

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

mr Snežana Vujošević

**Analiza naponskih poremećaja,
detekcija, klasifikacija i lokalizacija
zemljospoja kod nadzemnih
elektroenergetskih vodova primjenom
EMD metode**

- Doktorska disertacija -

Podgorica, 2018. godine

**UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING**

MSc Snežana Vujošević

**EMD based approach in analysis
of voltage disturbances, detection,
classification and localization of phase
to ground faults on overhead lines**

- Doctoral dissertation -

Podgorica, 2018. year

PODACI O DOKTORANDU, MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

PODACI O DOKTORANDU:

Ime i prezime: Snežana Vujošević
Datum i mjesto rođenja: 05.09.1964. godine, Beograd, SFRJ
**Naziv završenog
studijskog programa:** Energetika
Godina završetka: 1987.

MENTOR:

dr Saša Mujović, vanredni profesor,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

KOMISIJA ZA ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE

Prof. dr Miloš Daković,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, predsjednik

Prof. dr Saša Mujović,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, mentor

Prof. dr Amir Tokić,
Univerzitet u Tuzli,
Fakultet elektrotehnike, član

Prof. dr Vladan Radulović,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Doc. dr Samir Avdaković,
Univerzitet u Sarajevu,
Elektrotehnički fakultet Sarajevo, član

Datum odbrane: 16.07.2018. godine

ZAHVALNICA

Ova doktorska disertacija urađena je pod mentorstvom prof. dr Saše Mujovića, vanrednog profesora na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, kome posebno zahvaljujem što mi je omogućio da sa njim radim na ovako aktuelnoj i interesantnoj temi, kao i na brojnim, izuzetno korisnim, naučnim i stručnim savjetima datim tokom izrade disertacije.

PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija:	Doktorske studije elektrotehnike
Naslov doktorske disertacije:	Analiza naponskih poremećaja, detekcija, klasifikacija i lokalizacija zemljospojeva kod nadzemnih elektroenergetskih vodova primjenom EMD metode
Datum prijave disertacije:	05. februar 2014. godine
Ključne riječi:	kvalitet električne energije, naponski poremećaji, zemljospoj, EMD, klasifikacija zemljospoja, lokalizacija zemljospoja
Naučna oblast:	Energetika
Uža naučna oblast:	Elektroenergetski sistemi

REZIME

Sofisticirani električni uređaji, široko-rasprostranjeni u strukturi savremenog elektroenergetskog konzuma, zahtijevaju napajanje električnom energijom propisanog kvaliteta. Svaki naponski poremećaj može ugroziti njihovo funkcionisanje, pa je analiza poremećaja, njihova pravovremena detekcija i lokalizacija od velike važnosti. Upravo je navedena problematika u fokusu ove doktorske disertacije. Naponski poremećaji, bilo da se manifestuju kao naponsko zaprljanje (uzrokovani pojavom viših harmonika) ili prenaponi (usled sklopnih aktivnosti u sistemu, kao što je uključenje voda) su analizirani primjenom empirijskog metoda dekompozicije signala (EMD metod). Disertacijom je potvrđena puna validnost korištenog metoda, kako za klasifikaciju poremećaja, tako i za detekciju i lokalizaciju zemljospojeva koji egzistiraju u momentu uključanja nadzemnih elektroenergetskih vodova, a koji imaju za posljedicu nastanak opasnih prenapona. Doktorskom disertacijom su, primjenom EMD metode, analizirani karakteristični naponski poremećaji dobijeni simulacijama i realni (mjereni) signali. Razvijen je matematički model za uključanje nadzemnog elektroenergetskog voda u normalnom radnom režimu i režimima postojanja zemljospojeva. Koristeći dobijene matematičke modele i primjenjujući EMD metodu, razvijeni su klasifikacioni metod za određivanje režima rada neopterećenog nadzemnog voda prilikom uključanja i metod za lokalizaciju zemljospoja pri uključanju istog tipa voda. Oba metoda se karakterišu tačnošću, brzim odzivom i praktičnom primjenjivošću.

UDK:

INFORMATION ON DOCTORAL DISSERTATION

Doctoral studies:	Doctoral study of electrical engineering
Dissertation title:	EMD based approach in analysis of voltage disturbances, detection, classification and localization of phase to ground faults on overhead lines
Date of thesis registration:	05. February 2014. year
Key words:	power quality , voltage disturbances, phase to ground fault, EMD, classification of phase to ground faults, localization of phase to ground faults
Scientific area:	Energetics
Specific scientific area:	Electric power systems

ABSTRACT

Proper operation of modern electrical devices is closely related to the high power quality. Any voltage disturbance can endanger their functioning and, therefore, an analysis of the disturbances, their detection and localization are of a paramount importance. To that end, this PhD theses addresses the before mentioned issues. Power quality disturbances, manifested as voltage distortion (caused by the occurrence of harmonics), or overvoltages (due to switching activities in the system, such as the line energization) were analyzed in the thesis by using of the Empirical Mode Decomposition (EMD). The thesis has confirmed the full validity of the EMD method, both for the classification of disturbances, as well as for the detection and localization of phase to ground faults that potentially exists at the moment of the overhead lines energization. The PhD thesis includes an EMD based analysis of simulated and measured voltage signals and derivation of mathematical models which apply for an overhead line energization under normal and faulty conditions. By using of the obtained mathematical models and by applying the EMD, the classification method for determination of unloaded overhead line operating conditions during energization and the method for localization of phase to ground faults have been developed. Both methods are characterized by high accuracy and practical applicability.

UDK:

Predgovor

Doktorska disertacija je nastala kao plod dugogodišnjeg autorovog naučno-istraživačkog rada sprovedenog na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Inicijalno, istraživanja su bila usmjerena na analizu realnih naponskih poremećaja, odnosno naponskih signala dobijenih mjerenjima u transformatorskim stanicama crnogorskog elektroenergetskog sistema. Ovakvi signali su, za razliku od simuliranih, opterećeni prisustvom šuma, pa je i njihova analiza zahtijevala kompleksniji pristup. Tradicionalne metode digitalne obrade signala, kao što su Furijeova transformacija ili njen izvedeni oblik - kratkotrajna Furijeova transformacija, pokazale su se kao nedovoljno pouzdane alatke za harmonijsku dekompoziciju razmatranih signala. To je nametnulo potrebu za ovladavanjem i primjenom neke od savremenijih metoda. Analizom rezultata predstavljenih u dostupnoj literaturi, kao i autorovim istraživanjima, empirijski metod dekompozicije (EMD metod) se nametnuo kao optimalno rješenje – veoma tačno i prihvatljivog nivoa složenosti.

Novi trendovi i nastale promjene u elektroenergetskom sektoru posljednjih decenija, izuzetna aktuelizacija problematike kvaliteta električne energije i potreba za gotovo optimalnim naponskim prilikama u cilju ispravnog funkcionisanja savremenih potrošača, daju dodatni značaj problematici analize naponskih talasa. Uspostavljanje tržišta električne energije promoviše pouzdanost kao ključni kriterijum pri definisanju cijene isporučene električne energije, pa postoji opravdana potreba za boljim razumijevanjem najrazličitijih naponskih poremećaja, kao i njihovom detekcijom i lokalizacijom. Upravo je navedeno motivisalo autora da tok istraživačkog rada usmjeri na analizu onih napona koji su posebna prijetnja po elektroenergetski sistem i njegovu pouzdanost. Tipičan primjer takvog napona (prenapona) visoke amplitude može nastati pri uključenju nadzemnog elektroenergetskog voda ili sličnim komutacionim aktivnostima. Okolnosti postaju složenije, a kvalitet mrežnog napona dodatno ugrožen,

ukoliko u trenutku uključenja voda već egzistira asimetrični kvar na vodu (npr. jednopolni zemljospoj). Dakle, detektovati i lokalizovati kvara u što kraćem vremenskom periodu, bio je veoma izazovan zadatak dodatno otežan činjenicom da u dostupnoj literaturi postoji oskudan broj istraživanja koja uzimaju u obzir uticaj simultanog postojanja dva asimetrična procesa (kakvi su uključenje voda i zemljospoj).

Primjenjujući EMD metodu u analizi predhodno definisanog problema, autor je razvio i predložio dva metoda:

1) Klasifikacioni metod za određivanje režima rada neopterećenog vazdušnog voda prilikom uključenja, koji omogućava da se u kratkom vremenskom periodu utvrdi da li je posmatrani vod u normalnom režimu rada ili u zemljospoju, kao i da se definiše vrsta kvara ukoliko je isti prisutan. Metod se odlikuje velikom brzinom, tačnošću i jednostavnošću, pa je stoga pogodan za praktičnu primjenu.

2) Metod koji omogućava lokalizaciju mjesta kvara, odnosno tačke u kojoj je došlo do nastanka zemljospoja. Metod se karakteriše visokom preciznošću i jednostavnošću za upotrebu, kao i činjenicom da ne zahtijeva instaliranje dodatne opreme u odnosu na opremu koja već postoji u transformatorskim stanicama.

Doktorskom disertacijom je potvrđena adekvatnost EMD metode pri analizi nestacionarnih naponskih signala i dat doprinos u smislu detekcije i lokalizacije kvara-koji predstavlja izrazitu opasnost po kvalitet napona napajanja i pouzdanost elektroenergetskog sistema. Predložene metode mogu poslužiti kao osnova za brzu intervenciju i preduzimanje korektivnih aktivnosti u sistemu u cilju otklanjanja kvara.

Autor izražava nadu da će prezentovani rezultati podstaći nova istraživanja u ovoj oblasti i da će biti od koristi, kako naučnoj zajednici, tako i za primjenu u inženjerskoj praksi.

Podgorica, oktobar, 2017.

Snežana Vujošević

Izvod iz teze

Posljednjih decenija u elektroenergetskom sektoru došlo je do značajnih promjena koje se prevashodno ogledaju u naglom porastu učešća pametnih (smart) potrošača u strukturi konzuma, što rezultira aktuelizacijom problematike kvaliteta električne energije. Poznato je da loš kvalitet električne energije negativno utiče na navedenu kategoriju potrošača i ozbiljno ugrožava njihovo funkcionisanje. U cilju postizanja adekvatnog kvaliteta električne energije, neophodno je detaljno poznavanje prirode poremećaja, njegova pravovremena detekcija i lokalizacija, kako bi se problem eliminisao u što kraćem vremenskom intervalu.

S tim u vezi, za analizu naponskih poremećaja koriste se metode digitalne obrade signala. Ipak, one najpoznatije, kao što je Furijeova transformacija ili njen oblik kratkotrajna Furijeova transformacija, pokazale su se nedovoljno efikasnim kada je u pitanju analiza nestacionarnih i nelinearnih signala. Najveći broj naponskih poremećaja je upravo ovakvog karaktera, pa je je bilo potrebno odabrati adekvatnu metodu. U fokusu ove doktorske disertacije je EMD metoda (Empirical Mode Decomposition), za koju je potvrđeno, kroz istraživanja zastupljena u literaturi, kao i kroz autorova istraživanja, da predstavlja vrlo upotrebljivu i naprednu tehniku digitalne obrade signala, naročito za analizu realnih naponskih signala opterećenih šumom.

Imajući u vidu da je disertacija usmjerena ka analizi realnih naponskih signala, odnosno složenih poremećaja u elektroenergetskim sistemima, odabrani su sklopni prenaponi koji nastaju pri naglim promjenama režima u kolu, odnosno pri komutacijama prekidača i značajno ugrožavaju kvalitet električne energije. Kratkog su trajanja i neperiodičnog talasnog oblika. Tipičan primjer takvog prenapona visoke amplitude može se javiti pri uključenju nadzemnog elektroenergetskog voda, koje u praksi spada među najčešće sklopne operacije. Situacija postaje još složenija, a kvalitet mrežnog napona dodatno ugrožen, ukoliko u trenutku uključenja voda već egzistira asimetrični kvar na vodu (npr. jednopolni zemljospoj). Stoga detekcija i lokalizacija kvara u što kraćem vremenskom periodu predstavlja veoma izazovan zadatak, dodatno otežan činjenicom da u dostupnoj literaturi postoji izuzetno mali broj istraživanja koja uzimaju

u obzir uticaj simultanog postojanja dva asimetrična procesa (kakvi su uključenje voda i zemljospoj).

Razvojem matematičkih modela koji opisuju uključenje voda u normalnom režimu i u režimu prisustva kvara, što predstavlja prvi doprinos ove disertacije, primjenom EMD metode razvijena su dva metoda:

1) Klasifikacioni metod za određivanje režima rada neopterećenog vazdušnog voda prilikom uključanja, koji omogućava da se u kratkom vremenskom intervalu utvrdi da li je posmatrani vod u normalnom režimu rada ili u zemljospoju, kao i da se klasifikuju vrste kvara ukoliko je on prisutan (analizira se mogućnost pojave jednofaznog, dvofaznog i trofaznog zemljospoja). Metod se karakteriše velikom brzinom, tačnošću i jednostavnošću, pa je stoga pogodan za primjenu u inženjerskoj praksi i

2) Metod koji omogućava lokalizaciju mjesta kvara, odnosno tačke u kojoj je došlo do nastanka zemljospoja. Metod se odlikuje visokom preciznošću i jednostavnošću za primjenu, kao i činjenicom da ne zahtijeva instaliranjem dodatne opreme u odnosu na već postojeću u transformatorskim stanicama.

Predložene metode, ujedno i najveći doprinosi disertacije, u inženjerskoj praksi mogu poslužiti kao osnova za efikasnu intervenciju i preduzimanje korektivnih aktivnosti u sistemu u cilju eliminacije kvara.

Thesis overview

In the last decades there have been significant changes at the electricity sector that are primarily reflected in the sudden increase in the number of smart consumers in the structure of consumption, which results in the actualization of electric power quality issues. It is well known that insufficient power quality has negative effects to this category of consumers and seriously jeopardizes their functioning. In order to achieve an adequate quality of electricity, a detailed knowledge of the disturbances nature, its timely detection and localization is necessary to eliminate the problem in the shortest possible time interval.

To that end, digital signal processing methods are used to analyze voltage disturbances. However, the best-known ones, such as the Fourier transform or its form Short Time Fourier Transform, proved to be insufficiently efficient when analyzing non-stationary and non-linear signals. The majority of voltage disturbances belongs to mentioned type, so it was necessary to choose an adequate method for their analysis. The focus of this PhD thesis is the EMD method (Empirical Mode Decomposition), which has been confirmed through the literature survey, as well as through author research, to be a highly usable and advanced digital signal processing technique, in particular for analyzing the real voltage signals with the presence of noise.

Bearing in mind that the thesis focuses on the analysis of real voltage signals and complex disturbances in power systems, the switching surges, which occur in the case of sudden changes in the circuit regime, i.e. switching commutations, and significantly compromising the power quality, have been chosen for further analysis. They have a short duration and non-periodic waveform. A typical example of such a high amplitude surge can occur in the process of overhead electrical power lines energization, which in practice is one of the most common switching operations. The situation becomes even more complicated, and the quality of the network voltage is additionally compromised if at the moment of the lines energization already exists an asymmetric fault on the line (e.g. single-phase to ground fault).

Therefore, the detection and localization of the failure in the shortest possible time is a very challenging task, which is further complicated by the fact that in the available literature there is a very small number of studies that take into account the impact of simultaneous existence of two asymmetric processes (such as line energization and phase to ground fault).

By the development of mathematical models that describe the energization of line in the normal regime and the presence of failure, which is the first contribution of this thesis, two methods have been developed using the EMD:

- 1) The classification method for determination of unloaded overhead line operating conditions during energization, enabling it to determine in a short time whether the observed line is in the normal operating mode or in the line to ground fault, and to classify the types of failure if present (analyzing the possibility of single-phase, two-phase and three-phase to ground fault occurrence). The method is characterized by high speed, accuracy and simplicity, so it is suitable for use in engineering practice.

- 2) The method that enables localization of a fault location, i.e. the point where the phase to ground fault occurred. The method is characterized by high precision and ease of use, as well as the fact that it does not require the installation of additional equipment over the existing ones in transformer stations.

The proposed methods, which are the main contribution of this thesis, can be a basis for efficient intervention and the taking of corrective actions in the system in order to eliminate the malfunction in engineering practice.

SADRŽAJ

Uvod	1
-------------------	----------

POGLAVLJE 1

Metode digitalne obrade signala	6
1.1 Furijeova analiza.....	6
1.2 Kratkotrajna Furijeova analiza	9
1.3 Hilbert-Huangova transformacija	10
1.3.1 Empirijski metod dekompozicije	10
1.3.2 Hilbertova transformacija.....	14

POGLAVLJE 2

Osnovne vrste poremećaja kvaliteta električne energije i mogućnost njihove analize primjenom EMD metoda	16
2.1 Normalni radni režim u EES	17
2.2 Propadi napona	19
2.3 Porast napona.....	22
2.4 Prekidi napajanja	25
2.5 Flikeri	27
2.6 Harmonici	30
2.7 Impulsi (šiljci)	33
2.8 Zarezi (usjeci).....	36
2.9 Oscilatorni tranzijenti	39

POGLAVLJE 3

Trofazna prezentacija tipičnih nesimetričnih poremećaja kvaliteta električne energije i mogućnost njihove analize primjenom EMD metode	42
3.1 Uključenje trofaznog voda u praznom hodu.....	43
3.1.1 Matematički model uključenja neopterećenog trofaznog voda.....	43
3.1.2 Analitičko određivanje vrijednosti frekvencija	53
3.1.3 Analiza dobijenih rezultata	54
3.2 Jednofazni zemljospoj	55
3.3 Dvofazni zemljospoj.....	67

POGLAVLJE 4

Analiza realnih poremećaja napona primjenom metoda digitalne obrade signala	75
--	-----------

4.1 Harmonijska analiza realnih naponskih signala primjenom EMD i STFT metoda	77
---	----

POGLAVLJE 5

Metod za detekciju i klasifikaciju raznih vrsta zemljospoja na neopterećenom vodu	94
--	-----------

5.1 Karakteristike nulte komponente napona na kraju neopterećenog voda u slučaju normalnog režima rada	96
5.2 Karakteristike nulte komponenta napona na kraju neopterećenog voda u slučaju jednofaznog zemljospoja	101
5.3 Karakteristike nulte komponenta napona na kraju neopterećenog voda u slučaju dvofaznog zemljospoja	108
5.4 Karakteristike nulte komponenta napona na kraju neopterećenog voda u slučaju trofaznog zemljospoja.....	115
5.5 Metod razvijen za određivanje režima rada neopterećenog voda i klasifikaciju poremećaja.....	115

POGLAVLJE 6

Metod za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja u momentu uključenja voda ..	120
---	------------

6.1 Matematički model za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja na vodu u trenutku njegovog uključenja.....	123
6.1.1 Model za lokalizaciju jednofaznog zemljospoja	123
6.1.2 Određivanje frekvencija EMD metodom za slučaj jednofaznog zemljospoja	124
6.1.3 Model za lokalizaciju dvofaznog zemljospoja	126
6.1.4 Određivanje frekvencija EMD metodom u slučaju dvofaznog zemljospoja...	127
6.2 Primjena metoda za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja na vodu u trenutku njegovog uključenja.....	129
6.2.1 Ograničenja u primjeni preporučenog metoda za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja	131

ZAKLJUČAK	133
------------------------	------------

LITERATURA.....	Err
------------------------	------------

or! Bookmark not defined.

