excitation					
Ls	0.000631 H	Lm	3.494837 H	Results at rated burden	
Kr	91.36 %			ALF	> 10.95
Standard	IEC 61869-2		ALFi	10.76	Results at operating burden
V-kn	58.300 V	I-kn	0.0635 A	eci (@ ALF=10)	0.370 %
				Ts	2.837 s

Ratio						
Turns ratio	39.7541	Results at rated burden		Results at operating burden		
et	-0.6148 %	Ratio	200.0 : 5.0201	Ratio	200.0 : 5.0201	
Polarity	OK	ε	0.4019 % Δφ	1.86 min	ε	0.4019 % Δφ
		εc	0.4056 %		εc	0.4056 %

Slika 146 Parametri ispitivanog strujnog transformatora – izveštaj generisan uređajem CT ANALYZER

Kriva magnećenja i parametri strujnog transformatora koji su dobijeni ispitivanjem, korišćeni su kao ulazni podaci za predloženi algoritam.

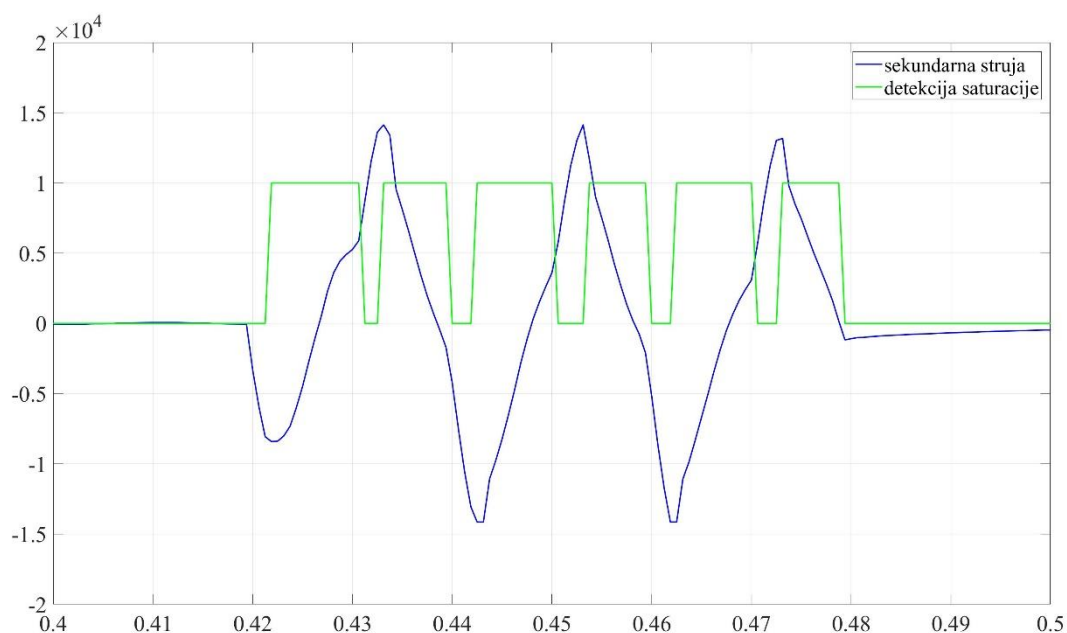
Na Slici 147 prikazan je snimak struje kvara usled koje je došlo do zasićenja strujnog transformatora. Na istoj slici prikazan je i napon u posmatranoj fazi. Na slici su prikazane primarne veličine.



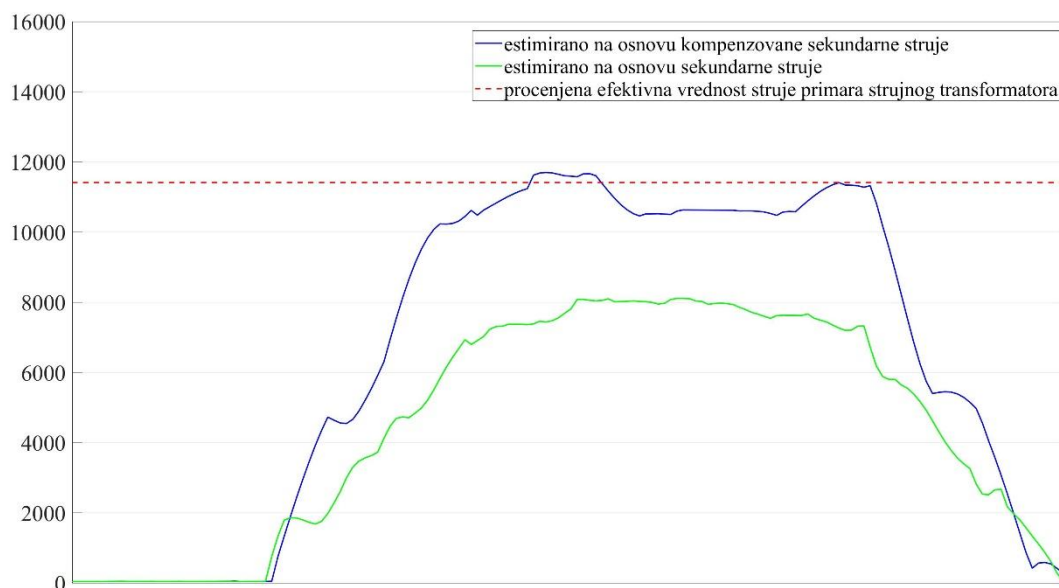
Slika 147 Naponski i strujni signal: TS Jovac – Izvod Kamenica

Imajući u vidu da talasni oblik struje kvara značajno odstupa od prostoperiodičnog oblika može se zaključiti da je strujni transformator ušao u zasićenje.

Na Slici 148 prikazan je rad algoritma za detekciju zasićenja strujnog transformatora, dok je na Slici 149 prikazana efektivna vrednost struje estimirana na osnovu kompenzovane struje sekundara strujnog transformatora. Pored toga, na istoj slici prikazana je i efektivna vrednost struje koja je estimirana na osnovu originalnog (nekompenzovanog) strujnog signala sa sekundara strujnog transformatora.



Slika 148 Rad algoritma za detekciju zasićenja strujnog transformatora (kvar na izvodu Jovac - Kamenica)



Slika 149 Rad algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora (kvar na izvodu Jovac - Kamenica)

Kako bi se mogla izvršiti validacija algoritma potrebno je poznavati stvarnu vrednost struje kvara, odnosno vrednost struje na primaru strujnog transformatora. Imajući u vidu da vrednost primarne struje nije na raspolaganju, izvršena je estimacija stvarne vrednosti struje kvara na osnovu zdravog dela strujnog signala. Estimacija je izvršena primenom metode najmanjih kvadrata na intervalima bez zasićenja strujnog transformatora. Na ovaj način utvrđeno je da amplituda struje na primaru strujnog transformatora iznosi 16.14 kA, odnosno da je efektivna vrednost posmatrane struje kvara oko 11.41 kA (ova vrednost takođe je prikazana na Slici 149).

Može se zaključiti da se primenom predloženog algoritma postiže kompenzacija zasićenja strujnog transformatora. Razlika između stvarne efektivne vrednosti struje kvara i efektivne vrednosti struje kvara koja je estimirana na osnovu kompenzovanog signala, značajno je niža nego razlika između stvarne efektivne vrednosti struje kvara i efektivne vrednosti struje kvara koja je estimirana na osnovu nekompensovane struje sa sekundara strujnog transformatora.

## 8. Testiranje algoritma za detekciju električnog luka na snimcima kvara

U okviru ovog poglavlja izvršeno je testiranje predloženog algoritma za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima koji je prikazan u poglavlju 6. Testiranje je izvršeno na signalima preuzetim sa releja u pogonu koji su instalirani na realnim vodovima (u okviru sistema Elektromreža Srbije).