POPIS SLIKA

Slika 1.1. EMD dvokomponentnog signala	12
Slika 1.2. Vremenski oblik analiziranog signala.....	13
Slika 1.3. IMF dobijene primjenom EMD-a (a-c) i ostatak (d).....	13
Slika 2.1 Idealni oblik napona u EES-u	17
Slika 2.2 Napon na izlazu generatora predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija.....	18
Slika 2.3 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	18
Slika 2.4 STFT naponskog signala u normalnom režimu rada	19
Slika 2.5 Simulirani propad napona za vrijednosti $\alpha=0.6$, $t_1=0.06s$, $t_2=0.14s$	20
Slika 2.6 Propad napona predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija	20
Slika 2.7 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	21
Slika 2.8 Simulirani propad napona analiziran STFT metodom	22
Slika 2.9 Simulirani porast napona ($\alpha=0.6$, $t_1=0.06s$, $t_2=0.14s$)	23
Slika 2.10 Signal u kome se javlja porast napona predstavljen.....	23
preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 2.11 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	24
Slika 2.12 Simulirani porast napona analiziran STFT metodom	24
Slika 2.13 Simulirani prekid u napajanju, $\alpha=0.9$, $t_2-t_1=4T$	25
Slika 2.14 Prekid napajanja predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija.....	26
Slika 2.15 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	26
Slika 2.16 Simulirani prekid napajanja analiziran STFT metodom	27
Slika 2.17 Simulirani naponski signal sa pojavom flikera	28
Slika 2.18 Naponski signal sa pojavom flikera predstavljen.....	29
preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 2.19 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	29
Slika 2.20 Simulirano prisustvo flikera analizirano STFT metodom.....	30
Slika 2.21 Simulirani naponski signal sa pojavom trećeg i petog harmonika.....	31
Slika 2.22 Naponski signal sa prisustvom harmonika	32
predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 2.23 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	32
Slika 2.24 Simulirano prisustvo harmonika analizirano STFT metodom	33
Slika 2.25 Simulirani naponski signal sa pojavom periodičnih impulsa.....	34
Slika 2.26 Naponski signal sa prisustvom periodičnih impulsa	34
predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija	

Slika 2.27 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	35
Slika 2.28 Simulirano prisustvo periodičnih impulsa analizirano STFT metodom	35
Slika 2.29 Simulirani naponski signal sa pojavom periodičnih usjeka	37
Slika 2.30 Naponski signal sa prisustvom periodičnih usjeka	37
predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 2.31 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	38
Slika 2.32 Simulirano prisustvo periodičnih usjeka analizirano STFT metodom.....	38
Slika 2.33 Simulirani naponski signal sa pojavom oscilatornog tranzijenta	40
Slika 2.34 Naponski signal sa prisustvom oscilatornog tranzijenta	40
predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 2.35 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija	41
Slika 2.36 Simulirano prisustvo oscilatornog tranzijenta analizirano STFT metodom.....	41
Slika 3.1 Realna šema posmatranog sistema.....	43
Slika 3.2 Uključenje neopterećenog vazdušnog voda dužine 204 km	48
Slika 3.3 Uključenje neopterećenog vazdušnog voda dužine 30 km	49
Slika 3.4 Napon na fazi “b” pri uključenju voda 1	49
predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 3.5 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 1	50
Slika 3.6 Napon na fazi “a” pri uključenju voda 2	50
predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 3.7 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 2	51
Slika 3.8 STFT analiza prenapona pri uključenju neopterećenog voda dužine 204 km	52
Slika. 3.9 Analiza prenapona pri uključenju neopterećenog voda	52
dužine 30 km STFT metodom	
Slika 3.10 Prenapon pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju.....	63
Slika 3.11 Prenapon pri uključenju voda dužine 30 km u jednofaznom zemljospoju.....	63
Slika 3.12 Naponski signal na fazi “B” pri uključenju voda 1 razložen na IMF-ove	64
Slika 3.13 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 1	64
Slika 3.14 Napon na fazi “B” pri uključenju voda 2	65
rastavljen na prirodne sastavne funkcije	
Slika 3.15 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 2	65
Slika 3.16 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 500 km.....	66
u jednofaznom zemljospoju	
Slika 3.17 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 30 km.....	66
u jednofaznom zemljospoju	

Slika 3.18 Prenapon u tački na kraju voda dužine 500 km pri njegovom uključenju uz 70	prisustvo dvofaznog zemljospoja
Slika 3.19 Prenapon u krajnjoj tački voda dužine 30 km pri njegovom uključenju 70	uz postojanje dvofaznog zemljospoja
Slika 3.20 Napon na zdravoj fazi "A" pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom ... 71	zemljospoju predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija
Slika 3.21 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 1 71	
Slika 3.22 Napon na zdravoj fazi "A" pri uključenju voda dužine 30 km u dvofaznom 72	zemljospoju predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija
Slika 3.23 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 2 72	
Slika 3.24 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 500 km..... 73	u dvofaznom zemljospoju
Slika 3.25 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 30 km..... 73	u dvofaznom zemljospoju
Slika 4.1 Uključenje neopterećenog 35 kV kablovskog voda..... 77	
Slika 4.2 Isključenje neopterećenog 35 kV kablovskog voda..... 78	
Slika 4.3 Isključenje neopterećenog 10 kV nadzemnog voda..... 78	
Slika 4.4 Uključenje neopterećenog 10 kV kablovskog voda..... 79	
Slika 4.5 Naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda, 80	dekomponovan na prirodne sastavne funkcije
Slika 4.6 Procjena vrijednosti frekvencija prirodnih sastavnih funkcija 80	za naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda
Slika 4.7 Naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV 81	kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)
Slika 4.8 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski signal..... 81	dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)
Slika 4.9 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem 82	neopterećenog 35 kV kablovskog voda
Slika 4.10 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem..... 82	neopterećenog 35 kV kablovskog voda (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)
Slika 4.11 Naponski signal dobijen isključenjem neopterećenog 35 kV 84	

kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije	
Slika 4.12 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski	85
signal dobijen isključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda	
Slika 4.13 STFT analiza naponskog signala dobijenog isključenjem	85
neopterećenog 35 kV kablovskog voda	
Slika 4.14 Naponski signal dobijen isključenjem neopterećenog 10 kV	87
nadzemnog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije	
Slika 4.15 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za	87
naponski signal dobijen isključenjem neopterećenog 10 kV nadzemnog voda	
Slika 4.16 STFT analiza naponskog signala dobijenog isključenjem	88
neopterećenog 10 kV nadzemnog voda	
Slika 4.17 Naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 10 kV	89
kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije	
Slika 4.18 Procjena vrijednosti frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski	90
signal dobijen uključenjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda	
Slika 4.19 Naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 10 kV	90
kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)	
Slika 4.20 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski	91
signal dobijen uključenjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda	
(nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i	
direktne eksponencijalne komponente)	
Slika 4.21 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem.....	92
neopterećenog 10 kV kablovskog voda	
Slika 4.22 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem neopterećenog	92
10 kV kablovskog voda (nakon odstranjivanja sinusne komponente	
frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne) komponente	
Slika 5.1 Nulta komponenta napona pri uključenju neopterećenog voda	97
dužine 500 km u tački na kraju voda u normalnom režimu rada	
Slika 5.2 Primjena EMD metode za analizu nulte komponente napona pri uključenju	97
neopterećenog voda dužine 500km u normalnom random režimu	
Slika 5.3 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 500 km.....	98
Slika 5.4 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda.....	98
dužine 500 km u tački na kraju voda u normalnom režimu rada	
Slika 5.5 Nulta komponenta napona pri uključenju neopterećenog voda dužine 30 km.....	99
u tački na kraju voda u normalnom režimu rada	

Slika 5.6 Primjena EMD metode za analizu nulte komponente napona pri uključenju 99	99
neopterećenog voda dužine 30 km u normalnom random režimu	
Slika 5.7 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 30 km..... 100	100
Slika 5.8 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 30 km 100	100
u tački na kraju voda u normalnom režimu rada	
Slika 5.9 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km..... 101	101
u jednofaznom zemljospoju na kraju voda	
Slika 5.10 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine..... 102	102
500 km u jednofaznom zemljospoju na kraju voda, predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 5.11 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 500 km..... 102	102
Slika 5.12 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 500 km 103	103
u jednofaznom zemljospoju na kraju voda	
Slika 5.13 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u..... 103	103
jednofaznom zemljospoju na početku voda	
Slika 5.14 Nulta komponenta napona pri uključenju voda u jednofaznom zemljospoju 104	104
(kvar na početku voda) predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 5.15 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 104	104
Slika 5.16 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda..... 105	105
dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju na početku voda	
Slika 5.17 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine..... 105	105
30 km u jednofaznom zemljospoju (tačka kvara je na kraju voda)	
Slika 5.18 Nulta komponenta napona pri uključenju voda u jednofaznom..... 106	106
zemljospoju predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 5.19 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 30 km..... 106	106
Slika 5.20 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju..... 107	107
voda dužine 30 km u jednofaznom zemljospoju	
Slika 5.21 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km..... 108	108
u dvofaznom zemljospoju na kraju voda	
Slika 5.22 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom.... 109	109
zemljospoju u njegovoj krajnjoj tački predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 5.23 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija (kvar je na kraju voda)..... 109	109
Slika 5.24 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda..... 110	110
dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju na kraju voda	

Slika 5.25 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km.....	110
u dvofaznom zemljospoju na pocetku voda	
Slika 5.26 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u.....	111
dvofaznom zemljospoju u njegovoj početnoj tački	
predstvljena preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 5.27 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod	111
(kvar je na početku voda)	
Slika 5.28 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda.....	112
dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju na početku voda	
Slika 5. 29 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 30 km.....	112
u dvofaznom zemljospoju na kraju voda	
Slika 5.30 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 30 km.....	113
u dvofaznom zemljospoju predstvljena preko prirodnih sastavnih funkcija	
Slika 5.31 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod	113
Slika 5.32 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda.....	114
dužine 30 km u dvofaznom zemljospoju	
Slika 6.1 Dekompozicija zbira naponskih signala na fazama “B i C” na IMF-ove	124
Slika 6.2 Frekvencijski spektar odgovarajućih IMF-ova	125
Slika 6.3 Dekompozicija naponskog signala na fazi “A” na IMF-ove.....	127
Slika 6.4 Frekvencijski spektar odgovarajućih IMF-ova	128
Slika 6.5 Zavisnost greške u određivanju lokacije kvara od dužine voda.....	131

POPIS TABELA

Tabela 3.1 Osnovne karakteristike analiziranih vodova	48
Tabela 3.2 Vrijednosti frekvencija dobijene EMD metodom pri uključenju	51
neopterećenih vazdušnih vodova dužina 204 km i 30 km	
Tabela 3.3 Vrijednosti frekvencija dobijene STFT metodom pri.....	52
uključenju neopterećenih vazdušnih vodova dužina 204 km i 30 km	
Tabela 3.4 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa	54
izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog voda dužine 204 km	
Tabela 3.5 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa	55
izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog voda dužine 30 km	
Tabela 3.6 Osnovne karakteristike analiziranih vodova	62
Tabela 3.7 Vrijednosti analitički dobijenih frekvencija pri uključenju	63
vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u jednofaznom zemljospoju	
Tabela 3.8 Vrijednosti frekvencija dobijene primjenom EMD pri uključenju.....	66
vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u jednofaznom zemljospoju	
Tabela 3.9 Vrijednosti frekvencija dobijene STFT metodom pri uključenju.....	67
vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u jednofaznom zemljospoju	
Tabela 3.10 Vrijednosti analitički dobijenih frekvencija pri uključenju	70
vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u dvofaznom zemljospoju	
Tabela 3.11 Vrijednosti frekvencija pri uključenju vazdušnih vodova dužina	73
500 km i 30 km u dvofaznom zemljospoju dobijene EMD metodom	
Tabela 3.12 Vrijednosti frekvencija dobijene STFT metodom pri uključenju.....	74
vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u dvofaznom zemljospoju	
Tabela 4.1 Frekvencije dobijene EMD metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda	82
Tabela 4.2 Frekvencije dobijene STFT metodom upoređene sa izračunatim	83
vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda	
Tabela 4.3 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa izračunatim	85
vrijednostima za proces isključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda	
Tabela 4.4 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa izračunatim	88

vrijednostima za proces isključenja neopterećenog 10 kV nadzemnog voda	
Tabela 4.5 Frekvencije dobijene EMD metodom upoređene sa izračunatim.....	91
vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 10 kV kablovskog voda	
Tabela 4.6 Frekvencije dobijene STFT metodom upoređene sa izračunatim	92
vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 10 kV kablovskog voda	
nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne	
eksponencijalne komponente	
Tabela 5.1 Vrijednosti klasifikatora K za pojedine radne režime	116
Tabela 5.2 Parametri analiziranih vodova.....	118
Tabela 5.3 Vrijednosti klasifikatora K za karakteristične dužine vodova i radne režime	118
Tabela 6.1 Poređenje vrijednosti frekvencija detektovanih primjenom	126
EMD metoda i proračunom dobijenih vrijednosti u slučaju	
uključenja voda u jednofaznom zemljospoju	
Tabela 6.2 Poređenje vrijednosti frekvencija detektovanih primjenom.....	128
EMD metoda i proračunom dobijenih vrijednosti u slučaju	
uključenja voda u dvofaznom zemljospoju	
Tabela 6.3 Procjena tačnosti predloženog metoda	130

Uvod

U eri ekspanzije upotrebe električnih uređaja, električna energija predstavlja esencijalnu potrebu stanovništva. Simultani procesi demonopolizacije elektroenergetskog sektora, razvoja tržišta električne energije i upliva pametnih (smart) potrošača u strukturi konzuma, rezultiraju dodatnim zahtjevom – da isporučena električna energija bude adekvatnog kvaliteta. Poremećaj kvaliteta električne energije predstavlja bilo koji problem manifestovan u vidu devijacija napona, struje ili frekvencije, koji za posljedicu ima kvarove ili smetnje u radu električnih uređaja. Najčešći uzročnici poremećaja se vezuju za rad mikrokontrolerski kontrolisanih uređaja i drugih nelinearnih potrošača, kao i određene komutacione aktivnosti i kvarove do kojih dolazi u samoj mreži.

Loš kvalitet električne energije može imati ozbiljne posledice na pojedine kategorije osjetljivih potrošača, kao što su računari, programabilna logička kola i zaštitni releji, kod kojih dolazi do gubitka podataka i nepravilnog funkcionisanja. Takođe, poremećaj kvaliteta električne energije može prouzrokovati oštećenje pojedinih djelova opreme u elektroenergetskim sistemima, prvenstveno izolacije, odvodnika prenapona, kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije, osjetljive opreme za mjerenje, izazvati pregrijavanje nultog provodnika, transformatora i električnih motora, kao i smetnje u radu uređaja za komunikaciju.

Dakle, pravovremena detekcija poremećaja i njegovo uklanjanje u što kraćem vremenskom intervalu predstavlja osnovu pouzdanog i bezbjednog rada sistema.

Postoji čitav set karakterističnih poremećaja vezanih za kvalitet električne energije, koji se mogu klasifikovati na različite načine i koji se pojedinačno analiziraju, a sve sa ciljem boljeg sagledavanja njihovih karakteristika. Takvo poznanje će doprinijeti bržoj detekciji i eliminaciji problema. Navedeno upućuje da moderna elektroenergetika ima mnogo tješnju vezu sa drugim granama elektrotehnike. Gotovo je nemoguće proučavati bilo kakav problem u elektroenergetskim sistemima bez

poznavanja energetske elektronike i znanja iz oblasti digitalne obrade signala. Konkretno, metode digitalne obrade signala omogućavaju dekompoziciju signala, analizu dobijenih komponenti i generisanje zaključaka koji bi bili "pokriveni" bez poznavanja i upotrebe ovih metoda.

Furijeova transformacija (FT) predstavlja najrasprostranjeniju metodu za harmonijsku analizu signala, koja daje informacije o spektralnom sadržaju signala, ali ne i o vremenu u kome se pojedine spektralne komponente pojavljuju. Dakle, ovo je metoda prikladna za analizu stacionarnih signala. Međutim, najveći broj poremećaja koji su uzrok degradacije napona napajanja u elektroenergetskim sistemima se karakterišu signalima nelinearne i nestacionarne prirode

S tim u vezi, FT je neadekvatna i njen nedostatak se u velikoj mjeri prevazilazi primjenom kratkotrajne Furijeove transformacije (STFT). STFT se koristi za analizu nestacionarnih signala, a bazira se na pretpostavci da se za veoma kratki vremenski interval signal može smatrati stacionarnim. Osnovni nedostatak STFT metoda je činjenica da rezolucija u vremenu i frekvenciji ne može istovremeno biti proizvoljno mala, odnosno poboljšanje frekventne rezolucije dovodi do smanjenja vremenske i obratno.

U fokusu ove doktorske disertacije biće različiti naponski poremećaji i njihova analiza korišćenjem EMD metode (Empirical Mod Decomposition), za koju je potvrđeno, što kroz istraživanja zastupljena u literaturu, što kroz autorova istraživanja, da predstavlja vrlo upotrebljivu i naprednu tehniku digitalne obrade signala, naročito pri analizi realnih naponskih signala opterećenih šumom. Konačno, ovom metodom se prevazilaze uočeni problemi u primjeni FT i iz nje izvedene STFT.

Doktorskom disertacijom su prvo simulirani i analizirani karakteristični naponski poremećaji, kao što su: propadi napona, flikeri, harmonici, šumovi i drugi koji su u dostupnoj literaturi tretirani i izdvojeni kao posebno interesantni sa aspekta kvaliteta električne energije. Pokazano je da EMD metoda daje jako dobre rezultate pri analizi navedenih poremećaja. Imajući na umu intenciju da ova disertacija bude usmjerena ka realnim naponskim signalima, odnosno složenim poremećajima u elektroenergetskim sistemima, nametnulo se pitanje kako analizirati takve signale i da li je EMD metoda adekvatno rješenje. U tom smislu odabrani su sklopni prenaponi koji nastaju pri naglim promjenama režima u kolu, odnosno pri komutacijama prekidača i

značajno ugrožavaju kvalitet električne energije. Kratkog su trajanja i neperiodičnog talasnog oblika. Dodatno, pregledom dostupne literature konstatovan je nedostatak ovakvih istraživanja i zaključaka. Dobijeni rezultati primjenom EMD metode su upoređeni sa analitički proračunatim vrijednostima.

Neophodno je istaći da, iako je donedavno analiza sklopnih prenapona i odgovarajućih prelaznih procesa bila povezana isključivo sa visokim naponskim nivoima, danas se mora uzeti u obzir i njihov uticaj na kvalitet električne energije čak i kada se radi o mrežama nižih napona.

U praksi, uključenje voda spada među najčešće sklopne operacije. Uključenje voda je asimetričan proces koji može, zavisno od određenih uslova, biti praćen pojavom veoma visokih prenapona. Situacija postaje još složenija ukoliko u samom momentu uključenja na vodu postoji neka vrsta zemljospoja, jer amplituda prenapona na zdravim fazama u ovom slučaju može biti znatno veća nego u normalnom radnom režimu. Ovako visoki prenaponi mogu dovesti do oštećenja kako samog voda tako i ostale opreme. Stoga je od izuzetnog značaja detekcija i lokalizacija kvara u što kraćem vremenskom periodu, kako bi se izbjegle neželjene posledice po sistem i uklonio uzrok degradacije napona.

Može se uočiti da u dostupnoj literaturi postoje mnoga istraživanja koja se odnose na problematiku detekcije, klasifikacije i lokalizacije kvara na elektroenergetskim vodovima, ali se zapaža da su ona uglavnom usmjerena na pojavu zemljospoja u momentu kada je vod već u radnom režimu, odnosno u stacionarnom stanju, i kod koga je proces uključenja već završen. Nasuprot tome, situacija je potpuno drugačija kada se posmatra postojanje kvara u momentu uključenja voda, pa je uočljiv nedostatak rezultata istraživanja koja se odnose na ovu problematiku.

Ovom doktorskom disertacijom razvijen je klasifikacioni metod za određivanje režima rada neopterećenog vazdušnog voda prilikom uključenja. Naime, u procesu uključenja voda od velike važnosti je pravovremena informacija o postojanju određene vrste kvara, kao što je zemljospoj, kako bi se vod isključio u što kraćem vremenskom periodu i time izbjeglo oštećenje opreme i degradacija kvaliteta napona. Predloženi metod omogućava da se u kratkom vremenskom periodu utvrdi da li je posmatrani vod u normalnom režimu rada ili u zemljospoju (analizira se mogućnost pojave jednofaznog, dvofaznog i trofaznog zemljospoja). Predloženi metod je naglašeno primjenjiv u

inženjerskoj praksi, naročito u slučajevima pojave kvarova sa viskom impedansom i ne zahtijeva ugradnju bilo kakve dodatne opreme u trafostanicama. U razvoju ovog klasifikacionog modela EMD metoda ima važnu ulogu.

Konačno, doktorskom disertacijom je razvijen i metod koji omogućava brzu i preciznu lokalizaciju mjesta kvara, odnosno tačke u kojoj je došlo do nastanka zemljospoja.

Doktorska disertacija je realizovana kroz šest poglavlja.

U prvom poglavlju predstavljene su metode digitalne obrade signala koje se najčešće koriste u analizi problematike kvaliteta električne energije. Dat je detaljan prikaz prednosti i nedostaka razmatranih metoda.

Drugo poglavlje sadrži prikaz osnovnih tipova poremećaja koji se javljaju u elektroenergetskim sistemima. Za svaki od navedenih poremećaja, na osnovu matematičkog izraza koji ga opisuje, simuliran je odgovarajući naponski signal. Simulirani poremećaji analizirani su primjenom EMD metoda.

Treće poglavlje prikazuje analizu naponskih poremećaja koji nastaju u procesu uključenja nadzemnog elektroenergetskog voda. Kako su posmatrani poremećaji nesimetrični, ne mogu se predstaviti monofazno, već se mora koristiti trofazna prezentacija pri analizi. Urađen je matematički model za uključenje neopterećenog voda u normalnom režimu rada kao i u režimu kvara, odnosno uz pojavu jednofaznog, dvofaznog ili trofaznog zemljospoja u nekoj tački voda. Svi simulirani signali analizirani su primjenom EMD metode, a dobijeni rezultati upoređeni su sa analitički dobijenim vrijednostima.

U četvrtom poglavlju je razmatrana mogućnost primjene metoda digitalne obrade signala za analizu realnih naponskih signala nastalih pri procesu uključenja i isključenja trofaznih kablovskih i vazdušnih vodova u praznom hodu, zasnovanih na eksperimentalno dobijenim podacima. Ovako dobijeni signali su veoma složeni, čemu u velikoj mjeri doprinosi prisustvo šuma, pa su stoga znatno komplikovaniji za analizu od signala koji su rezultat manje ili više preciznih programa za simulaciju. Pored EMD metode, harmonijska analiza ovih signala je sprovedena i STFT metodom. Za posmatrani dio elektroenergetskog sistema, analitički su proračunate očekivane vrijednosti frekvencija. Nakon toga je, u cilju provjere efikasnosti navedenih metoda

digitalne obrade signala izvršeno je upoređivanje njima izdvojenih vrijednosti i rezultata proračuna.

U petom poglavlju je predstavljen razvoj klasifikacionog metoda za određivanje režima rada neopterećenog vazdušnog voda prilikom uključenja. Metod omogućava da se utvrdi da li je posmatrani vod u normalnom režimu rada ili u zemljospoju, kao i određivanje vrste kvara ukoliko je on prisutan. Prednosti predloženog metoda ogledaju se u velikoj brzini, tačnosti i jednostavnosti, što ga čini pogodnim za primjenu u inženjerskoj praksi.

U šestom poglavlju je predstavljen razvijeni metod za određivanje lokacije jednofaznog ili dvofaznog zemljospoja na nadzemnim vodovima, ukoliko se utvrdi postojanje ove vrste kvara prilikom procesa uključenja. Naime, nakon detekcije pojave zemljospoja precizna lokalizacija mjesta kvara je od izuzetnog značaja za brzu eliminaciju njegovog uzroka, a time i smanjenje negativnih posledica koje mogu dovesti do oštećenja opreme i ugroziti normalno snabdijevanje potrošača.

Na kraju doktorske teze je dat zaključak sa smjernicama za dalja istraživanja, kao i pregled korištene literature.

POGLAVLJE 1

Metode digitalne obrade signala

U ovom poglavlju dat je prikaz metoda digitalne obrade signala koje se uobičajeno koriste prilikom analize kvaliteta električne energije.

Opšte prihvaćeni metodi koji se najčešće primjenjuju u ovoj oblasti su Furijeova transformacija (FT), koja je veoma dug period predstavljala dominantan metod u oblasti analize signala i kratkotrajna Furijeova transformacija (STFT) [1,2]. Pokazuje se da navedeni metodi, kao i ostali ranije korišćeni (Wavelet, Wigner-Ville-ova raspodjela, S metod), a koji su uglavnom izvedeni određenim modifikacijama Furijeove transformacije, nisu imali potpuni uspjeh u analizi nelinearnih i nestacionarnih signala [3-7].

Takođe je prikazan Empirijski metod dekompozicije (EMD) koji je posebno razvijen za analizu nelinearnih i nestacionarnih procesa. To je relativno nov, ali izuzetno uspješan metod kada je u pitanju problematika koja se odnosi na nelinearne i nestacionarne signale, kakvi su većinom i signali koji odgovaraju poremećajima u kvalitetu napona napajanja. Ovaj metod će, zbog navedenih pogodnosti, biti primjenjen u najvećem dijelu analiza sprovedenih u narednim poglavljima.

1.1 Furijeova analiza

Prilikom analize linearnih i stacionarnih signala uobičajeno je korišćenje Furijeove analize, čiju je osnovu 1807. formulisao francuski matematičar Joseph Fourier. On je ustanovio da se periodične funkcije mogu razložiti na prostoperiodične komponente. Navedeno razlaganje signala na elementarne funkcije omogućava bolji uvid u prirodu signala, čime se pojednostavljuje njihova obrada.

Furije je iznio tezu da se svaka dovoljno glatka periodična funkcija može predstaviti kao linearna kombinacija sinusnih i kosinusnih funkcija, $\sin(kx)$ i $\cos(kx)$, $k=1,2, \dots$, čija je frekvencija oscilovanja na intervalu dužine 2π jednaka k , odnosno preko svog Furijeovog reda, na sledeći način [8]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k (\cos(kx) + b_k \sin(kx)), \quad k = 0,1,2,\dots \quad (1.1)$$

gdje su koeficijenti a_k i b_k definisani izrazima:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (1.2)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad (1.3)$$

Konstantni član $a_0/2$ predstavlja srednju vrijednost funkcije $f(x)$ na intervalu $[-\pi, \pi]$:

$$f_{sr} = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (1.4)$$

Predstavljanje funkcije u frekventnom domenu naziva se Furijeova ili harmonijska analiza.

U kompleksnom obliku Furijeov red ima sledeći zapis:

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jkx} \quad (1.5)$$

gdje su c_k Furijeovi koeficijenti definisani kao:

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{jkx} dx, \quad k = 0, \pm 1, 2, \dots \quad (1.6)$$

Zbog činjenice da niz Furijeovih koeficijenata predstavlja spektar funkcije $f(x)$ Furijeova analiza se takođe naziva i spektralna analiza.

Prema Parsevalovoj jednakosti, energijske norme funkcije i njenog spektra su jednake, pa se energija signala $f(x)$ dobija izrazom:

$$E_f = \|f\|^2 = \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2 \quad (1.7)$$

U opštem slučaju, za funkciju $f(x)$ koja je periodična sa periodom T , izrazi za Furijeov red imaju oblik:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n (\cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)) , \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.8)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (1.9)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (1.10)$$

Konstantni član $a_0/2$ predstavlja srednju vrijednost funkcije $f(t)$ na intervalu T :

$$f_{sr} = \frac{a_0}{2} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (1.11)$$

U kompleksnom obliku:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (1.12)$$

gdje su c_k Furijeovi koeficijenti definisani kao:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt , \quad n = 0, \pm 1, 2, \dots \quad (1.13)$$

Furijeovi redovi primjenjuju se za analizu periodičnih signala.

Princip razlaganja periodičnih signala u Furijeove redove moguće je uopštiti i proširiti na aperiodične funkcije njihovim predstavljanjem u vidu periodične funkcije sa beskonačnim periodom. Na ta način se definiše Furijeova transformacija, kojom je omogućena analiza aperiodičnih signala:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.14)$$

gdje je:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1.15)$$

inverzna Furijeova transformacija funkcije $F(j\omega)$, koja omogućava rekonstrukciju signala $f(t)$.

Primjena Furijeove transformacije omogućava predstavljanje bilo kog signala pomoću sinusnih i kosinusnih funkcija. Ona prikazuje analizirani signal u frekventnom domenu. Primjenom Furijeove transformacije na aperiodični signal, dobija se njegov spektar, koji je kontinualna veličina.

1.2 Kratkotrajna Furijeova analiza

Furijeova transformacija daje informaciju o spektralnom sadržaju signala, ali ne i o vremenu u kome se koja od spektralnih komponenti pojavljuje, što je čini nepogodnom za analizu nestacionarnih signala, kod kojih se spektar mijenja tokom vremena.

Da bi se ovaj problem prevazišao, za analizu nestacionarnih signala uvedena je kratkotrajna Furijeova transformacija (STFT). Ona se bazira na pretpostavci da se za veoma kratki vremenski interval signal može smatrati stacionarnim. Analitički izraz za STFT u kontinualnom vremenskom i frekvencijskom domenu je [9]:

$$\text{STFT}(\tau, \omega) = \int x(t)h(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (1.16)$$

Glavna ideja je uvođenje prozorske funkcije koja će skratiti analizirani signal, tj. da se signal posmatra kroz prozore fiksne širine. Primjenom Furijeove transformacije određuje se spektar onog dijela signala koji se “vidi” kroz određeni prozor, pri čemu se smatra da je u intervalu koji odgovara širini prozora signal stacionaran. Vremensko-frekventna reprezentacija se dobija pomijeranjem prozora duž signala.

Ključni nedostatak ovog metoda je činjenica da je širina prozora povezana sa rezolucijom frekvencije, odnosno rezolucija u vremenu i frekvenciji ne može istovremeno biti proizvoljno mala, jer su povezane Hajzenbergovom nejednačinom. Za bilo koju odabranu širinu prozora, izraz $\Delta t \Delta f$ gdje je Δt vremenska a Δf frekventna rezolucija, je uvijek konstantan:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (1.17)$$

Vidi se da kratkotrajna Furijeova transformacija zavisi od oblika prozora. Povećanje širine prozora dovodi do poboljšane frekventne rezolucije, ali istovremeno onemogućava detektovanje brzih promjena u signalu pa će se nestacionarnosti koje se javljaju u toku posmatranog intervala biti neodređene u vremenu.

1.3 Hilbert-Huangova transformacija

Hilbert – Huangova transformacija je relativno nov metod analize podataka, koji je predložen 1998. godine od strane N.E. Huanga [10]. Namijenjen je prvenstveno za analizu nelinearnih i nestacionarnih signala, prilikom čije obrade su do tada poznate metode (FT, STFT, Wavelet i S transformacija) pokazivale značajne nedostatke. Dodatno, ovaj metod je pogodan i za linearne i stacionarne signale [11]. Sastoji se iz dva posebna dijela: algoritma za dekompoziciju signala, nazvanog Empirijski metod dekompozicije (EMD) i Hilbertove transformacije (HT), koja predstavlja metod za spektralnu analizu.

Hilbert – Huangova transformacija omogućava lokalni prikaz oscilatornih komponenti signala u cilju izdvajanja trenutne vrijednosti frekvencije i amplitude.

1.3.1 Empirijski metod dekompozicije

Prvi i osnovni dio Hilbert–Huangove transformacije je Empirijski metod dekompozicije signala (EMD), koji ima za ulogu da signal prilagodi za Hilbertovu transformaciju, pa se može smatrati tehnikom predobrade signala. Primjenom navedenog metoda moguće je skoro svaki složeni skup podataka razložiti na konačan i najčešće mali broj prirodnih sastavnih funkcija (Intrinsic Mode Functions) što zatim omogućava veoma dobru primjenu Hilbertove transformacije. Naziv „prirodna sastavna funkcija“ je usvojen jer prikazuje tačno jedan način oscilovanja signala. Svaka IMF funkcija predstavlja jednostavnu harmonijsku funkciju čija amplituda i frekvencija mogu biti i funkcije vremena. Ovo je prvi lokalni i prilagodljiv metod u vremensko

frekventnoj analizi, koji je veoma efikasan. Kako je dekompozicija zasnovana na lokalnoj karakteristici vremenske skale podataka, primjenljiv je na nelinearne i nestacionarne procese.

Pomoću empirijskog metoda dekompozicije, signal se rastavlja na prirodne sastavne funkcije koje po definiciji imaju sljedeća svojstva:

- Po cijeloj dužini signala broj ekstrema i broj nula funkcije moraju biti jednaki ili se razlikovati maksimalno za jedan ,
- U svakoj tački srednja vrijednost anvelope definisane lokalnim maksimumima i lokalnim minimumima je jednaka nuli.

Metod ima fizički smisao, tj. sastoji se u tome da otkrije sastavne načine oscilovanja u signalu empirijski, i onda prema njima rastavi signal.

EMD vrši dekompoziciju posmatranog signala $x(t)$ na sumu prirodnih sastavnih funkcija preko iterativnog procesa zvanog *sifting*. Tako, lokalno, svaka IMF ima nižu frekvenciju oscilovanja od prethodno izdvojene. Prirodne sastavne funkcije se dobijaju korišćenjem sladećeg algoritma (sifting process):

1. Identifikuju se sve lokalne ekstremne vrijednosti (maksimumi i minimumi) u signalu Δt
2. Konstruišu se donja i gornja anvelopa $e_{low}(t)$ i $e_{up}(t)$
3. Odredi se srednja anvelopa:

$$m(t) = (e_{up}(t) + e_{low}(t)) / 2$$

4. Odredi se detalj:

$$d(t) = x(t) - m(t)$$

5. Ako je $d(t)$ IMF, ona se izdvoji i zamijeni se $x(t)$ sa:

$$r(t) = x(t) - d(t)$$

a ako nije, zamijeni se $x(t)$ sa $d(t)$ i nastavlja se *sifting* proces

6. Ponavljaju se koraci (1) – (5) sve dok se ne ispuni neki od kriterijuma za zaustavljanje procesa

Da bi se obezbijedilo da IMF funkcije u dovoljnoj mjeri zadrže fizički smisao neophodno je definisati od kriterijum za zaustavljanje procesa iteracije. Najšire primjenjivan kriterijum je da se ograniči vrijednost standardne devijacije izračunate za dvije uzastopne vrijednosti prirodnih sastavnih funkcija:

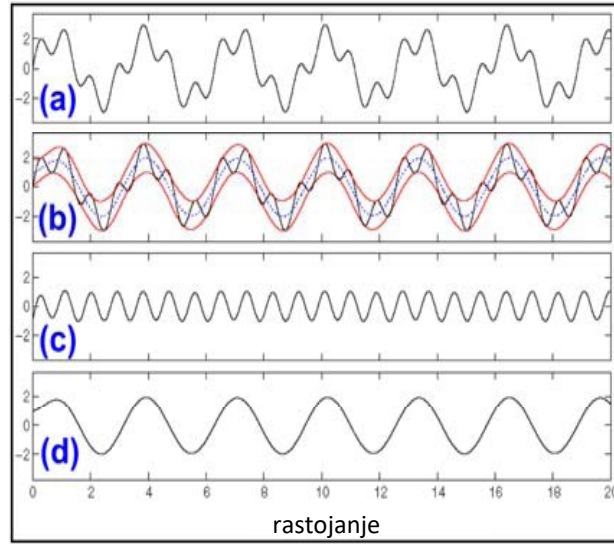
$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|imf_{(k-1)}(t) - imf_k(t)|^2}{imf_{(k-1)}^2(t)} \right] \quad (1.18)$$

Sifting proces se zaustavlja kada vrijednost SD bude između 0.2 i 0.3 (eksperimentalno određena granica). Sumiranjem svih IMF komponenti i ostatka r_N dobija se:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N imf_i + r_N \quad (1.19)$$

Na taj način ostvarena je dekompozicija signala $x(t)$ na N empirijskih komponenti (IMF funkcija) i ostatak r_N , koji može biti ili manji od neke unaprijed zadate vrijednosti, ili monotona funkcija ili konstanta.

Na slici 1.1 prikazana je ilustracija EMD-a za dvokomponentni signal.



Slika 1.1. EMD dvokomponentnog signala

- (a) suma dvije komponente,
- (b) donja i gornja anvelopa (crvena) i njihova srednja vrijednost (plava),
- (c) prva IMF,
- (d) prvi ostatak

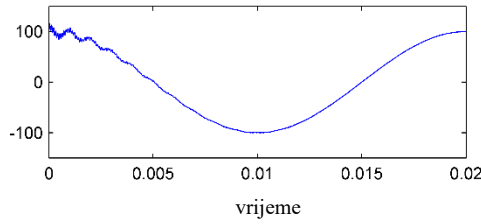
U realnim aplikacijama dekompozicija se može zaustaviti ako je unaprijed određen broj potrebnih komponenti, ili kad ostatak više ne sadrži komponente koje mogu biti od interesa.