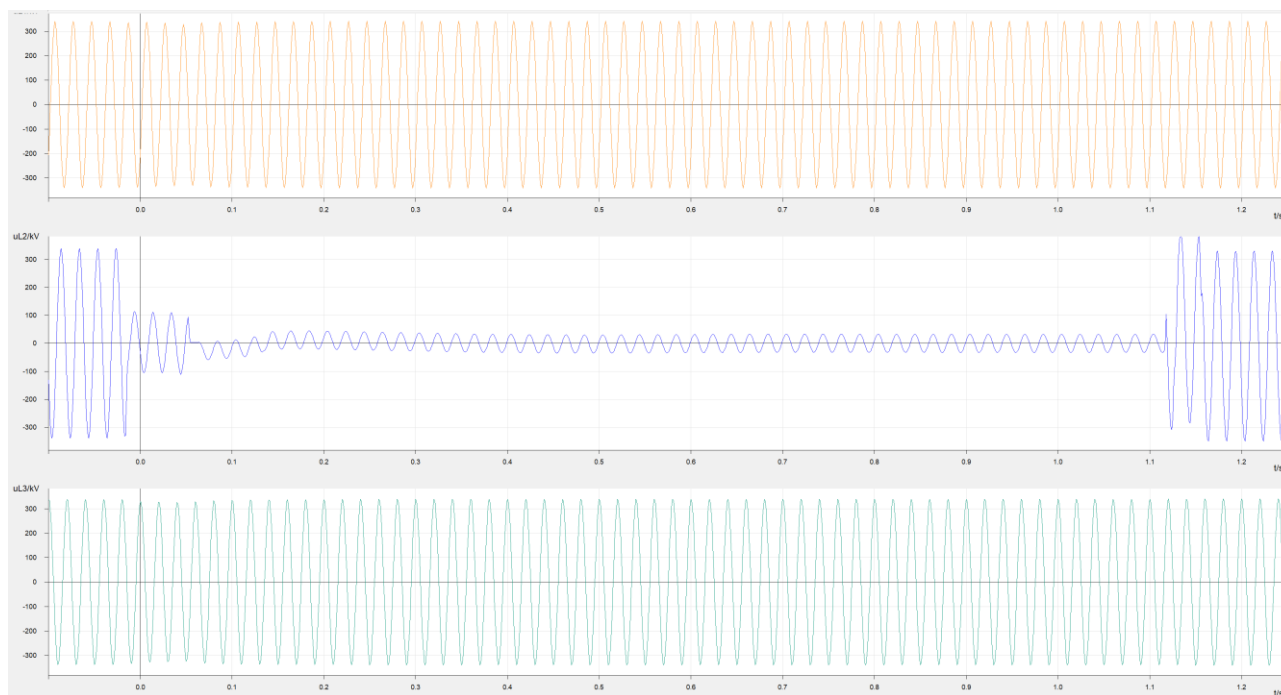
Snimci kvarova preuzeti su sa releja instaliranim na sledećim vodovima:

- TS Novi Sad 3 – RP Mladost:
  - Naponski nivo: 400 kV
  - Pozicija releja: TS Novi Sad 3
  - Dužina dalekovoda: 92.38 km
- TS Bor 2 – TS Niš 2:
  - Naponski nivo: 400 kV
  - Pozicija releja: TS Bor 2
  - Dužina dalekovoda: 98.71 km
- TS Beograd 3 – TS Beograd 16:
  - Naponski nivo: 110 kV
  - Pozicija releja: TS Beograd 3
  - Dužina dalekovoda: 4.36 km

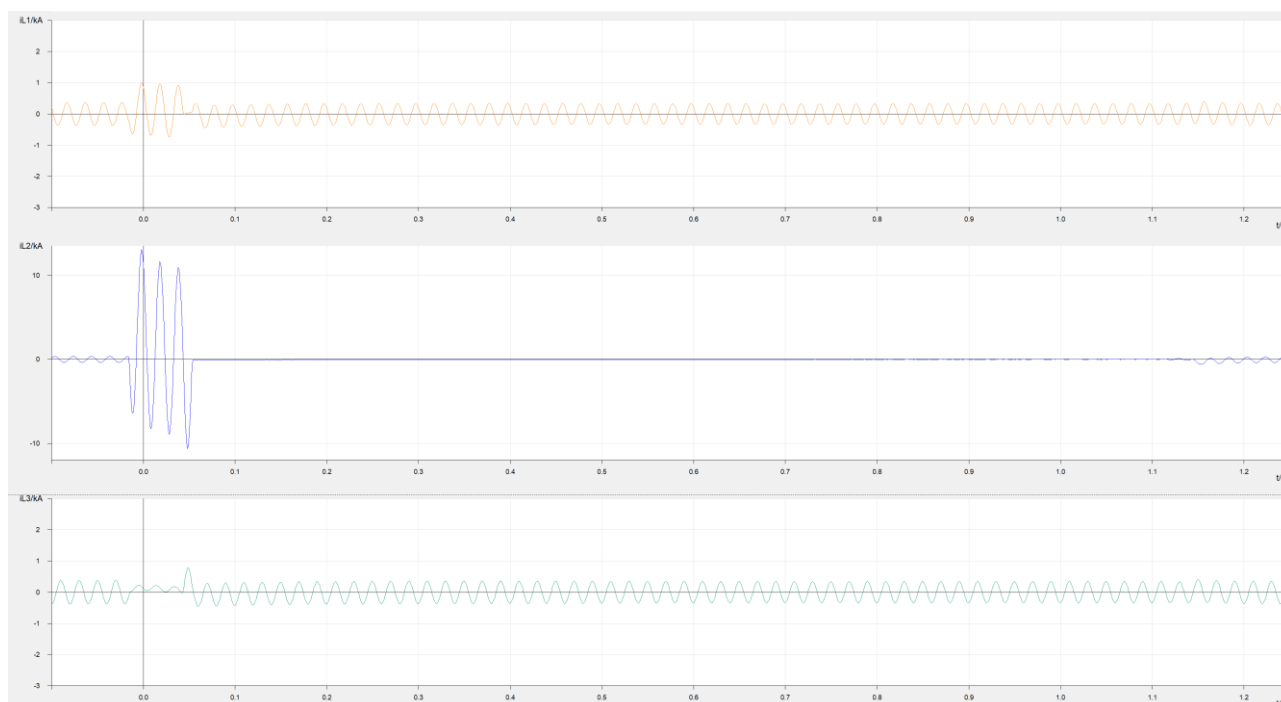
Signali su preuzeti sa releja kompanije SIEMENS. Za očitavanje i prikazivanje preuzetih signala korišćen je softver SIGRA 4. Prikazani snimci izvezeni su u comtrade formatu i nad njima je izvršen predloženi algoritam pomoću programskog paketa MATLAB.

### 8.1 Snimak kvara na dalekovodu TS Novi Sad 3 – RP Mladost

Snimak kvara preuzet je sa distantnog releja (proizvođač: SIEMENS; tip: 7SA612), instaliranog u TS Novi Sad 3 (na 400 kV dalekovodu TS Novi Sad 3 – RP Mladost). Na Slici 150 prikazani su naponi sve tri faze, dok su na Slici 151 prikazane fazne struje. Na slikama su prikazane primarne veličine. Nulti trenutak na vremenskoj osi odgovara trenutku pobuđivanja releja.



Slika 150 Naponski signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Novi Sad 3 – RP Mladost



Slika 151 Strujni signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Novi Sad 3 – RP Mladost

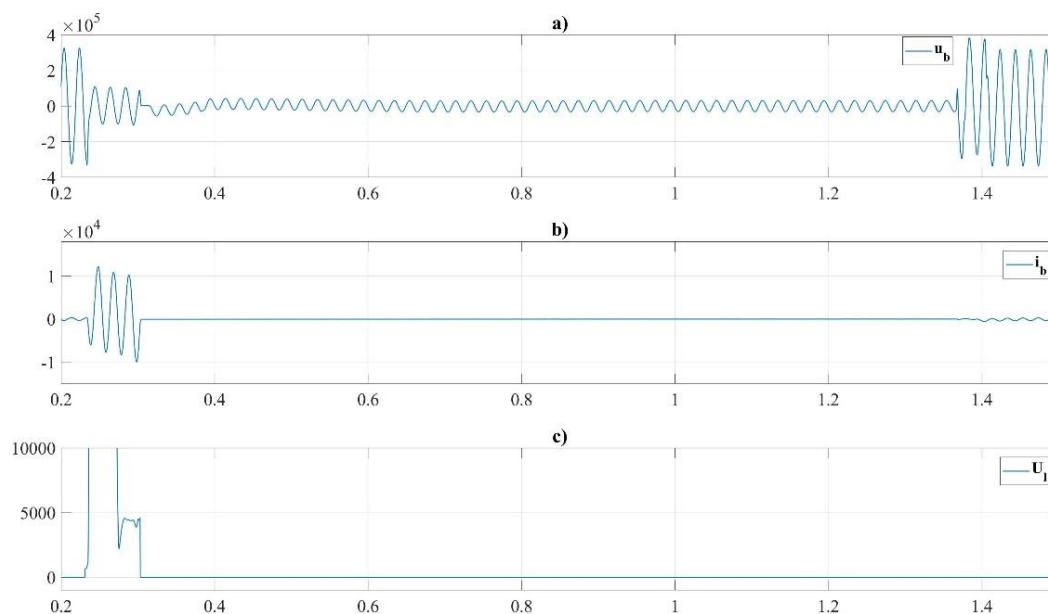
Analizom prikazanih signala može se uočiti sledeće:

- u trenutku  $t_k = -15.6$  ms dolazi do jednofaznog kvara u fazi B (struja u fazi B naglo raste; dolazi do propada napona u fazi B; naponi i struje u fazama A i C se veoma malo menjaju),
- u trenutku  $t_l = 55$  ms dolazi do otvaranja prekidača u fazi B (struja u fazi B opada na nulu),

- u trenutku  $t_2=1118$  ms dolazi do ponovnog zatvaranja prekidača u fazi B. Usled toga, dolazi do ponovnog uspostavljanja radne struje u fazi B.