U cilju potpunije ilustracije EMD procesa razmotrićemo simulirani složeni signal oblika:

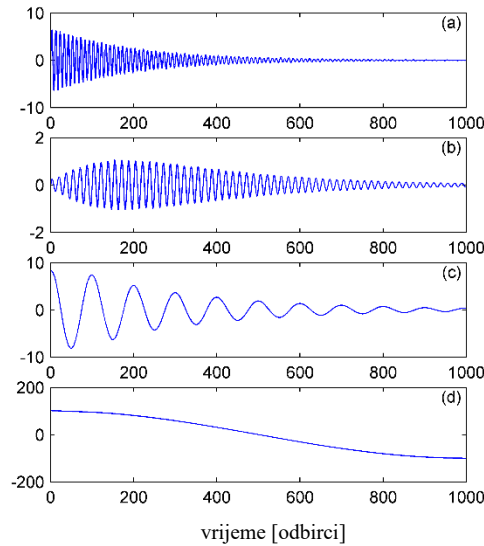
$$\begin{aligned}
 x(t) = & 100 \cos(2\pi 50t) \\
 & + 7 \sin(2\pi 10000t) e^{-t/0.002} \\
 & + 5 \sin(2\pi 6000t) e^{-t/0.0025} (1 - e^{-t/0.0025}) \\
 & + 10 \cos(2\pi 1000t) e^{-t/0.003}
 \end{aligned} \tag{1.20}$$

Signal se sastoji od glavne komponente frekvencije 50 Hz i tri prelazne komponente, čije vrijednosti frekvencija iznose 10 kHz, 6 kHz i 1 kHz respektivno.

Analizirani signal u vremenskom domenu prikazan je na slici 1.2. Rezultat dekompozicije (IMF-ovi i ostatak) prikazan je na slici 1.3.



Slika 1.2. Vremenski oblik analiziranog signala



Slika 1.3. IMF dobijene primjenom EMD-a (a-c) i ostatak (d).

U prikazanom primjeru sifting proces je zaustavljen nakon što su izdvojene sve komponente od značaja, odnosno komponente koje su od interesa za razmatranu problematiku u konkretnom slučaju.

1.3.2 Hilbertova transformacija

Drugi dio Hilbert-Huangove metode je Hilbertova transformacija. Hilbertova transformacija omogućuje formiranje analitičkih signala, za koje je moguće jednostavno odrediti trenutnu frekvenciju. Ona naglašava lokalna svojstva signala, što omogućava njegovu vremensko-frekvencijsku analizu.

Nakon što je signal jednom razložen na IMF komponente, Hilbertova transformacija se primjenjuje na svaku pojedinačno, dajući za rezultat trenutne vrijednosti amplitude i frekvencije u funkciji vremena.

Transformacijom se iz realnog dijela signala $x(t)$ dobija njegov imaginarni dio.

Za datu proizvoljnu IMF, označenu sa $d_i(t)$, Hilbertova transformacija $H[d_i(t)]$ će biti definisana na sledeći način:

$$H[d_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d_i(\tau)}{t - \tau} \cdot d\tau \quad (1.21)$$

Analitički signal nakon primjene Hilbertove transformacije ima oblik:

$$z_i(t) = d_i(t) + jH[d_i(t)] \quad (1.22)$$

odnosno:

$$z_i(t) = a_i(t) \cdot e^{j\Phi_i(t)} \quad (1.23)$$

gdje su $a_i(t)$ i $\Phi_i(t)$ amplituda i faza, respektivno. U jednačini (1.23), $a_i(t)$ i $\Phi_i(t)$ su definisani na sledeći način:

$$a_i(t) = \sqrt{d_i^2(t) + H^2[d_i(t)]} \quad (1.24)$$

$$\Phi_i(t) = \arctg \frac{H[d_i(t)]}{d_i(t)} \quad (1.25)$$

Trenutnu frekvenciju $f_i(t)$ moguće je dobiti iz jednačine (1.26):

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi_i(t)}{\partial t} \quad (1.26)$$

Nakon primjene Hilbertove transformacije na svaku IMF komponentu, originalni signal može se izraziti kao realni dio izraza:

$$x(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=1}^N a_i(t) \cdot e^{j\Phi_i(t)} \right\} \quad (1.27)$$

U prikazanom procesu je zanemaren ostatak r_N zato što je on ili monotona funkcija ili je manji od nekog unaprijed izabranog praga.

Dobijenom funkcijom su izražene amplitude (energije) i frekvencije svih komponenti kao funkcije vremena. To omogućava predstavljanje amplitude i frekvencije analiziranog signala kao funkcije vremena u trodimenzionalnom prikazu.

POGLAVLJE 2

Osnovne vrste poremećaja kvaliteta električne energije i mogućnost njihove analize primjenom EMD metoda

Poremećaj kvaliteta električne energije može se definisati kao bilo koji problem manifestovan u vidu devijacija napona, struje ili frekvencije, a koji za posledicu ima kvarove ili smetnje u radu električnih uređaja [12].

Osnovni tipovi poremećaja koji se javljaju u elektroenergetskom sistemu su:

- Propadi napona,
- Porast napona,
- Prekidi u napajanju,
- Flikeri,
- Harmonijska izobličenja,
- Impulsi,
- Usjeci,
- Oscilatorni tranzijenti.

U ovom poglavlju prikazani su simulirani naponski signali koji sadrže navedene poremećaje, kao i matematički izrazi kojima se oni mogu predstaviti [13-16]. Svi simulirani poremećaji analizirani su primjenom EMD metoda. Takođe je, u cilju provjere dobijenih rezultata, izvršena i analiza primjenom STFT metoda, kao standardnog, dugo vremena primjenjivanog metoda za analizu poremećaja kvaliteta električne energije.

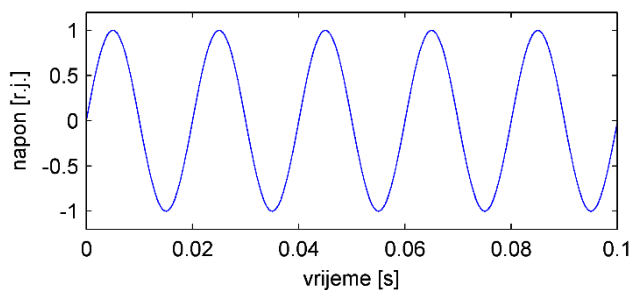
2.1 Normalni radni režim u EES

Tokom normalnog režima rada, napon u EES-u treba da ima idealni prostoperiodični oblik, koji podrazumijeva sinusoidu nominalne amplitude i nominalne frekvencije. Međutim, ovaj oblik napona moguće je približno postići samo na izlazu generatora, dok kasnije dolazi do raznih poremećaja u EES-u koji dovode do deformacija i odstupanja napona od idealnog talasnog oblika.

Idealni oblik napona u EES-u, opisan relacijom (2.1) prikazan je na slici 2.1.

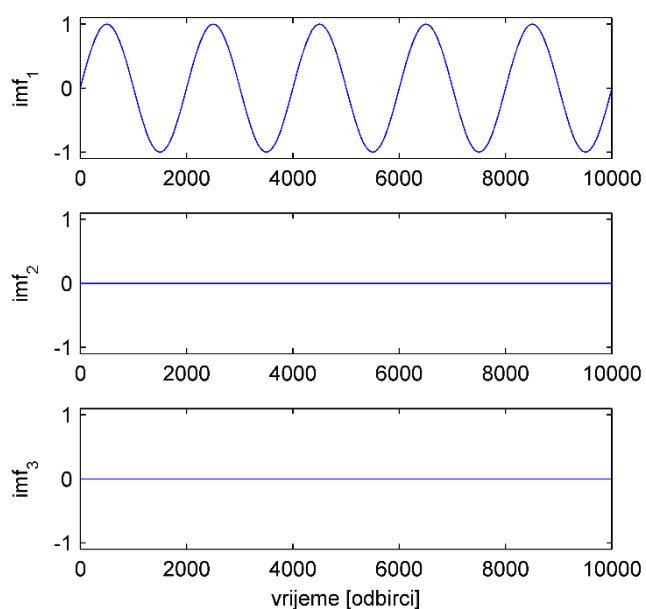
$$u(t) = U_m \sin(\omega_0 t) \quad (2.1)$$

U gornjoj relaciji U_m predstavlja amplitudu napona, dok $\omega_0 = 2\pi f$ predstavlja učestanost sistema.

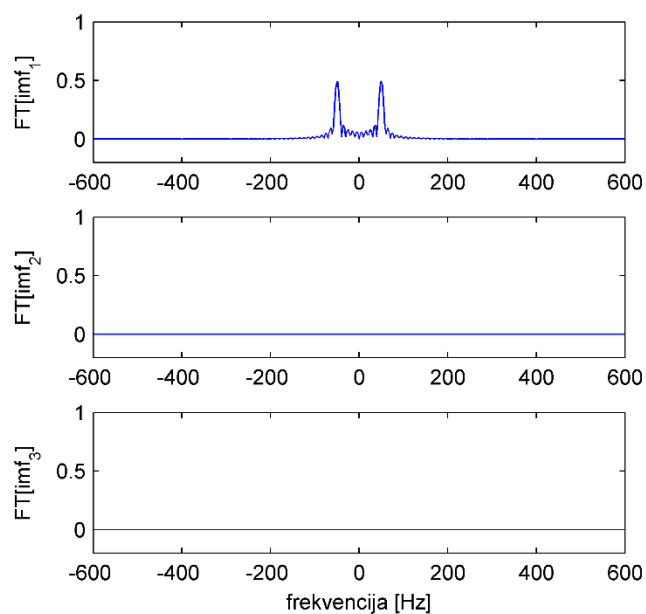


Slika 2.1 Idealni oblik napona u EES-u

Simulirani naponski signal sa slike 2.1 analiziran je primjenom Empirijskog metoda dekompozicije, što je prikazano na slikama 2.2 i 2.3. Na slici 2.2 predstavljena je dekompozicija navedenog signala na prirodne sastavne funkcije, dok je na slici 2.3 data procjena frekvencija koje se u njima sadrže.



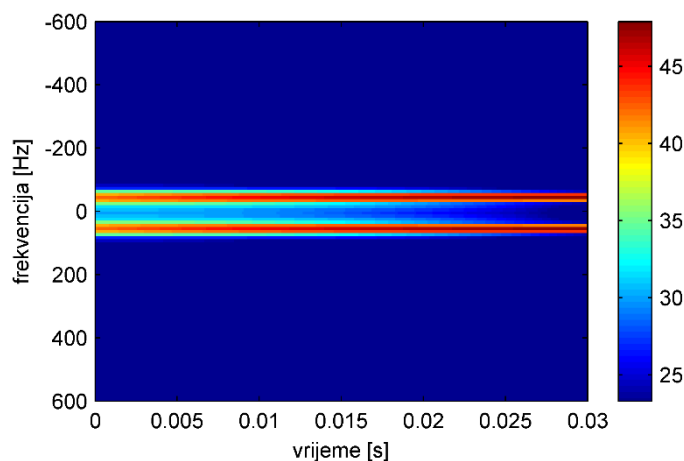
Slika 2.2 Napon na izlazu generatora predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 2.3 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Sa slike 2.3 može se uočiti da je prisutna samo jedna (osnovna) komponenta frekvencije, vrijednosti $f=48.83$ Hz.

U cilju provjere rezultata dobijenih EMD metodim, simulirani naponski signal sa slike 2.1 analiziran je i primjenom STFT metoda, što je prikazano na slici 2.4.



Slika 2.4 STFT naponskog signala u normalnom režimu rada

Vrijednost učestanosti očitane sa slike 2.4 iznosi $f=48.88$ Hz, pa se može zaključiti da postoji veoma mala razlika u dobijenim rezultatima u ovom slučaju. Ove vrijednosti prikazane su po frekventnoj osi, dok je energija dobijene komponente prezentovana pomoću colorbar-a.

2.2 Propadi napona

Naponski propad predstavlja iznenedno smanjenje amplitude napona pri nazivnoj frekvenciji. Prema IEEE 1159 [17] propad napona se definiše kao varijacija efektivne vrijednosti napona u trajanju od jedne polovine ciklusa do jednog minuta, sa vrijednošću napona između 10% i 90% od nominalne efektivne vrijednosti. Ovaj tip poremećaja u EES se veoma često javlja i smatra se da je uobičajeni broj propada napona koji se u toku jedne godine javlja pri normalnim uslovima rada u opsegu od 10 do 1000 [18].

Najčešći uzroci propada napona su uključenje velikih potrošača, uključenje motora, transformatora, kratki spojevi i kvarovi u elektroenergetskoj mreži koji su dovoljno daleko da ne izazovu potpuni prekid napajanja.

Negativan uticaj na korisnike ogleda se u ispadu osjetljivih potrošača, elektronskih uređaja, upravljačke opreme i opreme za obradu podataka, kvarovima motora, poremećajima u radu računarskih sistema i sl.

Ovu vrstu poremećaja moguće je predstaviti relacijom (2.2):

$$u(t) = U_m [1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega_0 t) \quad (2.2)$$

gdje je:

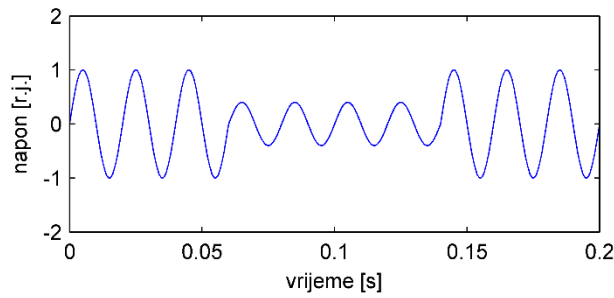
U_m -amplituda napona,

ω_0 -učestanost sistema,

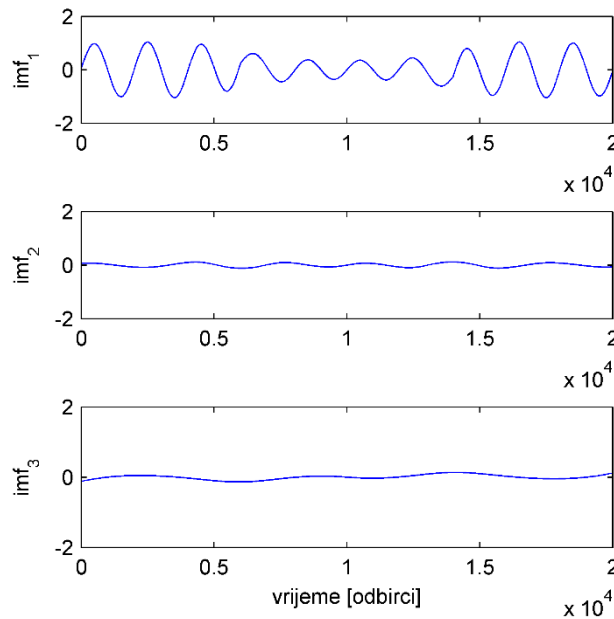
α - parametar čijim podešavanjem se reguliše amplituda poremećaja ($0.1 \leq \alpha \leq 0.9$),

t_1, t_2 -vremenski trenuci nastanka i nestanka poremećaja, respektivno.

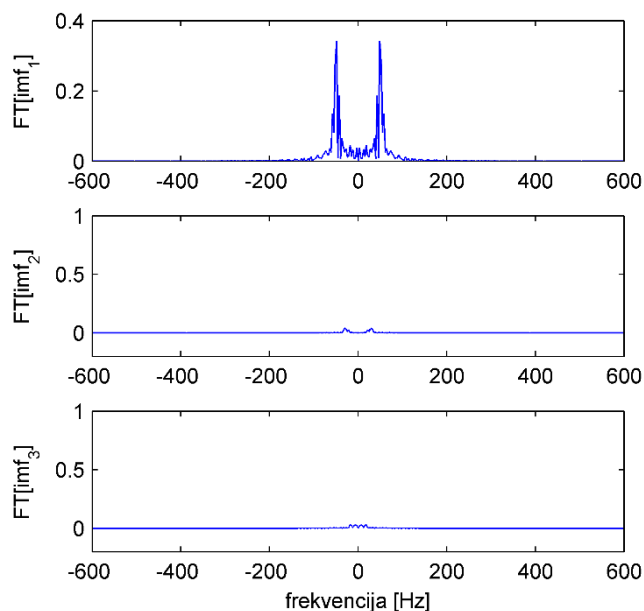
Signal simuliranog propada napona prikazan je na slici 2.5, dok slike 2.6 i 2.7 sadrže njegovo razlaganje na komponentne funkcije (primjenom EMD metode) i procjenu prisutnih frekvencija, respektivno.



Slika 2.5 Simulirani propad napona za vrijednosti $\alpha=0.6$, $t_1=0.06s$, $t_2=0.14s$



Slika 2.6 Propad napona predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija

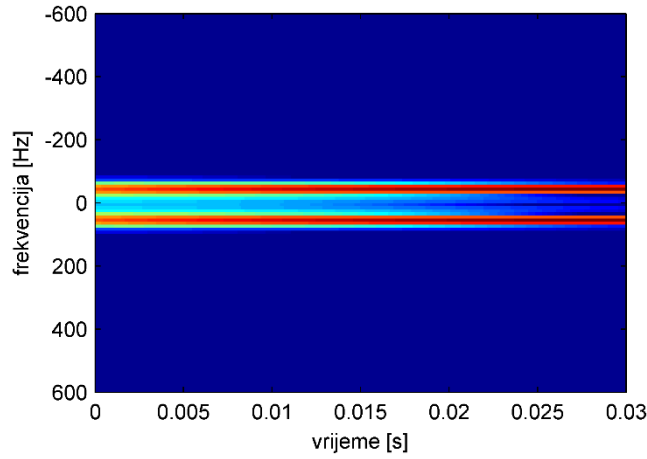


Slika 2.7 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Kao i kod predhodno analiziranog naponskog poremećaja, uočljivo je prisustvo samo jedne (osnovne) komponenta frekvencije, vrijednosti $f=48.83$ Hz. Navedeni rezultat se dobija jer u posmatranom procesu dolazi samo do pada amplitude signala, a ne i do promjene frekvencije.

Sa slike 2.6 može se uočiti da je skoro cijeli posmatrani signal sadržan u prvoj IMF. Do ovakvog rezultata primjene EMD metoda je došlo zbog prirode posmatranog signala propada napona, koji se poklapa sa definicijom prirodne sastavne funkcije. Kao posledica te činjenice, primjena FT na IMF₂ i IMF₃ ne rezultira izdvajanjem komponenti frekvencije.

Simulirani naponski signal sa pojavom propada napona analiziran je i primjenom STFT metoda, što je prikazano na slici 2.8.



Slika 2.8 Simulirani propad napona analiziran STFT metodom

I u ovom slučaju vrijednost učestanosti sa slike 2.5 je $f=48.88$ Hz, odnosno bliska je vrijednosti koja se dobija primjenom EMD metoda.

2.3 Porast napona

Porast napona predstavlja naglo povećanje amplitude napona pri nazivanoj frekvenciji. Prema IEEE 1159, porast napona se definiše kao porast efektivne vrijednosti napona na nivo između 110% i 180% od nominalne efektivne vrijednosti u trajanju od jedne polovine ciklusa do jednog minuta.

Pojava porasta napona najčešće je povezana sa kvarovima u sistemu (zemljospoj), udarima groma, ispadima motora velike snage, isključenjima velikih potrošača i sl.

Porasti napona mogu dovesti do ozbiljnih oštećenja izolacije, odvodnika prenapona, kao i osjetljive elektronske opreme.