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da je u posmatranom slučaju došlo do prolaznog kvara (kvar sa električnim lukom), imajući u vidu da nakon beznaponske pauze, vod nastavlja sa normalnim radom.

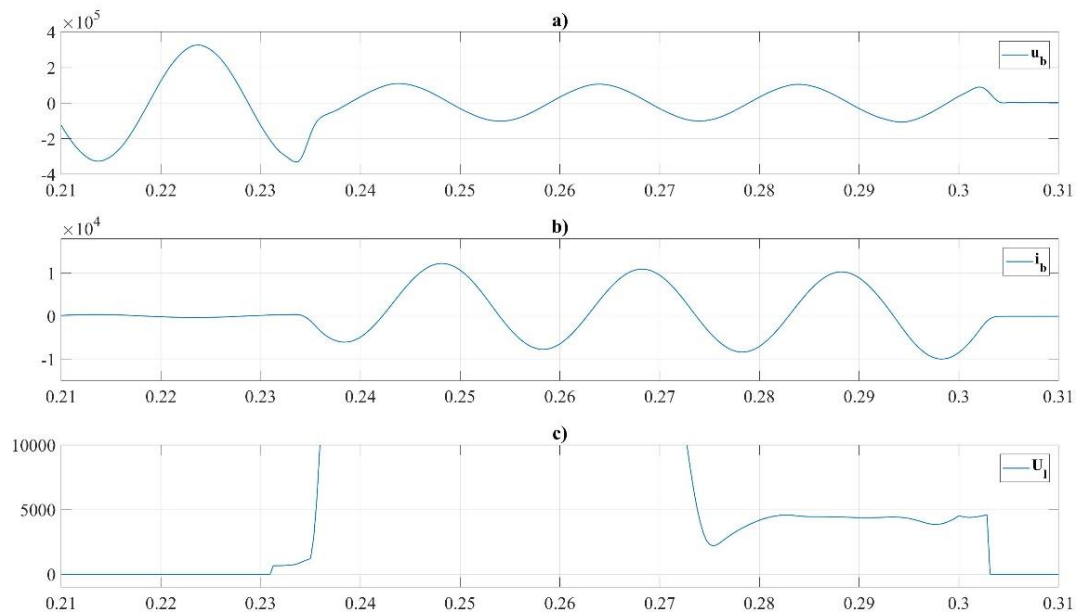
Na Slici 152 prikazan je rad algoritma za detekciju električnog luka korišćenjem isključivo naponskih signala: a) napon faze B; b) struja faze B; c) estimirani napon luka.



Slika 152 Rad algoritma za detekciju električnog luka (prikaz celog APU ciklusa): a) napon faze u kvaru; b) struja faze u kvaru; c) estimirani napon luka

Slika 153 prikazuje rad algoritma u periodu od trenutka nastanka kvara do trenutka otvaranja prekidača: a) napon faze B; b) struja faze B; c) estimirani napon luka.



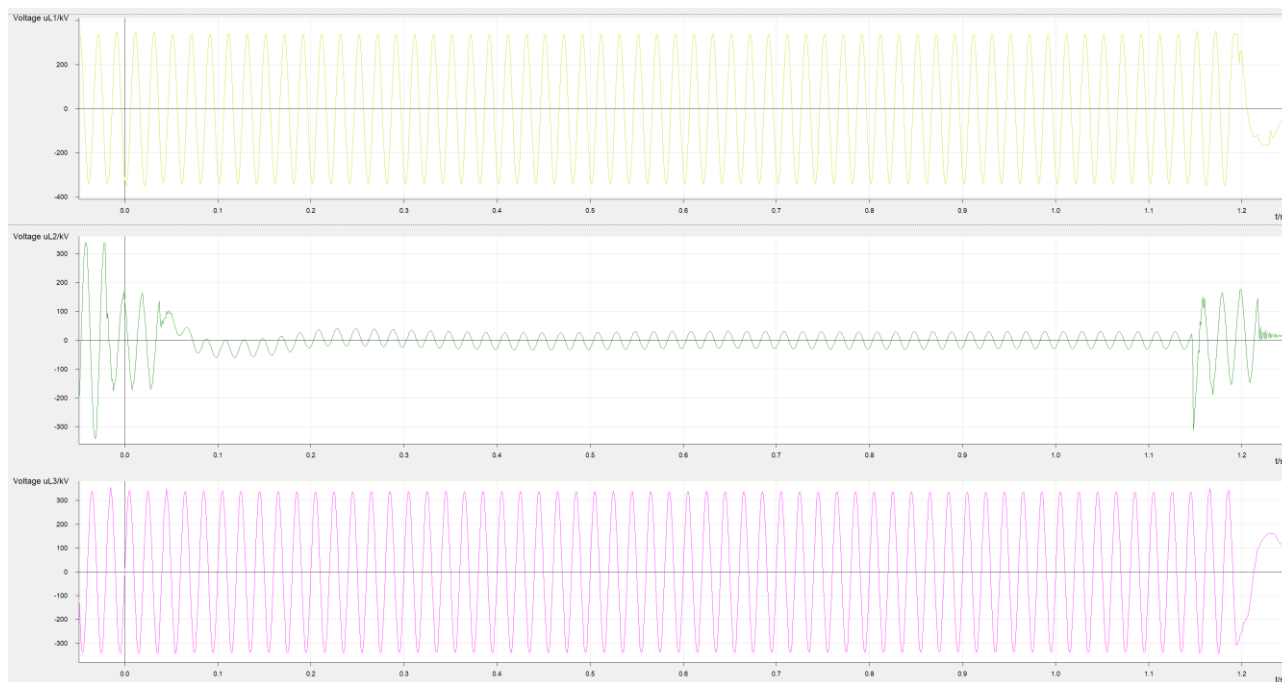


Slika 153 Rad algoritma za detekciju električnog luka (prikaz intervala kvara): a) napon faze u kvaru; b) struja faze u kvaru; c) estimirani napon luka