Ovu vrstu poremećaja moguće je predstaviti relacijom (2.3):

$$u(t) = U_m [1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega_0 t) \quad (2.3)$$

u kojoj je:

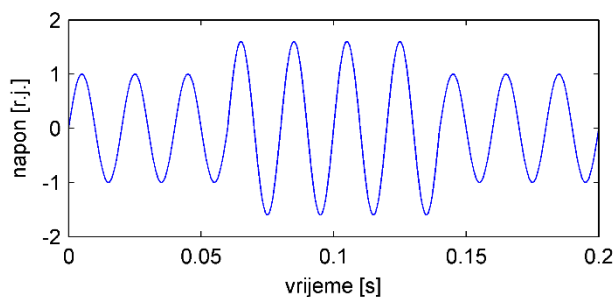
U_m -amplituda napona,

ω_0 -učestanost sistema,

α - parametar čijim podešavanjem se reguliše amplituda poremećaja ($0.1 \leq \alpha \leq 0.8$),

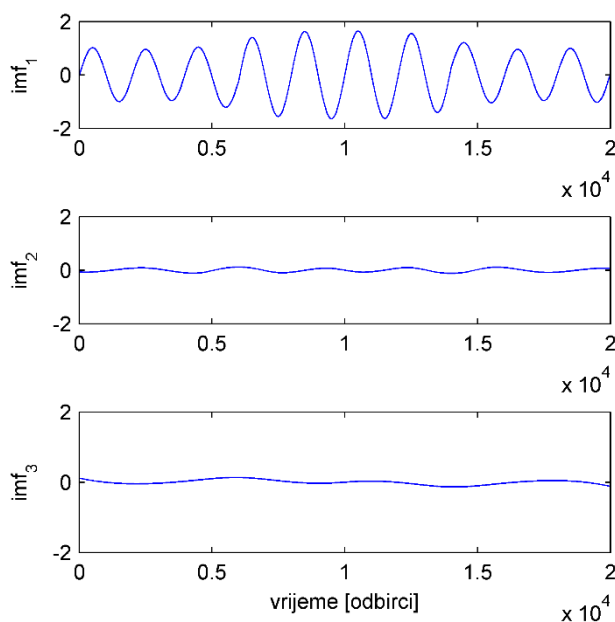
t_1, t_2 -vremenski trenuci nastanka i nestanka poremećaja, respektivno.

Na slici 2.9 prikazan je simulirani porast napona, sa parametrima $\alpha=0.6$, u trajanju od $t_1=0.06s$ do $t_2=0.14s$.

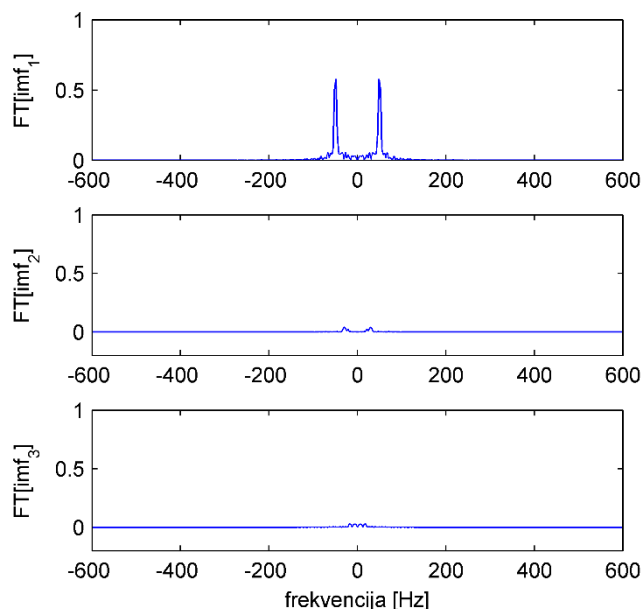


Slika 2.9 Simulirani porast napona ($\alpha=0.6$, $t_1=0.06s$, $t_2=0.14s$)

Slika 2.10 predstavlja dekompoziciju naponskog signala sa pojavom porasta napona na prirodne sastavne funkcije, dok je na slici 2.11 prikazana procjena frekvencija koje su u njima prisutne.



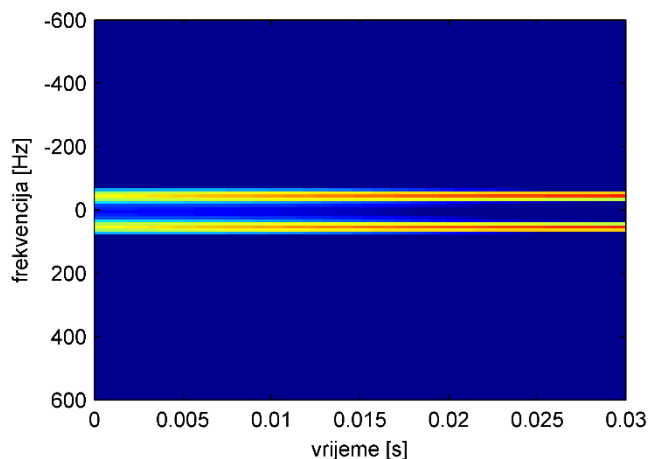
Slika 2.10 Signal u kome se javlja porast napona predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 2.11 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Sa slike 2.11 može se uočiti da je prisutna samo jedna (osnovna) komponenta frekvencije, vrijednosti $f=48.83$ Hz. Dobijeni rezultat je posledica činjenice da se u posmatranom procesu ne mijenja frekvencija signala, već isključivo dolazi do rasta njegove amplitude. Zato je, kao i u prethodnom slučaju, cio signal sadržan u prvoj IMF, pa je samo iz ove funkcije izdvojena odgovarajuća frekvencija.

Simulirani naponski signal sa pojavom porasta napona analiziran je i primjenom STFT metoda, što je prikazano na slici 2.12, a dobijeni rezultat $f=48.88$ Hz dobro se poklapa sa vrijednošću frekvencije izdvojene primjenom EMD metoda.



Slika 2.12 Simulirani porast napona analiziran STFT metodom

2.4 Prekidi napajanja

Prekidi napajanja predstavljaju potpuni gubitak napona (kada je vrijednost napona ispod 10 % od nazivne efektivne vrednosti) na jednoj ili više faza tokom određenog vremenskog perioda (IEEE 1159). Trenutni prekidi su okarakterisani trajanjem između 0,01s i 3s, privremeni prekidi između 3s i 60s, dok su trajni prekidi svi oni čije je trajanje duže od 60s.

Prekidi u napajanju potrošača se dijele na planirane (usled planiranih radova, hitnih intervencija, itd.) i neplanirane (nastale usled prolaznih ili trajnih poremećaja u EES-u).

Negativan uticaj prekida napajanja naročito je izražen u slučaju osjetljivih potrošača kao što su računari i upravljačka oprema.

Naponski signal koji sadrži trenutni prekid u napajanju moguće je predstaviti formulom (2.4):

$$u(t) = U_m [1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega_0 t) \quad (2.4)$$

gdje je:

U_m -amplituda napona,

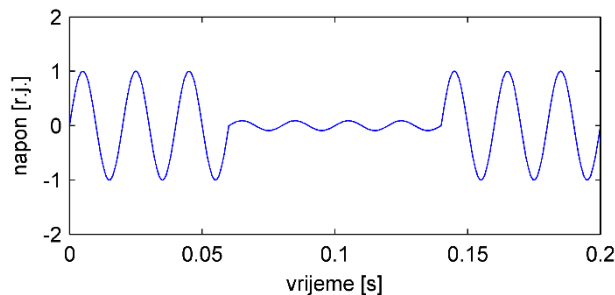
ω_0 -učestanost sistema,

α - parametar čijim podešavanjem se reguliše amplituda poremećaja ($0.9 \leq \alpha \leq 1$),

t_1, t_2 -vremenski trenuci nastanka i nestanka poremećaja, respektivno

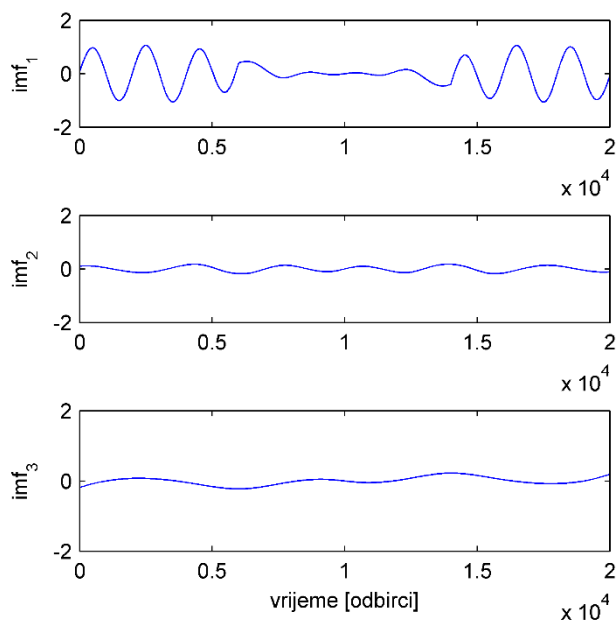
($0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 150T$).

Na slici 2.13 prikazan je simulirani naponski signal koji sadrži trenutni prekid u napajanju sa parametrima $\alpha=0.9$, trajanja $t_2-t_1=4T$.

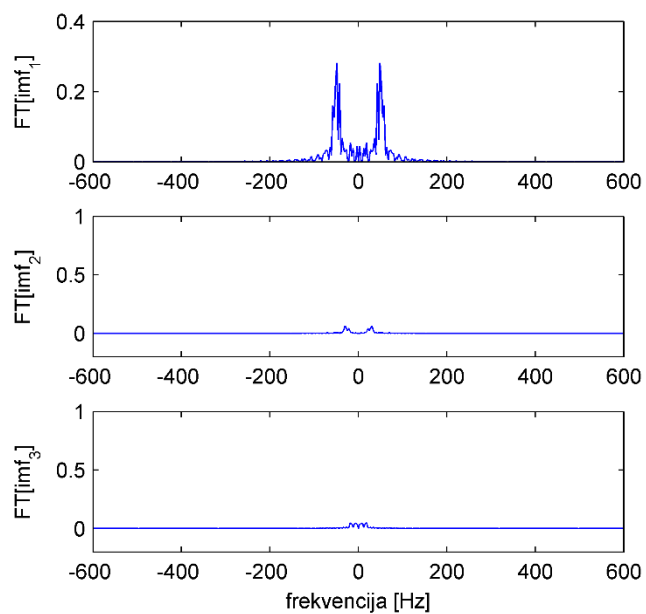


Slika 2.13 Simulirani prekid u napajanju, $\alpha=0.9$, $t_2-t_1=4T$.

Na slici 2.14 prikazana je dekompozicija naponskog signala sa trenutnim prekidom u napajanju na prirodne sastavne funkcije, dok je procjena frekvencija koje se u njima sadrže prikazana slikom 2.15.



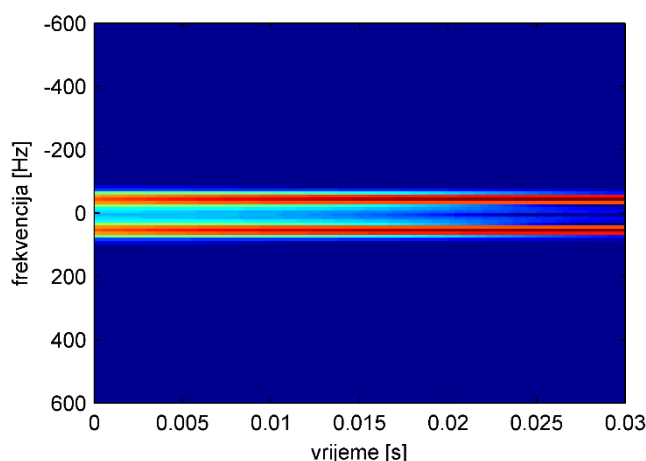
Slika 2.14 Prekid napajanja predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 2.15 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Sa slike 2.15 može se uočiti da je prisutna samo jedna (osnovna) komponenta frekvencije, vrijednosti $f=48.83$ Hz, što je u skladu sa činjenicom da prilikom pojave prekida u napajanju električnom energijom ne dolazi do pojave novih vrijednosti frekvencije.

Simulirani naponski signal sa pojavom trenutnog prekida napajanja analiziran je i primjenom STFT metoda, što je prikazano na slici 2.16.



Slika 2.16 Simulirani prekid napajanja analiziran STFT metodom

Kao i u prethodnim slučajevima, rezultat primjene STFT metoda na analizirani signal poklapa se sa rezultatima dobijenih EMD metodom, odnosno izdvojena je samo osnovna vrijednost učestanosti vrijednosti $f=48.83$ Hz.

2.5 Flikeri

Fluktuacije napona (flikeri) su periodične varijacije anvelope napona ili serija nasumičnih promjena napona, pri čemu se amplituda nalazi u granicama od 0.9 do 1.1 r.j. (prema ANSI standardu). Frekvencijski opseg flikera je od 0 do 25 Hz. Termin fliker potiče od uticaja fluktuacije napona na izvore svjetlosti, kada ljudsko oko primećuje treperenje (flicker). Fluktuacije napona predstavljaju elektromagnetsku pojavu, dok je treperenje svjetlosti (flicker) njihova negativna posledica. Termin naponski fliker se u literaturi i standardima ipak koristi i kao naziv koji opisuje ovu pojavu.

Najčešći uzroci nastanka flikera su velika opterećenja čija se vrijednost periodično mijenja, tj. fluktuiraju sa frekvencijom ponavljanja koja je bliska maksimalnoj osjetljivosti ljudskog oka (oko 10 ciklusa u sekundi). Uzročnici ove pojave mogu biti: elektrolučne peći, elektrolučni aparati za zavarivanje, pilane sa elektromotornim testerama (veliki asinhroni motori), ostrvski sistemi napajani dizel agregatima manje snage itd.

Svjetlosni fliker nastaje onda kada se naponske fluktuacije dešavaju jedna za drugom, sa određenom frekvencijom ponavljanja, te dovode do iste takve sukcesivne promjene svetlosnog fluksa. S obzirom na činjenicu da ljudsko oko zapaža varijacije osvijetljenja manje od 1%, ova pojava izaziva neprijatan osjećaj i uznemirenost kod ljudi.

Ovu vrstu poremećaja moguće je predstaviti formulom (2.5):

$$u(t) = U_m [1 + \alpha \sin(2\pi\beta t)] \sin(\omega_0 t) \quad (2.5)$$

u kojoj je:

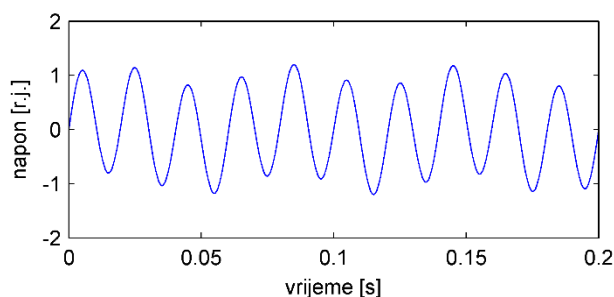
U_m -amplituda napona,

ω_0 -učestanost sistema,

α - parametar čijim podešavanjem se reguliše amplituda poremećaja ($0.1 \leq \alpha \leq 0.2$),

β - parametar čijim podešavanjem se reguliše period fluktuacije napona ($5\text{Hz} \leq \beta \leq 20\text{Hz}$).

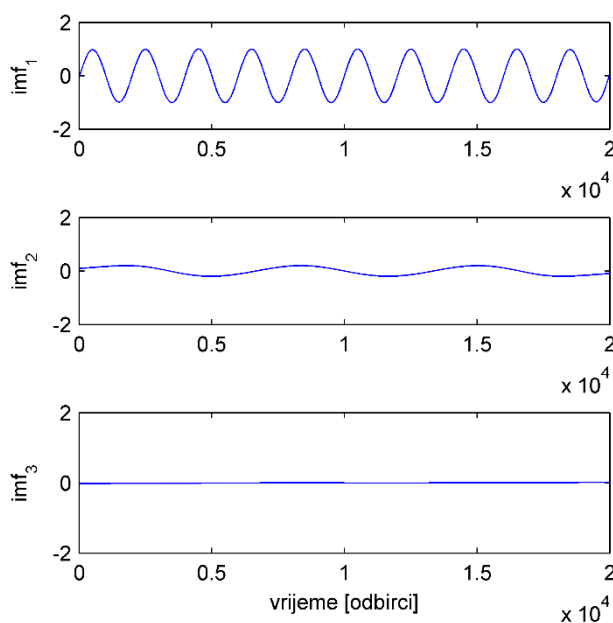
Na slici 2.17 prikazan je simulirani naponski signal sa pojavom flikera, sa parametrima $\alpha=0.2$ i $\beta=15$ Hz.



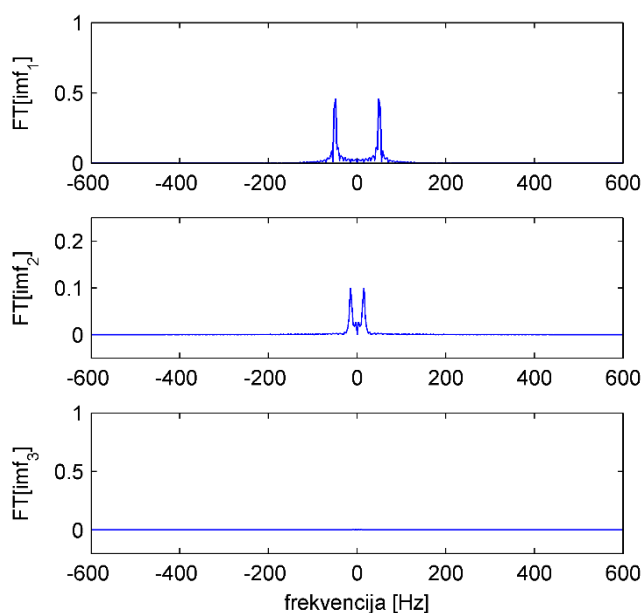
Slika 2.17 Simulirani naponski signal sa pojavom flikera

Rezultati analize naponskog signala sa pojavom flikera, prikazanog na slici 2.17, primjenom EMD metoda, predstavljeni su na slikama 2.18 i 2.19, pri čemu je na slici

2.18 prikazana dekompozicija navedenog signala na prirodne sastavne funkcije a na slici 2.19 procjena frekvencija koje se u njima sadrže.



Slika 2.18 Naponski signal sa pojavom flikera predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija

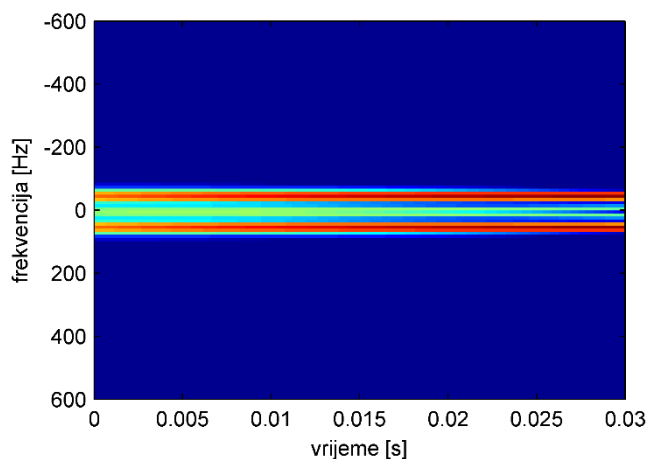


Slika 2.19 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Na slici 2.18 moguće je uočiti da su izdvojene dvije prirodne sastavne funkcije različitih frekvencija. Sa slike 2.19 vidi se da postoje sledeće komponente frekvencija:

osnovna komponenta, vrijednosti $f=48.83$ Hz i komponenta fluktuacije napona vrijednosti $f=15.26$ Hz.