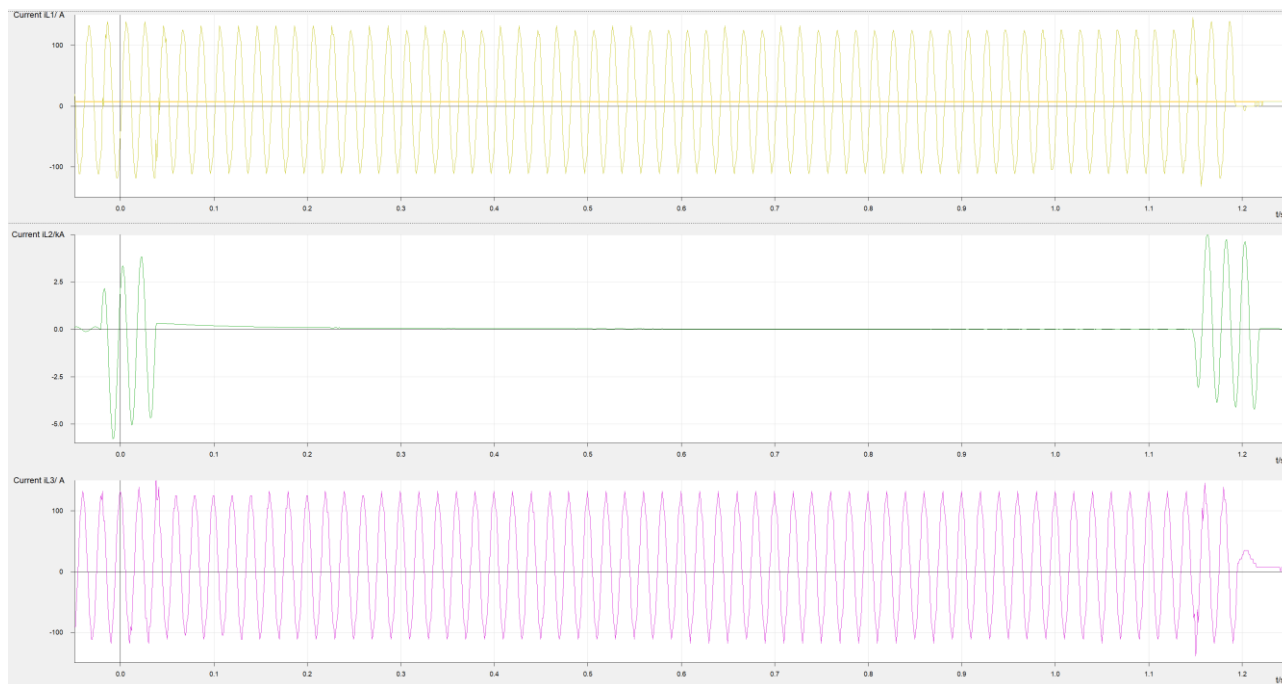
Na osnovu Slike 153, c), može se zaključiti da nakon prelaznog perioda potrebnog za konvergenciju, algoritam uspešno estimira napon luka. Estimirana vrednost napona luka iznosi približno 4500V što omogućava nedvosmislenu indentifikaciju prirode kvara.

## 8.2 Snimak kvara na dalekovodu TS Bor 2 – TS Niš 2

Snimak trajnog kvara preuzet je sa distantnog releja (proizvođač: SIEMENS; tip: 7SA612), instaliranog u TS Bor 2 (na 400 kV dalekovodu TS Bor 2 – TS Niš 2). Na Slici 154 prikazani su naponi sve tri faze, dok su na Slici 155 prikazane fazne struje. Na slikama su prikazane primarne veličine. Nulti trenutak na vremenskoj osi odgovara trenutku pobuđivanja releja.



Slika 154 Naponski signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Bor 2 – TS Niš 2



Slika 155 Strujni signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Bor 2 – TS Niš 2

Analizom prikazanih signala može se uočiti sledeće:

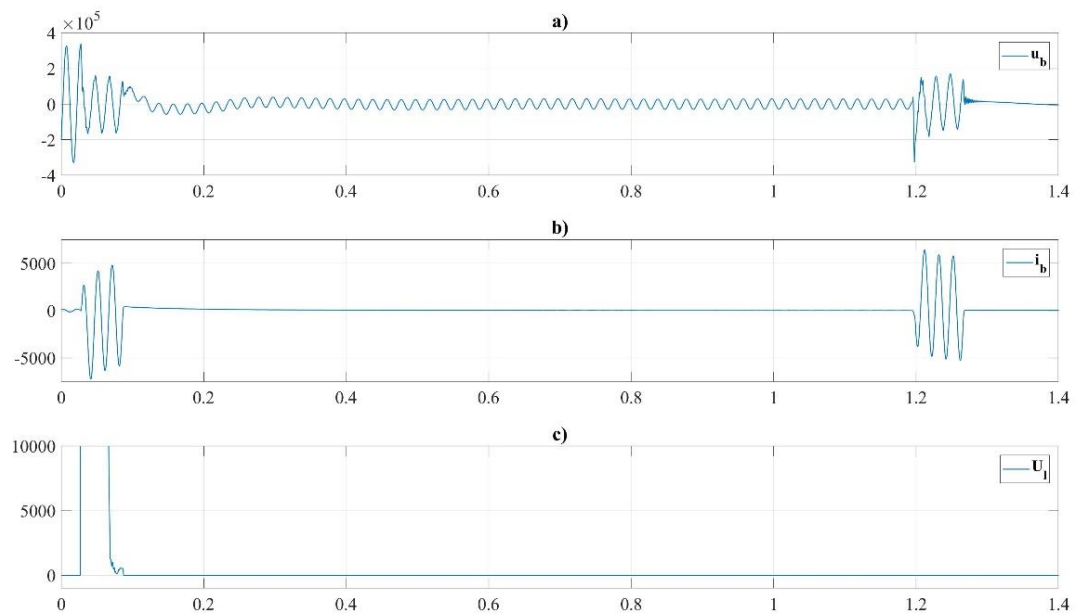
- u trenutku  $t_k = -20$  ms dolazi do jednofaznog kvara u fazi B (struja u fazi B naglo raste; dolazi do propada napona u fazi B; naponi i struje u fazama A i C se veoma malo menjaju),
- u trenutku  $t_l = 40$  ms dolazi do otvaranja prekidača u fazi B (struja u fazi B opada na nulu),
- u trenutku  $t_2 = 1145$  ms dolazi do ponovnog zatvaranja prekidača u fazi B,

- u trenutku  $t_3=1219$  ms dolazi do ponovnog otvaranja prekidača u fazi B.

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da je u posmatranom slučaju došlo do trajnog kvara (kvar bez električnog luka), imajući u vidu da nakon beznaponske pauze, vod nije prihvatio napon tj. da je došlo do ponovnog uključanja na kvar.

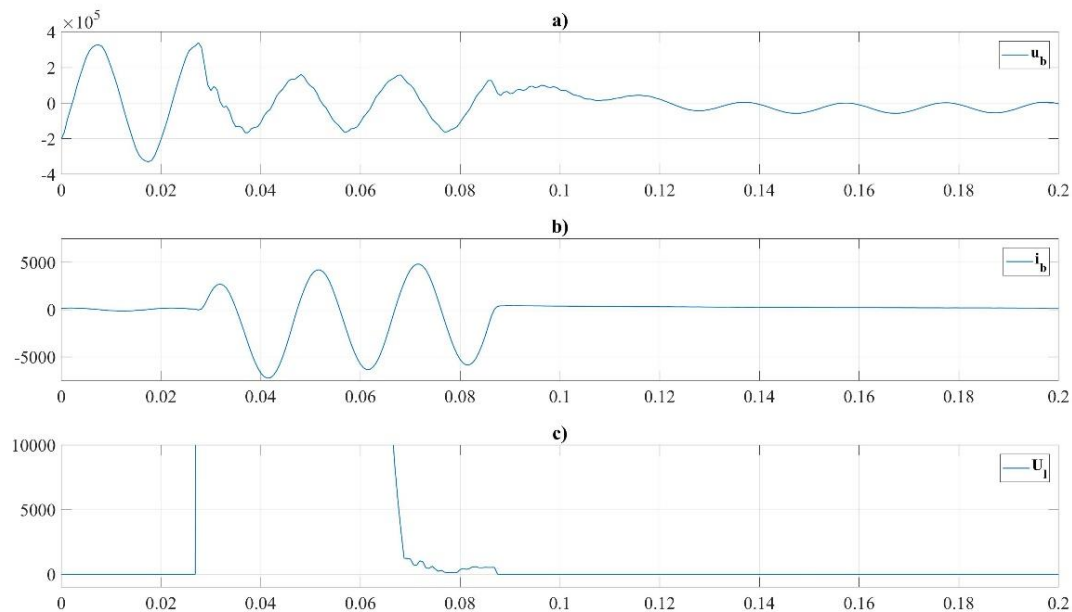
Potrebno je primetiti da tokom beznaponske pauze, napon u fazi pogođenoj kvarom nije jednak nuli. Ovo se može tumačiti na sledeći način: prikazani snimak ne reprezentuje klasičan metalni kvar, već je u posmatranom slučaju došlo do proboja izolatora koji je rezultirao pojavom jednofaznog kvara. Nakon isključenja prekidača (tokom beznaponske pauze) dolazi do privremenog otklanjanja kvara, što usled kapacitivne sprege faze pogođene kvarom sa zdravim fazama dovodi do pojave napona tokom beznaponske pauze. Nakon ponovnog zatvaranja prekidača, dolazi do ponovnog proboja izolatora, što rezultira ponovnom pojavom kvara.