Simulirani naponski signal sa pojavom flikera, analiziran primjenom STFT metoda, prikazan je na slici 2.20.



Slika 2.20 Simulirano prisustvo flikera analizirano STFT metodom

Na ovaj način izdvojene su dvije vrijednosti frekvencije: osnovna komponenta, vrijednosti $f=48.88$ Hz i komponenta fluktuacije napona $f=12.22$ Hz.

2.6 Harmonici

Harmonijska izobličenja mogu se podijeliti na: harmonike, međuharmonike (interharmonike) i podharmonike (subharmonike). Harmonici su pojava periodičnih oscilacija u signalu, čija je frekvencija cjelobrojni umnožak osnovne frekvencije signala. Za 50 Hz-ni sistem harmonici su komponente frekvencije 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz. Ovi harmonici predstavljaju: drugi, treći i četvrti harmonik, respektivno. Međuharmonici su komponente čija frekvencija nije cjelobrojni umnožak osnovne frekvencije. Tako bi npr. za 50 Hz-nu mrežu komponenta od 80 Hz bila međuharmonik. U posebnu klasu međuharmonika spadaju podharmonici ili subharmonici, čija je frekvencija dio osnovne frekvencije signala – na primjer 10 Hz, 25 Hz i sl.

Svaki harmonik je opisan svojom frekvencijom, početnim uglom i amplitudom, i obično se amplitude harmonika izražavaju u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika.

Izvori harmonika su nelinearna opterećenja, uređaji energetske elektronike, kao što su AC/DC, DC/DC, DC/AC pretvarači, velike UPS jedinice, lučne i indukcijske peći, pogoni sa promjenjivom brzinom i sl. Posljedice pojave harmonika su: pregrijavanje nultog provodnika, transformatora i električnih motora, negativan uticaj na prekidače i zaštitne releje, elektronsku opremu i telekomunikacione veze, naprezanje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije, izobličenje mrežnog napona uslijed toka harmonijskih struja i brojne druge.

Pojavu harmonika u signalu moguće je predstaviti relacijom (2.6):

$$u(t) = U_m [\alpha_1 \sin(\omega_0 t) + \alpha_3 \sin(3\omega_0 t) + \alpha_5 \sin(5\omega_0 t) + \alpha_7 \sin(7\omega_0 t) + \dots] \quad (2.6)$$

u kojoj je:

U_m -amplituda napona,

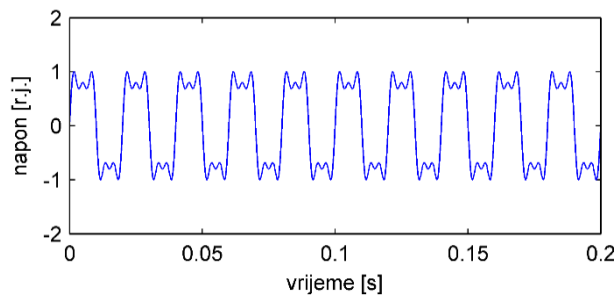
ω_0 -učestanost sistema,

$\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7, \dots$ - parametri kojima se reguliše amplituda odgovarajućih harmonika

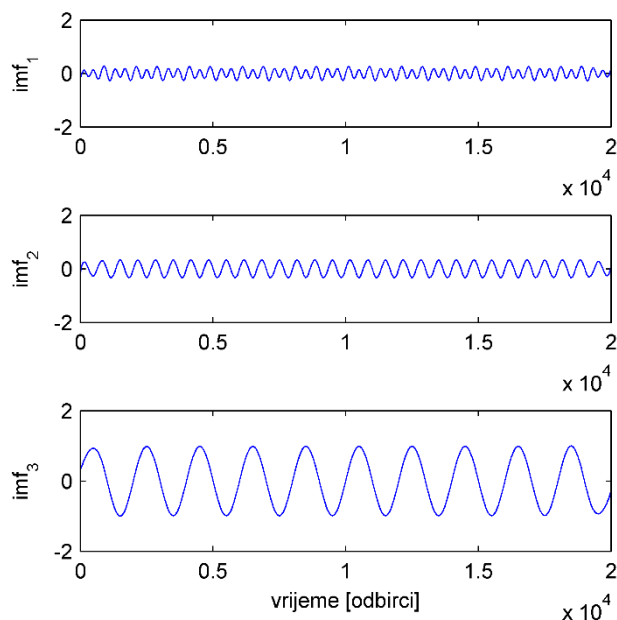
($\alpha_1 = 1, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7, \dots < 1$).

Na slici 2.21 prikazan je simulirani naponski signal sa prisustvom harmonika (pojava trećeg i petog harmonika), sa parametrima $\alpha_1=1, \alpha_3=0.4$ i $\alpha_5=0.2$.

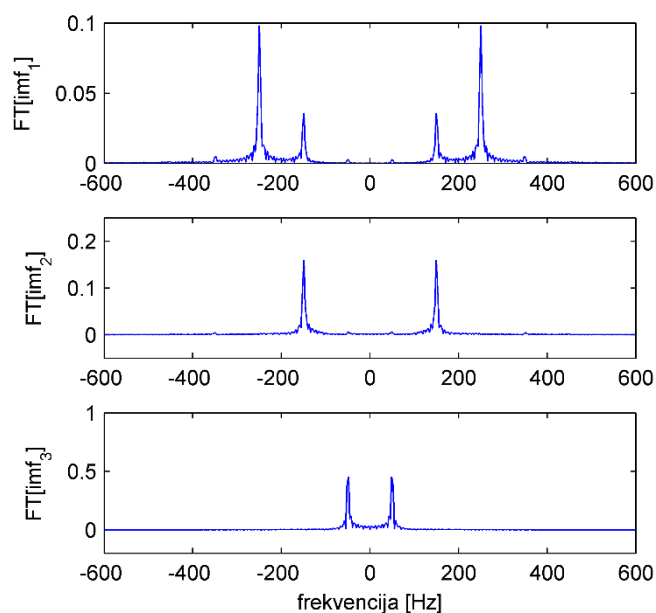
Analiza ovog signala primjenom EMD metoda prezentovana je na slikama 2.22 i 2.23. Na slici 2.22 predstavljena je dekompozicija navedenog signala na prirodne sastavne funkcije a na slici 2.23 procjena frekvencija koje odgovaraju izdvojenim IMF-ovima.



Slika 2.21 Simulirani naponski signal sa pojavom trećeg i petog harmonika



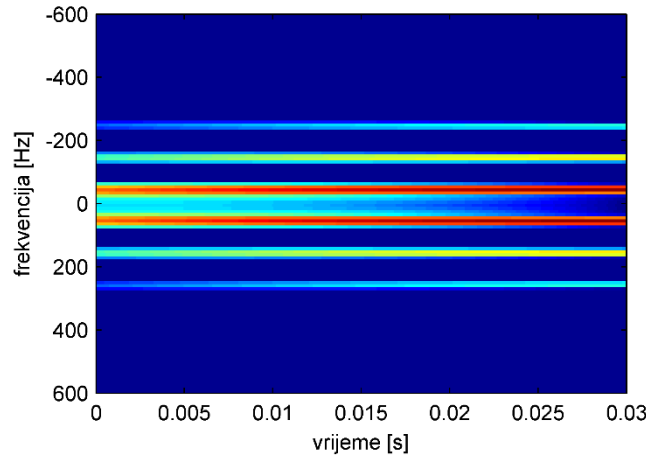
Slika 2.22 Naponski signal sa prisustvom harmonika predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 2.23 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Sa slike 2.23 zapaža se da postoje tri komponente frekvencije: osnovna komponenta, vrijednosti $f=48.83$ Hz, komponenta trećeg harmonika $f=149.54$ Hz i komponenta petog harmonika $f=250.24$ Hz. Može se zaključiti da su primjenom EMD metoda na posmatrani signal detektovane sve postojeće vrijednosti harmonika.

Simulirani naponski signal sa pojavom harmonika, analiziran primjenom STFT metoda, prikazan je na slici 2.24.



Slika 2.24 Simulirano prisustvo harmonika analizirano STFT metodom

I analiza primjenom STFT metoda potvrđuje prisustvo osnovne učestanosti, kao i petog i sedmog harmonika u posmatranom signalu, odnosno detektovane su frekvencije vrijednosti 48.88 Hz, 146.37 Hz i 254 Hz.

2.7 Impulsi (šiljci)

Periodični impulsi se pojavljuju kao kratkotrajni poremećaji u svakoj poluperiodi talasa napona (traju kraće od 0,01 s). Njihove harmonijske komponente obično su, zbog kratkog trajanja, vrlo visoke učestanosti, reda MHz.

Najčešće ih proizvode komutacioni uređaji energetske elektronike, atmosferska pražnjenja, isključenje velikih potrošača i uključivanje kondenzatorskih baterija. Prisustvo ove vrste poremećaja dovodi do ugrožavanja osjetljive elektronske opreme, što za posledicu može imati gubitak podataka.

Naponski signal u kome se javljaju periodični impulsi može se predstaviti izrazom (2.7):

$$u(t) = U_m \sin(\omega_0 t) + \text{sign}(\sin(\omega_0 t)) \sum_{n=0}^i k * [u(t - (t_1 + 0.02n)) - u(t - (t_2 + 0.02n))] \quad (2.7)$$

u kome je:

U_m -amplituda napona,

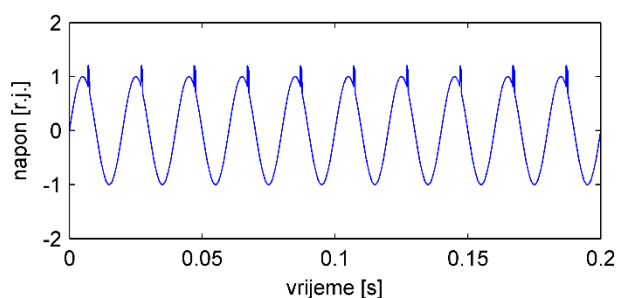
ω_0 -učestanost sistema,

k - parametar čijim podešavanjem se reguliše amplituda impulsa ($0.1 \leq k \leq 0.4$),

t_1, t_2 -vremenski trenuci u kojima dolazi do nastanka i nestanka poremećaja, respektivno, ($0.01 * T \leq t_2 - t_1 \leq 0.05 * T, 0 \leq t_1, t_2 \leq 0.5$),

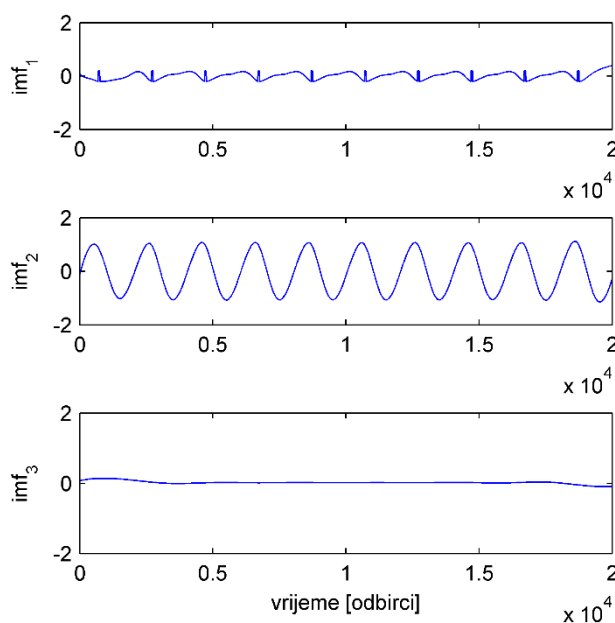
n – broj ciklusa u kome se poremećaj javlja.

Na slici 2.25 prikazan je simulirani naponski signal sa prisustvom periodičnih impulsa, sa parametrima $k=0.4, t_2-t_1=T/100$.



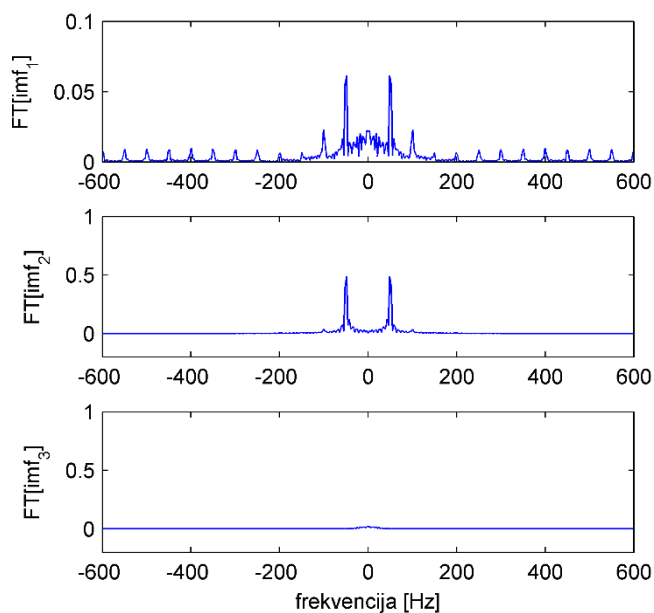
Slika 2.25 Simulirani naponski signal sa pojavom periodičnih impulsa

Slike 2.26 i 2.27 prikazuju dekompoziciju signala sa prisustvom periodičnih impulsa na prirodne sastavne funkcije i procjenu frekvencija koje se u njima sadrže.



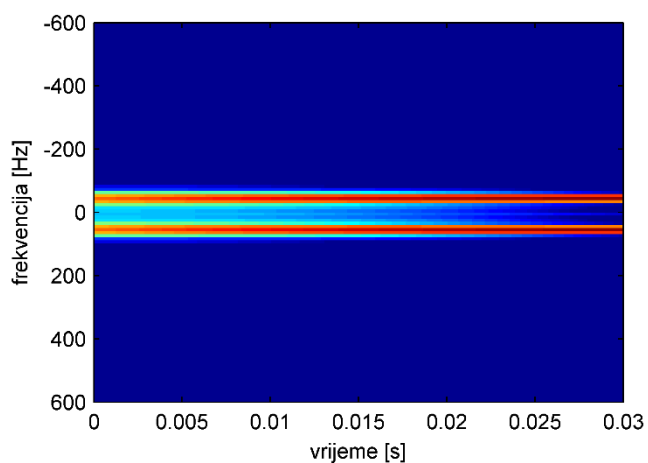
Slika 2.26 Naponski signal sa prisustvom periodičnih impulsa predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija

Sa slike 2.27 može se uočiti da je prisutna samo jedna (osnovna) komponenta frekvencije, vrijednosti $f=48.83$ Hz, što znači da EMD metod nije bila u stanju da detektuje veoma visoku frekvenciju ove vrste poremećaja.



Slika 2.27 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Simulirani naponski signal sa pojavom periodičnih impulsa, analiziran primjenom STFT metoda, prikazan je na slici 2.28.



Slika 2.28 Simulirano prisustvo periodičnih impulsa analizirano STFT metodom

I na ovaj način detektovana je samo osnovna komponenta frekvencije.

2.8 Zarezi (usjeci)

Periodični usjeci se javljaju kao kratkotrajni poremećaji kvaliteta električne energije, a uzrok im je najčešće normalan rad uređaja energetske elektronike (ispravljača, konvertora) u momentima kada dolazi do komutacije struje iz jedne faze u drugu. Ova vrsta poremećaja kvaliteta električne energije predstavlja netipičan slučaj, koji se nalazi između harmonika i tranzijenata. Razlog je u tome što se, sa jedne strane, usjeci javljaju tokom normalnog rada, pa mogu biti izdvojeni kao dio harmonijskog spektra naponskog signala, ali je s druge strane njihova frekvencija veoma velika pa se ne mogu analizirati na isti način kao ostali dio harmonijskog spektra.

Pojava usjeka u naponu utiče loše na izolaciju transformatora i generatora, na osjetljivu opremu za mjerenje, dovodi do kvarova opreme, a takođe može ugroziti rad uređaja za komunikaciju (jer su njihove visoke frekvencije često u opsegu radio frekvencija).

Naponski signal u kome se javljaju periodični usjeci može se predstaviti izrazom (2.8):

$$u(t) = U_m \sin(\omega_0 t) - \text{sign}(\sin(\omega_0 t)) \sum_{n=0}^i k * [u(t - (t_1 + 0.02n)) - u(t - (t_2 + 0.02n))] \quad (2.8)$$

gdje je:

U_m -amplituda napona,

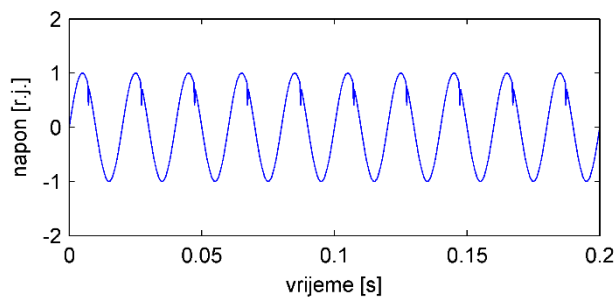
ω_0 -učestanost sistema,

k - parametar čijim podešavanjem se reguliše amplituda usjeka ($0.1 \leq k \leq 0.4$),

t_1, t_2 -vremenski trenuci u kojima dolazi do nastanka i nestanka poremećaja, respektivno, ($0.01 * T \leq t_2 - t_1 \leq 0.05 * T, 0 \leq t_1, t_2 \leq 0.5$),

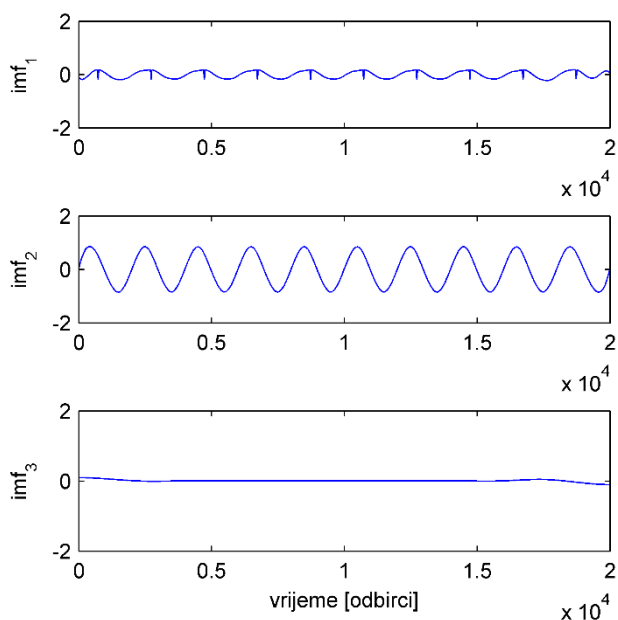
n – broj ciklusa u kome dolazi do pojave poremećaja.