Na Slici 156 prikazan je rad algoritma za detekciju električnog luka korišćenjem isključivo naponskih signala: a) napon faze B; b) struja faze B; c) estimirani napon luka.



Slika 156 Rad algoritma za detekciju električnog luka (prikaz celog APU ciklusa): a) napon faze u kvaru; b) struja faze u kvaru; c) estimirani napon luka

Slika 157 prikazuje rad algoritma u periodu od trenutka nastanka kvara do trenutka otvaranja prekidača: a) napon faze B; b) struja faze B; c) estimirani napon luka.

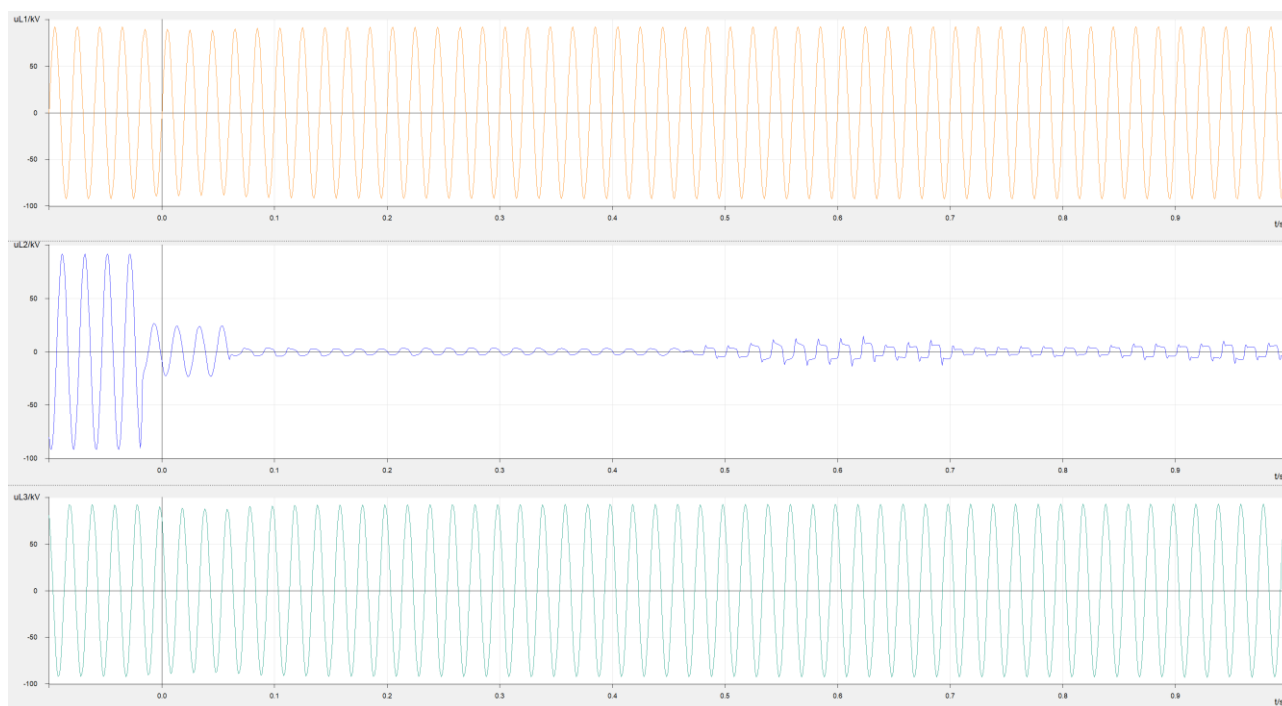


Slika 157 Rad algoritma za detekciju električnog luka (prikaz intervala kvara): a) napon faze u kvaru; b) struja faze u kvaru; c) estimirani napon luka

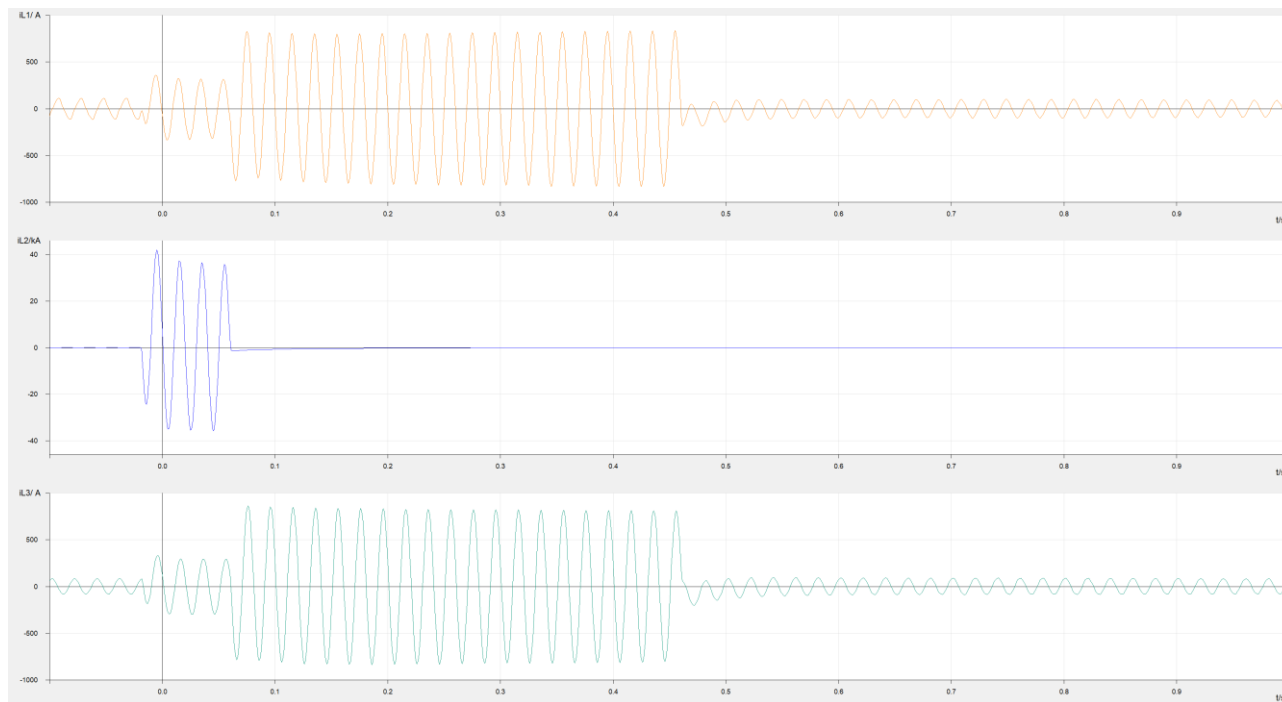
Na osnovu Slike 157, c) može se zaključiti da nakon prelaznog perioda potrebnog za konvergenciju, algoritam estimira napon luka od oko 530 V. Poređenjem ovako estimirane vrednosti (tokom trajnog kvara) sa estimiranim naponom luka tokom prolaznog kvara (Slika 153) može se zaključiti da prikazani algoritam omogućava nedvosmislenu identifikaciju prirode kvara.

## 8.3 Snimak kvara na dalekovodu TS Beograd 3 – TS Beograd 16

Snimak kvara preuzet je sa distantnog releja (proizvođač: SIEMENS, tip: 7SA611), instaliranog u TS Beograd 3 (na 110 kV dalekovodu TS Beograd 3 – TS Beograd 16). Na Slici 158 prikazani su naponi sve tri faze, dok su na Slici 159 prikazane fazne struje. Na slikama su prikazane sekundarne veličine. Nulti trenutak na vremenskoj osi odgovara trenutku pobuđivanja releja. Za razliku od prethodnih snimaka, u slučaju ovog kvara raspolagalo se snimkom samo u trajanju od 1 s od trenutka pobuđivanja releja.



Slika 158 Naponski signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Beograd 3 – TS Beograd 16



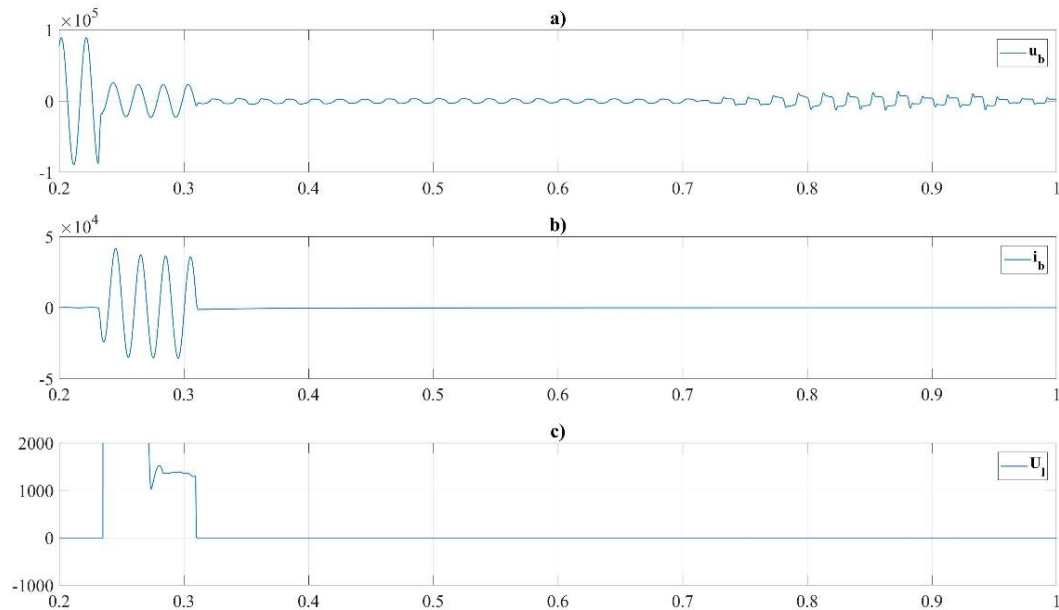
Slika 159 Strujni signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Beograd 3 – TS Beograd 16

Analizom prikazanih signala može se uočiti sledeće:

- u trenutku  $t_k = -20$  ms dolazi do jednofaznog kvara u fazi B (struja u fazi B naglo raste; dolazi do propada napona u fazi B; naponi i struje u fazama A i C se veoma malo menjaju),
- u trenutku  $t_l = 40$  ms dolazi do otvaranja prekidača u fazi B (struja u fazi B opada na nulu).

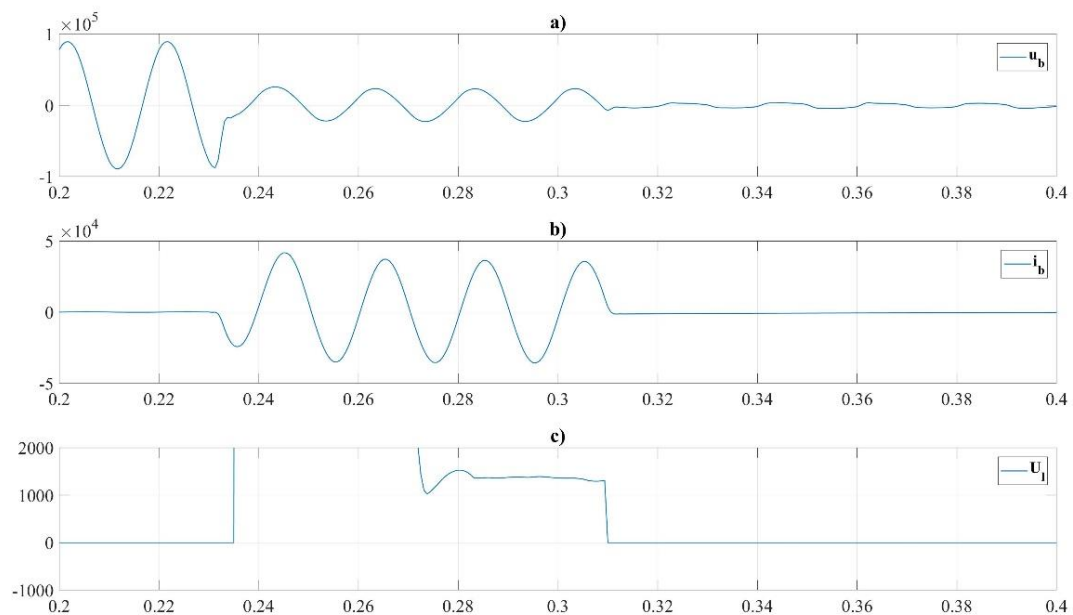
Prikazani snimak ne obuhvata ponovno uključenje što onemogućuje da se sa sigurnošću identifikuje priroda kvara. Međutim, analizom talasnog oblika napona faze pogođene kvarom tokom beznaponske pauze, može se nedvosmisleno identifikovati prisustvo električnog luka na mestu kvara.

Na Slici 160 prikazan je rad algoritma za detekciju električnog luka korišćenjem isključivo naponskih signala: a) napon faze B; b) struja faze B; c) estimirani napon luka.



Slika 160 Naponski signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Beograd 3 – TS Beograd 16

Slika 161 prikazuje rad algoritma u periodu od trenutka nastanka kvara do trenutka otvaranja prekidača: a) napon faze B; b) struja faze B; c) estimirani napon luka.



Slika 161 Naponski signali (prikaz iz SIGRA 4): TS Beograd 3 – TS Beograd 16

Na osnovu Slike 161, c) može se zaključiti da nakon prelaznog perioda potrebnog za konvergenciju, algoritam uspešno estimira napon luka. Estimirana vrednost napona luka iznosi približno 1330V što omogućava identifikaciju prirode kvara (očekivana vrednost u slučaju 110 kV dalekovoda iznosi oko 1250V – 1350V).

## 9. Zaključak

U okviru ove doktorske disertacije, prikazan je novi pristup u realizaciji algoritma za identifikaciju prirode kvara na nadzemnim vodovima. Osnovni doprinos disertacije ogleda se u razvoju algoritama koji omogućavaju identifikaciju prirode kvara bez obzira na eventualno zasićenje strujnog transformatora. Jedan od osnovnih nedostataka algoritama za identifikaciju prirode kvara jeste činjenica da zasićenje strujnog transformatora može dovesti do njihovog nepravilnog rada. Naime, prilikom kvara može doći do zasićenja strujnog transformatora, što za posledicu ima deformaciju struje na njegovom sekundaru i negativno se odražava na rad algoritama za identifikaciju prirode kvara koji za svoj rad zahtevaju poznavanje naponskih i strujnih signala.

Jedan od pristupa koji je primenjen u cilju prevazilaženja ovog problema jeste da se najpre izvrši kompenzacija zasićenja strujnog transformatora, odnosno rekonstrukcija originalnog strujnog signala na primaru strujnog transformatora. Kompenzovan (rekonstruisan) strujni signal dalje se prosleđuje algoritmu za identifikaciju prirode kvara. Drugi pristup koji omogućava identifikaciju prirode kvara nezavisno od zasićenja strujnog transformatora jeste razvoj algoritma za detekciju električnog luka koji koristi isključivo naponske signale.

Osnovna prednost novog algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora koji je prikazan u okviru ove doktorske teze, ogleda se u činjenici da algoritam za svoj rad ne zahteva estimaciju inicijalnog fluksa, odnosno fluksa u trenutku nastanka zasićenja. Pored toga, algoritam omogućava rekonstrukciju ne samo osnovnog harmonika struje kvara, već i viših harmoničnih komponenti, što je od naročite važnosti kako bi se algoritam mogao primeniti u kombinaciji sa algoritmom za detekciju električnog luka. Algoritam je testiran u MATLAB programskom paketu. Testiranje je izvršeno u odnosu na različite pojave kao što su jednosmerna komponenta struje kvara, remanentni fluks u jezgri strujnog transformatora, i tip opterećenja priključenog na sekundar strujnog transformatora (faktor snage priključenog opterećenja). Sprovedena testiranja ukazuju na dobre performanse algoritma, kao i na to da se algoritam može uspešno primeniti u kombinaciji sa algoritmom za detekciju električnog luka u cilju identifikacije prirode kvara. Takođe, algoritam je testiran na signalima preuzetim sa releja u pogonu.