Na slici 2.29 prikazan je simulirani naponski signal sa prisustvom periodičnih usjeka, sa parametrima $k=0.35, t_2-t_1=T/100$.

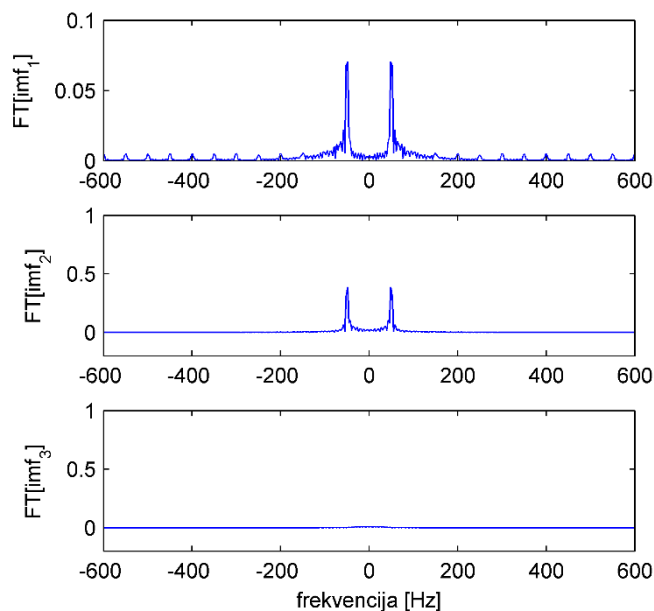


Slika 2.29 Simulirani naponski signal sa pojavom periodičnih usjeka

Analiza naponskog signala sa slike 2.29 primjenom EMD metoda prikazana je na slikama 2.30 i 2.31. Dekompozicija signala na prirodne sastavne funkcije prikazana je na slici 2.30, dok je estimacija u njima sadržanih frekventnih komponenti prikazana slikom 2.31.



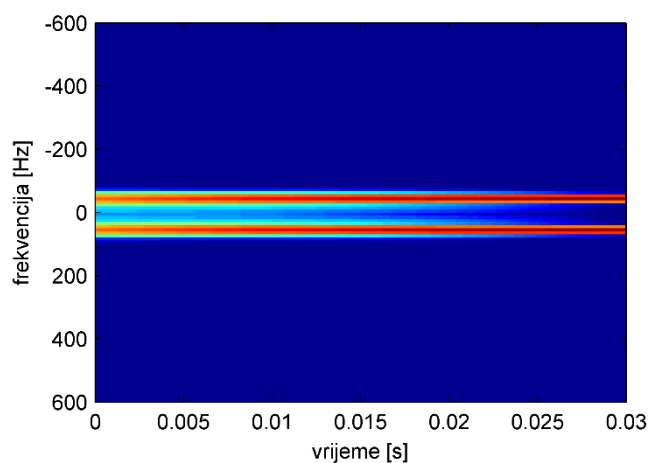
Slika 2.30 Naponski signal sa prisustvom periodičnih usjeka predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 2.31 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija

Sa slike 2.31 može se zaključiti da je registrovano prisustvo prisutna samo jedne (osnovna) komponente frekvencije, vrijednosti $f=48.83$ Hz.

Analiza simuliranog naponskog signala sa pojavom periodičnih usjeka primjenom STFT metoda, prikazana je na slici 2.32.



Slika 2.32 Simulirano prisustvo periodičnih usjeka analizirano STFT metodom

Kao i u prethodnom slučaju, nije došlo do izdvajanja visokofrekventne komponente koja je posledica analizirane vrste poremećaja.

2.9 Oscilatorni tranzijenti

Oscilatorni tranzijenti predstavljaju iznenadne promjene frekvencije napona (struje) u uslovima stacionarnog režima rada. Imaju i pozitivni i negativni polaritet, odnosno kod trenutne vrijednosti napona i struja za vrijeme oscilatornih tranzijenata dolazi do brzih promjena polariteta. Ova vrsta poremećaja karakteriše se određenim spektralnim sadržajem, amplitudom i vremenom trajanja. Dije se na niskofrekventne (<5 kHz), srednjefrekventne (5 kHz – 500 kHz) i visokofrekventne (>500 kHz).

Uzroci oscilatornih tranzijenata su: uključenje i isključenje kondenzatorskih baterija, uključenje transformatora, vodova, rad uređaja energetske elektronike, kao i atmosferska pražnjenja.

Oscilatorni tranzijenti negativno utiču na rad osjetljive elektronske opreme.

Naponski signal u kome se javljaju oscilatorni tranzijenti može se predstaviti izrazom (2.9):

$$u(t) = U_m \sin(\omega_0 t) + \alpha * e^{-t/\tau} (u(t - t_1) - u(t - t_2)) * \sin(2\pi f_n t) \quad (2.9)$$

u kome je:

U_m -amplituda napona,

ω_0 -učestanost sistema,

α - parametar čijim podešavanjem se reguliše amplituda poremećaja ($0.1 \leq \alpha \leq 0.9$),

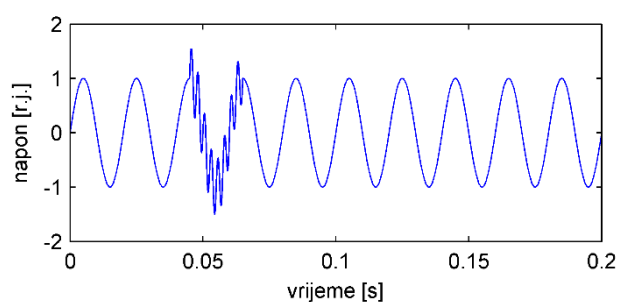
t_1, t_2 -vremenski trenuci u kojima dolazi do nastanka i nestanka poremećaja,

($0.5 * T \leq t_2 - t_1 \leq 3 * T$)

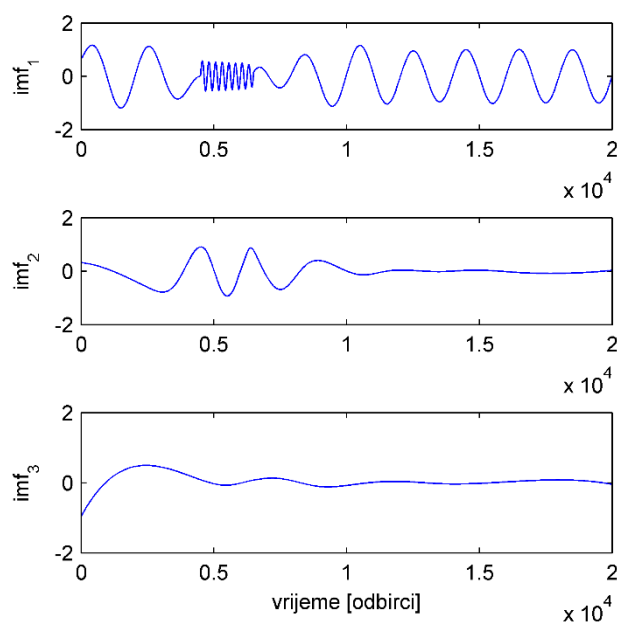
f_n -frekvencija oscilatornog tranzijenta

τ – vremenska konstanta, $0.1 \leq \tau \leq 0.2$.

Na slici 2.33 prikazan je simulirani naponski signal sa prisustvom oscilatornog tranzijenta, sa parametrima $\alpha=0.9$, $t_2-t_1=T$, $f_n=400$ Hz, $\tau=0.1$ s.

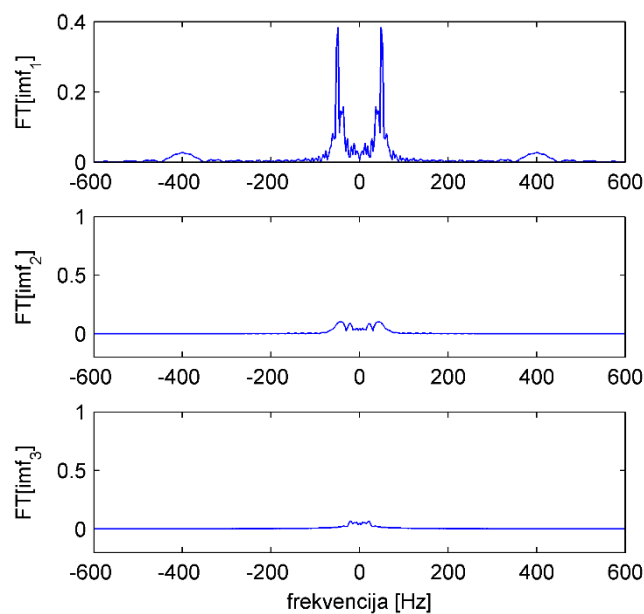


Slika 2.33 Simulirani naponski signal sa pojavom oscilatornog tranzijenta

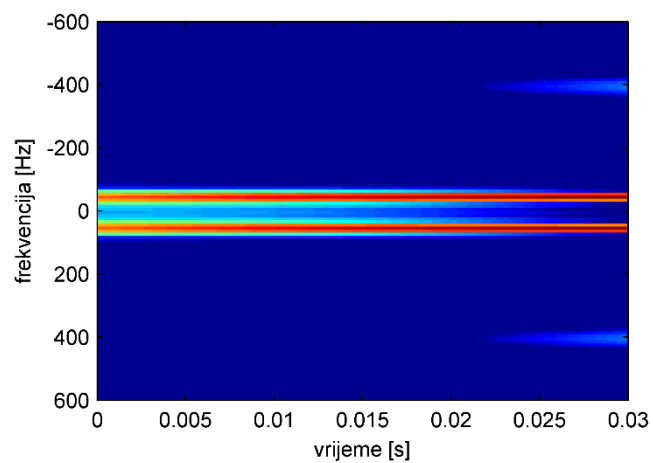


Slika 2.34 Naponski signal sa prisustvom oscilatornog tranzijenta predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija

Sa slike 2.35 može se uočiti da je prisutna osnovna komponenta frekvencije, vrijednost $f=48.83$ Hz, i, kao i frekvencija $f_n=400$ Hz, koja je posledica pojave oscilatornog tranzijenta.



Slika 2.35 Procjena frekvencija odgovarajućih prirodnih sastavnih funkcija



Slika 2.36 Simulirano prisustvo oscilatornog tranzijenta analizirano STFT metodom

Simulirani naponski signal sa pojavom oscilatornog tranzijenta, analiziran primjenom STFT metoda, prikazan je na slici 2.36. Detektovane su osnovna komponenta frekvencije $f=48.88$ Hz i frekvencija oscilatornog tranzijenta vrijednosti $f=400.8$ Hz.

POGLAVLJE 3

Trofazna prezentacija tipičnih nesimetričnih poremećaja kvaliteta električne energije i mogućnost njihove analize primjenom EMD metode

U prethodnom poglavlju dat je matematički i grafički prikaz osnovnih poremećaja kvaliteta električne energije, kao i njihova analiza primjenom EMD i STFT metoda, na bazi njihove jednofazne prezentacije. Ipak, pojedine vrste poremećaja, koji su nesimetrični, ne mogu se predstaviti na takav način, već se mora koristiti trofazna prezentacija prilikom njihove analize [19,20]. Tipovi nesimetričnih poremećaja koji su veoma zastupljeni u elektroenergetskim sistemima su:

- uključenje voda u praznom hodu uz uvažavanje rasipanja momenata zatvaranja kontakata prekidača,
- jednofazni zemljospoj
- dvofazni zemljospoj.

U ovom poglavlju prikazani su simulirani naponski signali koji sadrže navedene poremećaje, kao i matematički izrazi kojima se oni mogu predstaviti. Svi simulirani poremećaji analizirani su primjenom EMD i STFT metoda. U cilju provjere tačnosti dobijenih rezultata i efikasnosti EMD metoda, rezultati dobijeni primjenom navedenih metoda digitalne obrade signala upoređeni su sa analitički dobijenim vrijednostima.

3.1 Uključenje trofaznog voda u praznom hodu

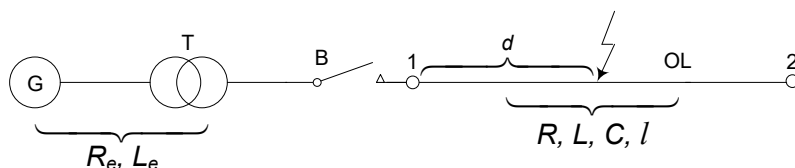
3.1.1 Matematički model uključenja neopterećenog trofaznog voda

Analiza uključenja trofaznog voda u praznom hodu često se vrši i uz pretpostavku da je posmatrani proces simetričan, zbog čega se proračun realizuje monofaznom prezentacijom [21,22].

U realnim slučajevima uključenja prisutna je nesimetrija usljed različitih momenata zatvaranja kontakata prekidača pojedinih faza i uticaja frekventno zavisnih parametara (skin efekta i povratnog puta kroz zemlju).

Da bi se obuhvatio uticaj frekventno zavisnih parametara i rasipanja momenata zatvaranja kontakata, sproveden je proračun preko trofazne prezentacije. Korišćenjem diskretne metode i metode razlaganja na komponentne sisteme, urađen je matematički model i na osnovu njega program u MATLAB-u, koji omogućava trofaznu simulaciju prelaznog procesa i grafičku prezentaciju posmatranih pojava.

Za izradu matematičkog modela korišćen je sistem koji se sastoji iz generatora (G), transformatora (T) i voda OL dužine l (slika 3.1).



Slika 3.1 Realna šema posmatranog sistema

gdje su:

R_e, L_e - ekvivalentna otpornost i induktivnost bloka generator- transformator

R, L, C - otpornost, induktivnost i kapacitivnost voda po jedinici dužine

Kako u posmatranom sistemu postoji nesimetrija usljed različitih momenata zatvaranja kontakata prekidača pojedinih faza, radi daljih proračuna izvršeno je razlaganje posmatranog sistema na α, β i 0 komponentne sisteme. U tom cilju, trofazni naponi $u_A(t)$, $u_B(t)$ i $u_C(t)$ su zamijenjeni naponima $u_\alpha(t)$, $u_\beta(t)$ i $u_0(t)$ primjenom Klarkove transformacije, odnosno pomoću sledeće transformacione matrice:

$$T_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Izvršen je prelazak na komponentnu prezentaciju analiziranog sistema, gdje su: e_α , e_β - ekvivalentne elektromotorne sile generatora poslije transformacije u komponentne sisteme,

L_e , L_{e0} , R_e , R_{e0} - α , β i 0 komponente induktivnosti i otpornosti bloka generator-transformator ($R_{e\alpha}=R_{e\beta}=R_e$, $L_{e\alpha}=L_{e\beta}=L_e$),

R , R_0 , L , L_0 , C , C_0 - α , β i 0 komponente otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti voda po jedinici dužine ($R_\alpha = R_\beta = R$, $L_\alpha = L_\beta = L$, $C_\alpha = C_\beta = C$).

Dalja analiza procesa uključenja posmatranog voda vršena je diskretnom metodom.

Proračun na dijelu mreže koji se predstavlja preko skoncentrisanih parametara vrši se prema sljedećim relacijama, koje opisuju proces u posmatranom kolu za α , β i 0 komponentne sisteme:

$$L_e \cdot \frac{\partial i_\alpha(t)}{\partial t} = e_\alpha(t) - R_e \cdot i_\alpha(t) - u_{1\alpha}(t) \quad (3.2)$$

$$L_e \cdot \frac{\partial i_\beta(t)}{\partial t} = e_\beta(t) - R_e \cdot i_\beta(t) - u_{1\beta}(t) \quad (3.3)$$

$$L_{e0} \cdot \frac{\partial i_0(t)}{\partial t} = e_0(t) - R_{e0} \cdot i_0(t) - u_{10}(t) \quad (3.4)$$

U jednačinama (3.2)-(3.4) veličine $u_{1\alpha}(t)$, $u_{1\beta}(t)$ i $u_{10}(t)$ predstavljaju trenutne vrijednosti napona u tački 1 za α , β i 0 komponentne sisteme, dok su $i_\alpha(t)$, $i_\beta(t)$ i $i_0(t)$ odgovarajuće vrijednosti struje.

Diferencijalne jednačine (3.2)-(3.4) mogu se riješiti metodom Runge-Kutta. Kako su kontakti prekidača prije uključenja voda bili otvoreni, svi početni uslovi u navedenim jednačinama su jednaki nuli.

U procesu uključenja neopterećenog voda putujući talasi se prostiru duž voda i dolazi do njihovog prelamanja i reflektovanja. Stoga se naponske komponente $u_{1\alpha}(t)$,

$u_{1\beta}(t)$ i $u_{10}(t)$ u trenutku t mogu predstaviti kao zbir odgovarajuće upadne i reflektovane komponente napona ($u_{up1\alpha}(t)$, $u_{up1\beta}(t)$, $u_{up10}(t)$ i $u_{od1\alpha}(t)$, $u_{od1\beta}(t)$ i $u_{od10}(t)$) u toj tački:

$$u_{1\alpha}(t) = u_{up1\alpha}(t) + u_{od1\alpha}(t) \quad (3.5)$$

$$u_{1\beta}(t) = u_{up1\beta}(t) + u_{od1\beta}(t) \quad (3.6)$$

$$u_{10}(t) = u_{up10}(t) + u_{od10}(t) \quad (3.7)$$

Uzimajući u obzir vezu između napona i struje u tački 1, slijedi:

$$u_{1\alpha}(t) = 2 \cdot u_{up1\alpha}(t) + Z_c \cdot i_{1\alpha}(t) \quad (3.8)$$

$$u_{1\beta}(t) = 2 \cdot u_{up1\beta}(t) + Z_c \cdot i_{1\beta}(t) \quad (3.9)$$

$$u_{10}(t) = 2 \cdot u_{up10}(t) + Z_{c0} \cdot i_{10}(t) \quad (3.10)$$

gdje su Z_c i Z_{c0} vrijednosti karakteristične impedanse voda za odgovarajući komponentni sistem.

Upadna komponenta napona u tački 1 u trenutku t može se izračunati preko odlazeće komponente u trenutku $t-2\tau$, gdje je τ -vrijeme prostiranja talasa po vodu:

$$u_{up1\alpha}(t) = u_{od1\alpha}(t-2\tau) \cdot e^{-2 \cdot l \cdot R / Z_c} \quad (3.11)$$

$$u_{up1\beta}(t) = u_{od1\beta}(t-2\tau) \cdot e^{-2 \cdot l \cdot R / Z_c} \quad (3.12)$$

$$u_{up10}(t) = u_{od10}(t-2\tau) \cdot e^{-2 \cdot l \cdot R_0 / Z_{c0}} \quad (3.13)$$

Jednačine (3.2)-(3.13) čine potpun sistem jednačina koji je dovoljan za proračun prelaznog procesa na početku voda (tačka 1).