Novi algoritam za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima koji je prikazan u okviru ove doktorske teze, za svoj rad zahteva poznavanje isključivo naponskih signala na mestu releja, odnosno ne zahteva poznavanje strujnih signala. Prema tome, prikazani algoritam nije osetljiv na zasićenje strujnog transformatora što predstavlja njegovu osnovnu prednost. Algoritam je testiran u MATLAB programskom paketu. Testiranje je izvršeno u odnosu na različite pojave: lokacija kvara, različite vrednosti napona luka, prisustvo jednosmerne komponente struje kvara, otpornost rasprostiranja uzemljivačkog sistema stuba, različite vrednosti impedanse mreže, talasni oblik napona luka (model električnog luka). Testiranja su pokazala da u svim razmatranim slučajevima algoritam pokazuje dobre rezultate te da omogućava nedvosmisleno identifikaciju prirode kvara. Jedini izuzetak predstavlja primena ovog algoritma kod dugih vodova (preko 100 km), gde algoritam ne pokazuje zadovoljavajuće performanse. Rad algoritma je verifikovan i na osnovu signala generisanih u realnim uslovima, tj. na osnovu signala zapisanih pomoću releja koji se nalaze u pogonu.

Pored gore navedenog, disertacija sadrži pregled naučne literature iz sledećih oblasti: detekcija zasićenja strujnog transformatora, kompenzacija zasićenja strujnog transformatora i



detekcija električnog luka na nadzemnim vodovima. Izvršen je pregled algoritama iz navedenih oblasti, prikazane su osnovne relacije na kojima algoritmi počivaju, i ukazano je na njihove osnovne prednosti i nedostatke.

Osnovni naučni doprinosi predložene doktorske disertacije su:

- Novi pristup u realizaciji algoritma za detekciju i kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora.
- Neosetljivost algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora na prisustvo remanentnog fluksa u jezgru strujnog transformatora.
- Robusnost algoritma za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora zahvaljujući činjenici da algoritam za svoj rad ne zahteva estimaciju inicijalnog fluksa, odnosno fluksa u trenutku nastanka zasićenja.
- Mogućnost da se tokom zasićenja strujnog transformatora rekonstruiše ne samo osnovni harmonik struje primara strujnog transformatora, već i više harmonične komponente struje.
- Novi pristup u realizaciji algoritma za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima, korišćenjem isključivo naponskih signala.
- Neosetljivost algoritma za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima na zasićenje strujnog transformatora.
- Napravljen je pregled literature iz oblasti detekcije zasićenja strujnog transformatora, kompenzacije zasićenja strujnog transformatora i detekcije električnog luka na nadzemnim vodovima.

## Literatura

- [1] M. Đurić, Z. Stojanović, Relejna zaštita, Beograd, 2014
- [2] M. Đurić, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, i dr, Algoritmi za digitalne relejne zaštite, Beograd, 2012.
- [3] M. B. Djurid and V. V Terzija, "A New Approach to the Arcing Faults Detection for Fast Autoreclosure in Transmission Systems," 1995.
- [4] M. B. Djurić, Z. M. Radojević, and V. V. Terzija, "Numerical algorithm for arcing faults detection and fault distance calculation on overhead lines," *Electric Machines and Power Systems*, vol. 25, no. 9, pp. 939–953, Oct. 1997, doi: 10.1080/07313569708955788.
- [5] Z. M. Radojević and J. R. Shin, "New one terminal digital algorithm for adaptive reclosing and fault distance calculation on transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1231–1237, Jul. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.860285.
- [6] Z. Radojevic, V. Terzija, G. Preston, S. Padmanabhan, and D. Novosel, "Smart overhead lines autoreclosure algorithm based on detailed fault analysis," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1829–1838, Dec. 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2260184.
- [7] Z. M. R. Radojevic', V. V Terzija, and M. B. Djuric'abstractdjuric', "Numerical Algorithm for Overhead Lines Arcing Faults Detection and Distance and Directional Protection," 2000.
- [8] M. B. Djuric, Z. M. Radojevic and V. V. Terzija, "Time domain solution of fault distance estimation and arcing faults detection on overhead lines", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 1, pp. 60-67, Feb. 1999.
- [9] Z. M. Radojevic', R. V. V Terzija, and M. B. Djuric'facultydjuric', "Numerical algorithm for blocking autoreclosure during permanent faults on overhead lines," 1998.
- [10] V. V. Terzija and Z. M. Radojević, "Numerical algorithm for adaptive autoreclosure and protection of medium-voltage overhead lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 554–559, Apr. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.823184.
- [11] V. Terzija, G. Preston, V. Stanojević, N. I. Elkalashy, and M. Popov, "Synchronized Measurements-Based Algorithm for Short Transmission Line Fault Analysis," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2639–2648, Nov. 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2436878.
- [12] V. A. Stanojevic, G. Preston, and V. Terzija, "Synchronised measurements-based algorithm for long transmission line fault analysis," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4448–4457, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2658675.
- [13] N. M. Belčević and Z. N. Stojanović, "Algorithm for phasor estimation during current transformer saturation and/or DC component presence: definition and application in arc detection on overhead lines," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 7, pp. 1378–1388, Apr. 2020, doi: 10.1049/IET-GTD.2019.0787/CITE/REFWORKS.
- [14] N. M. Belčević and Z. N. Stojanović, "Using voltage signals for transient fault detection on overhead lines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 137, p. 107824, May 2022, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.107824.

- 
- [15] K. M. El-Naggar and M. I. Gilany, "A discrete dynamic filter for detecting and compensating CT saturation," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 5–6, pp. 527–533, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.epsr.2006.05.008.
- [16] A. Hooshyar and M. Sanaye-Pasand, "Accurate measurement of fault currents contaminated with decaying DC offset and CT saturation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 773–783, Apr. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2176965.
- [17] E. Hajipour, M. Vakilian, and M. Sanaye-Pasand, "Current-Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, pp. 2293–2302, Oct. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2411736.
- [18] A. Wiszniewski, W. Rebizant, and L. Schiel, "Correction of current transformer transient performance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 624–632, Apr. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.915832.
- [19] R. W. Schafer, "What is a savitzky-golay filter?," *IEEE Signal Process Mag*, vol. 28, no. 4, pp. 111–117, 2011, doi: 10.1109/MSP.2011.941097.
- [20] B. M. Schettino, C. A. Duque, and P. M. Silveira, "Current-Transformer Saturation Detection Using Savitzky-Golay Filter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1400–1401, Jun. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2521327.
- [21] C. E. Duchon, "Lanczos filtering in one and two dimensions", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 18, no. 8, pp. 1016-1022, 1979.
- [22] B. M. Schettino, C. A. Duque, P. M. Silveira, P. F. Ribeiro, and A. S. Cerqueira, "A new method of current-transformer saturation detection in the presence of noise," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1760–1767, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2294079.
- [23] H. Li, R. Wang, S. Cao, Y. Chen, and W. Huang, "A method for low-frequency noise suppression based on mathematical morphology in microseismic monitoring," *Geophysics*, vol. 81, no. 3, pp. V159–V167, May 2016, doi: 10.1190/GEO2015-0222.1.
- [24] T. Y. Ji, Q. He, M. J. Shi, M. S. Li and Q. H. Wu, "CT saturation detection and compensation using mathematical morphology and linear regression", *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, pp. 1054-1059, 2016.
- [25] T. Ji, M. Shi, M. Li, L. Zhang, and Q. Wu, "Current Transformer Saturation Detection Using Morphological Gradient and Morphological Decomposition and Its Hardware Implementation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4721–4729, Jun. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2674578.
- [26] X. Lin, L. Zou, Q. Tian, H. Weng, and P. Liu, "A series multiresolution morphological gradient-based criterion to identify CT saturation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1169–1175, Jul. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.861338.
- [27] H. Dashti, M. Sanaye-Pasand, and M. Davarpanah, "Fast and reliable CT saturation detection using a combined method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1037–1044, 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2022666.
- [28] Y. C. Kang, U. J. Lim, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1642–1649, Oct. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835266.

- [29] G. L. Macieira and A. L. M. Coelho, "Evaluation of numerical time overcurrent relay performance for current transformer saturation compensation methods," *Electric Power Systems Research*, vol. 149, pp. 55–64, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.04.005.
- [30] Y. C. Kang, J. S. Yun, B. E. Lee, S. H. Kang, S. I. Jang, and Y. G. Kim, "Busbar differential protection in conjunction with a current transformer compensating algorithm," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 100–109, 2008, doi: 10.1049/iet-gtd:20060520.
- [31] Y. C. Kang, S. H. Ok, and S. H. Kang, "A CT Saturation Detection Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 78–85, Jan. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.820200.
- [32] Y. C. Kang, S. H. Ok, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "Design and evaluation of an algorithm for detecting current transformer saturation," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, no. 1, pp. 27–35, Jan. 2004, doi: 10.1049/ip-gtd:20030982.
- [33] A. Hooshyar, M. Sanaye-Pasand, and M. Davarpanah, "Development of a new derivative-based algorithm to detect current transformer saturation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 3, p. 207, 2012, doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0476.
- [34] A. Hooshyar and M. Sanaye-Pasand, "CT saturation detection based on waveform analysis using a variable-length window," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 2040–2050, Jul. 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2142404.
- [35] Y. Y. Hong and P. C. Chang-Chian, "Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 4, pp. 566–575, 2008, doi: 10.1049/iet-gtd:20070383.
- [36] F. Li, Y. Li, and R. K. Aggarwal, "Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers."
- [37] A. Rahmati, "An adaptive differential relay for ct saturation based on wavelet Transform", *2010 International Conference on Advances in Energy Engineering*, pp. 89-94, 2010.
- [39] A. Wiszniewski, W. Rebizant, and L. Schiel, "Correction of current transformer transient performance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 624–632, Apr. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.915832.
- [40] K. M. El-Naggar and M. I. Gilany, "A discrete dynamic filter for detecting and compensating CT saturation," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 5–6, pp. 527–533, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.epsr.2006.05.008.
- [41] F. B. Ajaei, M. Sanaye-Pasand, M. Davarpanah, A. Rezaei-Zare, and R. Iravani, "Compensation of the current-transformer saturation effects for digital relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2531–2540, Oct. 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2161622.
- [42] F. Li, Y. Li, and R. K. Aggarwal, "Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers."
- [43] A. Wiszniewski, W. Rebizant and L. Schiel, "Correction of current transformer transient performance", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 624-632, Apr. 2008.

- 
- [44] Y. C. Kang *et al.*, “Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers,” 1996.
- [45] N. Locci and C. Muscas, “Hysteresis and Eddy Currents Compensation in Current Transformers,” 2001.
- [46] N. Locci and C. Muscas, “A Digital Compensation Method for Improving Current Transformer Accuracy,” 2000.
- [47] Y. C. Kang, J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns, and R. K. Agganval, “Effects of Current Transformers,” 1997.
- [48] E. Hajipour, M. Vakilian, and M. Sanaye-Pasand, “Current-Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, pp. 2293–2302, Oct. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2411736.
- [49] Y. C. Kang, U. J. Lim, S. H. Kang, and P. A. Crossley, “Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1642–1649, Oct. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835266.
- [50] Y. C. Kang, J. S. Yun, B. E. Lee, S. H. Kang, S. I. Jang, and Y. G. Kim, “Busbar differential protection in conjunction with a current transformer compensating algorithm,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 100–109, 2008, doi: 10.1049/iet-gtd:20060520.
- [51] Y. C. Kang, U. J. Lim, and S. H. Kang, “Compensating algorithm suitable for use with measurement-type current transformers for protection,” in *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, Nov. 2005, pp. 880–890. doi: 10.1049/ip-gtd:20045115.
- [52] D. G. Lee, S. H. Kang, and S. R. Nam, “Phasor estimation algorithm based on the least square technique during CT saturation,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 459–465, Jul. 2011, doi: 10.5370/JEET.2011.6.4.459.
- [53] D. Y. Shi, J. Buse, Q. H. Wu, and L. Jiang, “Fast Compensation of Current Transformer Saturation.”
- [54] D. C. Yu, J. C. Cummins, Z. Wang, H.-J. Yoon, and L. A. Kojovic, “Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation Using Artificial Neural Networks,” 2001.
- [55] K. Erenturk, “ANFIS-based compensation algorithm for current-transformer saturation effects,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 195–201, 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2005882.
- [56] F. Haghjoo and M. H. Pak, “Compensation of CT distorted secondary current waveform in online conditions,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 711–720, Apr. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2448634.
- [57] Y. Y. Hong and P. C. Chang-Chian, “Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 4, pp. 566–575, 2008, doi: 10.1049/iet-gtd:20070383.
- [58] H. Khorashadi-Zadeh and M. Sanaye-Pasand, “Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 73–79, Jan. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.858799.

- 
- [59] - Domínguez, J.L., Argüelles, J.F.M., Arrieta, M.A.Z., et al.: 'A new quick-convergence invariant digital filter for phasor estimation', *Electr. Power Syst. Res.*, 2009, 79, (5), pp. 705–713
- [60] N. Belčević and Z. Stojanović, "Analiza algoritama za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora," *Energija, ekonomija, ekologija*, vol. 22, no. 1–2, pp. 112–118, 2020, doi: 10.46793/EEE20-1-2.112B.
- [61] P. K. Gangadharan, T. S. Sidhu, and G. J. Finlayson, "Current transformer dimensioning for numerical protection relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 108–115, Jan. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.881601.
- [62] T. Smith, "Current Transformer Saturation Effects on Coordinating Time Interval," 2013.
- [63] M. Kaczmarek, P. Kaczmarek, and E. Stano, "The Effect of the Load Power Factor of the Inductive CT's Secondary Winding on Its Distorted Current's Harmonics Transformation Accuracy," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15176258.
- [64] R. G. Bruce and A. Wright, "Remanent flux in current-transformer cores."
- [65] J. Trifunović, "Metodologija za uvažavanje nesavršenog kontakta između elektroda i tla pri proračunu optpornosti rasprostriranja konturnih uzemljivača", doktorska disertacija, Beograd, 2015

## **Biografija autora**

Nenad Belčević, rođen je 13.06.1992. godine u Kraljevu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Upisao je Elektrotehnički fakultet u Beogradu 2011. godine. U toku osnovnih studija na Odseku za energetiku, smer Elektroenergetski sistemi, ostvario je prosečnu ocenu 9.15. Diplomirao je u septembru 2015. godine. Master studije je upisao 2015. godine na Elektrotehničkom fakultetu, smer za Elektroenergetske mreže i sisteme. Diplomom master inženjera elektrotehnike i računarstva stekao je u avgustu 2016. godine. Master studije je završio sa prosečnom ocenom 9.83. Završni master rad pod nazivom “Algoritam za detekciju kvarova sa električnim lukom na nadzemnim vodovima”, odbranio je sa prosečnom ocenom 10. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu upisao je 2016. godine.

Radno iskustvo započeo je u Elektrotehničkom institutu Nikola Tesla, gde je radio u periodu od 2016. do 2018. godine u sektoru za analizu elektroenergetskih sistema. U periodu od 2018. do 2020. godine radio je u kompaniji Energy Saving Group, gde je učestovao u razvoju projekata obnovljivih izvora energije. Nakon 2020. godine ponovo je angažovan na poslovima izrade studija za analizu elektroenergetskih sistema, u kompanijama WSP i Go2Power. U svom profesionalnom radu bavi se prvenstveno izradom studija koordinacije relejne zaštite, ali i drugih studija iz oblasti analize elektroenergetskih sistema.

Autor je više radova publikovanih u časopisima sa SCI liste, zbornicima međunarodnih, regionalnih i domaćih konferencija.

Oblast njegovog interesovanja su: relejna zaštita, analiza elektroenergetskih sistema i razvodna postrojenja.

## IZJAVA O AUTORSTVU

Ime i prezime autora Nenad M. Belčević

Broj indeksa 5023/2016

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

### **Detekcija prolaznih kvarova na nadzemnim vodovima u uslovima zasićenja strujnog transformatora**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da predložena disertacija ni u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

### Potpis autora

U Beogradu, 22.10.2024.

  
\_\_\_\_\_



## IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora: Nenad M. Belčević

Broj indeksa: 5023/2016

Studijski program: Elektroenergetkse mreže i sistemi

Naslov rada: Detekcija prolaznih kvarova na nadzemnim vodovima u uslovima zasićenja strujnog transformatora

Mentor: dr Zoran Stojanović, redovni profesor

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis autora**

U Beogradu, 22.10.2024.

  
\_\_\_\_\_

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**Detekcija prolaznih kvarova na nadzemnim vodovima u uslovima zasićenja strujnog transformatora**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu** i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
- ③. Autorstvo – nekomercijalno bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

**Potpis autora**

U Beogradu , 22.10.2024.



---