Za proračun prelaznog procesa na kraju voda (tačka 2) diskretnom metodom neophodne su, uz prethodni sistem i jednačine (3.14)-(3.22), koje predstavljaju vezu između napona na početku i kraju voda:

$$u_{2\alpha}(t) = 2 \cdot u_{od1\alpha}(t-\tau) \cdot e^{-l \cdot R / Z_c} \quad (3.14)$$

$$u_{2\beta}(t) = 2 \cdot u_{od1\beta}(t-\tau) \cdot e^{-l \cdot R / Z_c} \quad (3.15)$$

$$u_{20}(t) = 2 \cdot u_{od10}(t-\tau) \cdot e^{-l \cdot R_0 / Z_{c0}} \quad (3.16)$$

$$u_{2\alpha}(t) = u_{up2\alpha}(t) + u_{od2\alpha}(t) = 2 \cdot u_{up2\alpha}(t) \quad (3.17)$$

$$u_{2\beta}(t) = u_{up2\beta}(t) + u_{od2\beta}(t) = 2 \cdot u_{up2\beta}(t) \quad (3.18)$$

$$u_{20}(t) = u_{up20}(t) + u_{od20}(t) = 2 \cdot u_{up20}(t) \quad (3.19)$$

$$u_{up2\alpha}(t) = u_{od1\alpha}(t - \tau) \cdot e^{-l \cdot R/Zc} \quad (3.20)$$

$$u_{up2\beta}(t) = u_{od1\beta}(t - \tau) \cdot e^{-l \cdot R/Zc} \quad (3.21)$$

$$u_{up20}(t) = u_{od10}(t - \tau) \cdot e^{-l \cdot R_0/Zc_0} \quad (3.22)$$

Uticaj frekventno zavisnog povratnog puta kroz zemlju uračunat je poznatim opštim izrazom :

$$R_0 = R + 3 \cdot R_z \quad (3.23)$$

gdje je:

R_0 - otpornost povratnog puta kroz zemlju,

R - aktivna otpornost provodnika,

R_z - otpor zemlje, koji se izračunava iz izraza:

$$R_z = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_0 \cdot f \quad (3.24)$$

pri čemu je f trenutna vrijednost frekvencije, a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

Takođe je obuhvaćen uticaj skin efekta preko povećanja aktivne otpornosti provodnika:

$$R = R_1 \cdot \left(\nu + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 \cdot \nu} \right) \quad (3.25)$$

gdje je:

$$\nu = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}},$$

R_1 – otpornost provodnika pri jednosmjernoj struji,

a – poluprečnik provodnika u mm,

σ – specifična električna provodnost.

μ – magnetska permeabilnost provodnika

ω – ugaona frekvencija

Izrazi (3.23) - (3.25), u kojima figuriše trenutna vrijednost frekvencije, koriste se za vremenski period prije uspostavljanja stacionarnog stanja ($0 \leq t < t_s$), dok se poslije tog perioda za R_0 i R koriste vrijednosti pri $f=50$ Hz.

Ukoliko postoji kašnjenje zatvaranja kontakata pojedinih faza, proces uključanja voda odvija se u tri dijela, pri čemu postoji šest mogućih kombinacija redosljeda zatvaranja kontakata prekidača pojedinih faza. Redosled zatvaranja kontakata prekidača ima značajan uticaj na komponentne elektromotorne sile. Na primjer, neka se posmatra redosled faza A, C i B, i neka su t_1 , t_2 i t_3 vremena zatvaranja kontakata faza A, C i B respektivno, pri čemu je $t_1 < t_2 < t_3$. Tada se prilikom uključanja voda proces odvija po sledećim fazama:

1. $t_1 \leq t < t_2$ (Kontakt prekidača faze A je zatvoren, dok su kontakti ostale dvije faze otvoreni):

$$e_\alpha = \frac{2}{3} E_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.26)$$

$$e_\beta = 0 \quad (3.27)$$

$$e_0 = \frac{1}{3} E_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.28)$$

2. $t_2 \leq t < t_3$ (Kontakti prekidača faza A i C zatvoreni, dok je kontakt faze B otvoren)

$$e_\alpha = E_m \cos(\omega t + \varphi) - \frac{1}{3} E_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.29)$$

$$e_\beta = -\frac{1}{\sqrt{3}} E_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.30)$$

$$e_0 = \frac{1}{3} E_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.31)$$

3. $t_3 \leq t \leq t_k$ (t_k je vremenski period u kome se posmatra prelazni proces)

$$e_\alpha = E_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.32)$$

$$e_\beta = E_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.33)$$

$$e_0 = 0 \quad (3.34)$$

U jednačinama (3.26)-(3.34) E_m je vrijednost amplitude elektromotorne sile napajanja, ω je ugaona frekvencija sistema, dok je φ ugao uključenja voda. Jednačine (3.26) - (3.34) važe pri ranije navedenom redosljedu zatvaranja kontakata pojedinih faza prilikom uključenja voda. Na sličan način moguće je posmatrati proces uključenja voda i pri drugačijem redosledu zatvaranja kontakata prekidača.

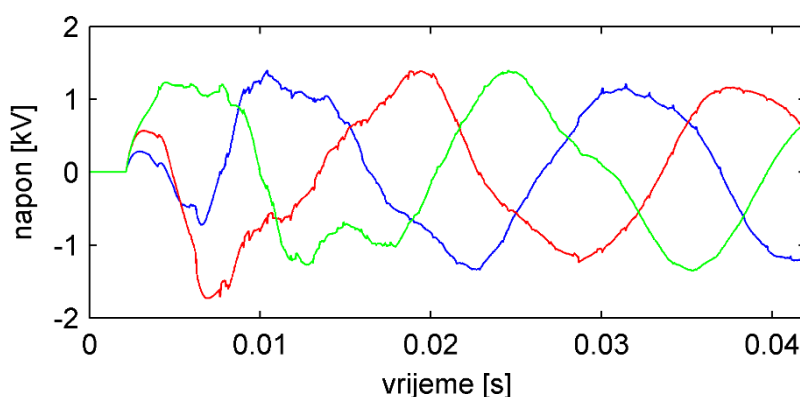
Na osnovu navedenog matematičkog modela urađen je program u MATLAB-u, koji omogućava simulaciju procesa uključenja neopterećenog trofaznog voda, uz uzimanje u obzir uticaja frekventno zavisnih parametara (skin efekta i povratnog puta kroz zemlju), kao i nesimetrije usled rasipanja momenata zatvaranja kontakata prekidača.

U radu su prikazani, kao karakteristični, slučajevi uključenja dugog voda (204 km) i kratkog voda (30 km). Podaci analiziranih sistema dati su u tabeli 3.1.

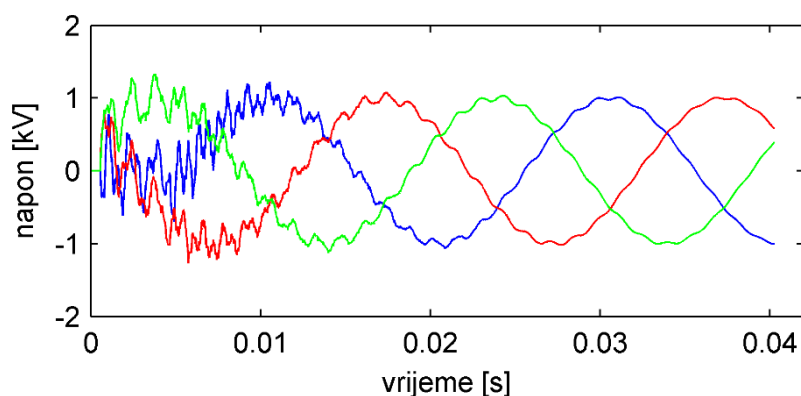
Tabela 3.1 Osnovne karakteristike analiziranih vodova

Vod br.	l [km]	Ems [r.j.]	X_e [Ω]	X_{e0} [Ω]	R_e [Ω]	R_{e0} [Ω]	Z_c [Ω]	Z_{c0} [Ω]	R [Ω]	R_0 [Ω]
1	204	1	200	91	4.4	0.7	321	640	0.0695	0.34
2	30	1	4.6	57.7	4.4	0.7	351	794	0.21	0.35

Posmatran je prelazni proces u tačkama na kraju vodova, koji je prikazan na slikama 3.2 i 3.3.

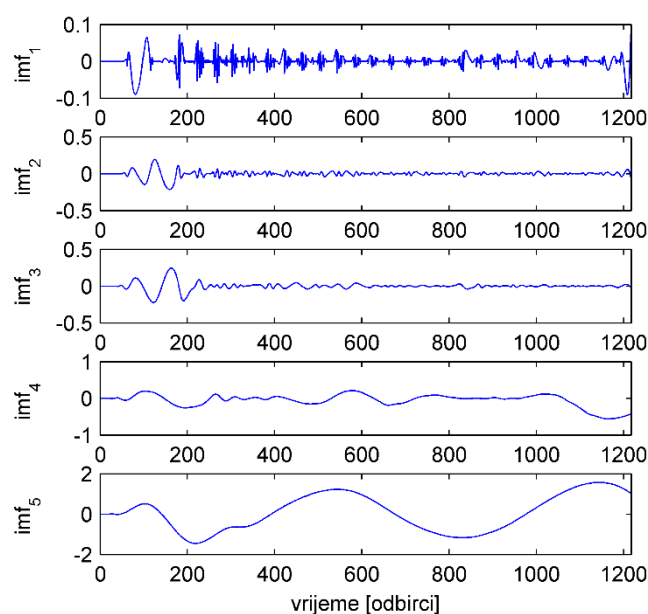


Slika 3.2 Uključenje neopterećenog vazdušnog voda dužine 204 km

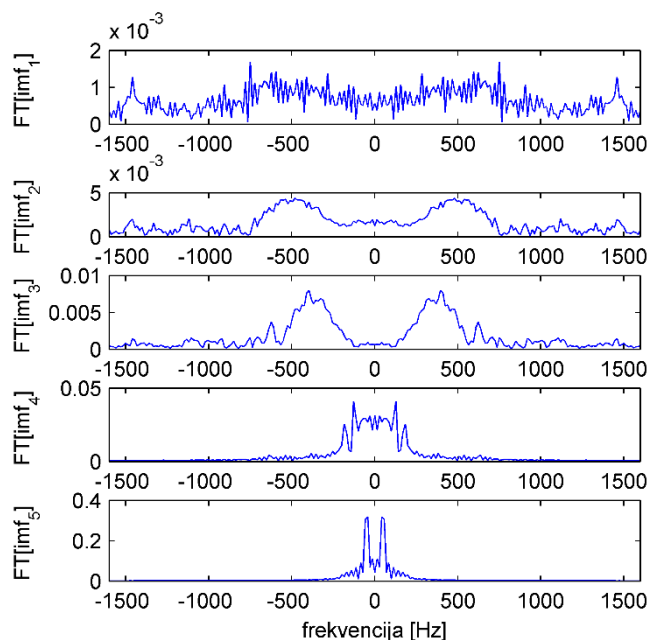


Slika 3.3 Uključenje neopterećenog vazdušnog voda dužine 30 km

U cilju dobijanja podataka o vrijednostima frekvencija prisutnih tokom prelaznog procesa koji nastaje prilikom uključenja neopterećenog voda u normalnom radnom režimu, izvršena je analiza simuliranih naponskih signala prikazanih na slikama 3.2 i 3.3 primjenom EMD metoda. Na slici 3.4 prikazana je dekompozicija napona u krajnjoj tački voda 1 na odgovarajuće prirodne sastavne funkcije, a na slici 3.5 je urađena procjena dobijenih frekvencija koje se u njima sadrže.

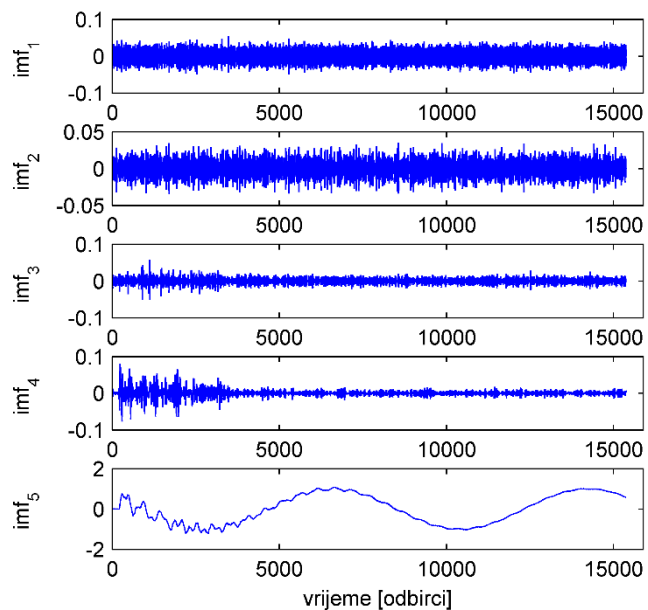


Slika 3.4 Napon na fazi "b" pri uključenju voda 1 predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija

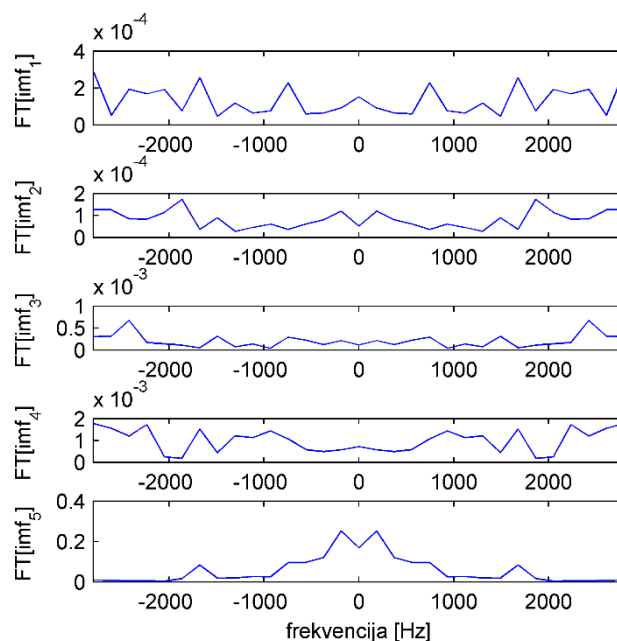


Slika 3.5 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 1

Na slici 3.6 prikazana je analiza naponakog signala u krajnjoj tački voda 2 primjenom EMD, odnosno njegova dekompozicija na IMF-ove. Procjena odgovarajućih komponenti frekvencija koje se u njima sadrže prezentovana je slikom 3.7.



Slika 3.6 Napon na fazi “a” pri uključenju voda 2 predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 3.7 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 2

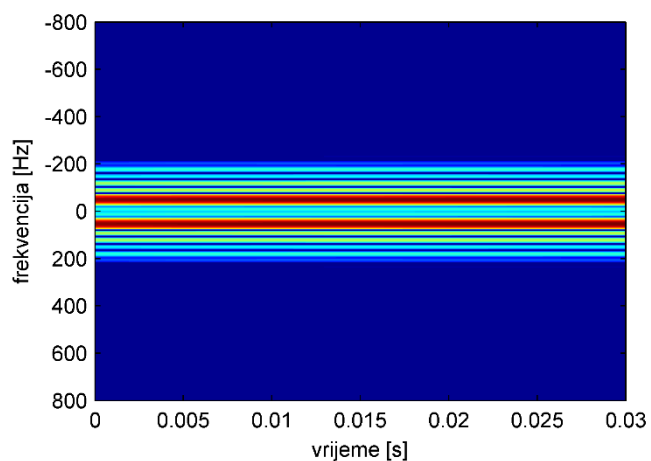
Dobijene su sledeće vrijednosti frekvencija, prikazane tabelom 3.2 :

Tabela 3.2 Vrijednosti frekvencija dobijene EMD metodom pri uključenju neopterećenih vazdušnih vodova dužina 204 km i 30 km

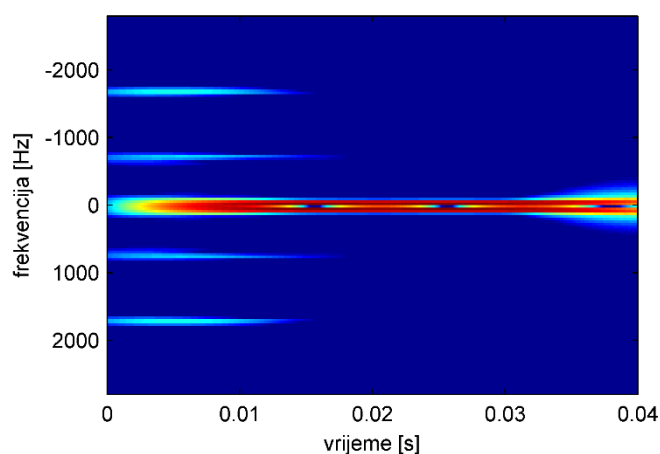
Vod br.	l [km]	Frekvencija [Hz]					
1	204	42.51	127.53	184.2	283.39	396.75	481.76
2	30	186.38	745.54	1677.45	1863.85	2423	

Takodje je izvršena analiza posmatranih signala korišćenjem STFT metode, što je prikazano na slikama 3.8 i 3.9.

Slika 3.8 prikazuje analizu naponskog signala na fazi fazi “b” pri uključenju voda 1, a slika 3.9 analizu naponskog signala na fazi fazi “a” pri uključenju voda 2.



Slika 3.8 STFT analiza prenapona pri uključenju neopterećenog voda dužine 204 km



Slika. 3.9 Analiza prenapona pri uključenju neopterećenog voda dužine 30 km STFT metodom

Rezultati dobijeni primjenom STFT metoda na simulirane naponske signale prikazane na slikama 3.2 i 3.3 prikazani su u tabeli 3.3.

Tabela 3.3 Vrijednosti frekvencija dobijene STFT metodom pri uključenju neopterećenih vazdušnih vodova dužina 204 km i 30 km

Vod br.	L [km]	Frekvencija [Hz]		
1	204	51.6	105	179
2	30	37.8	747.5	1676

3.1.2 Analitičko određivanje vrijednosti frekvencija

Za analitičko određivanje frekvencija koje se javljaju za vrijeme uključenja i isključenja neopterećenih trofaznih vodova proces komutacije je posmatran kao nesimetričan pa je analiza urađena primjenom Klarkove transformacije, razlaganjem analiziranog naponskog signala na α , β i 0 komponente.

Naime, u toku procesa uključenja i isključenja trofaznih nadzemnih i kablovskih vodova dolazi do prostiranja putujućih naponskih talasa duž voda i njihovog prelamanja i odbijanja. Vrijeme potrebno da prenaponski talas stigne sa početka voda, poduzne induktivnosti L , kapacitivnosti C (direktna komponenta), odnosno L_0 i C_0 (nulta komponenta), i dužine l , do njegovog kraja iznosi [23]:

$$\tau = l \cdot \sqrt{L \cdot C} \quad (3.35)$$

za direktnu komponentu, odnosno

$$\tau_0 = l \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0} \quad (3.36)$$

za nultu komponentu, gdje su:

$$v = 1/\sqrt{L \cdot C} \quad (3.37)$$

$$v_0 = 1/\sqrt{L_0 \cdot C_0} \quad (3.38)$$

brzine prostiranja direktne i nulte komponente talasa po posmatranom vodu. Poznato je da je kod vazдушnih vodova direktna komponenta brzine prostiranja talasa veoma bliska brzini svjetlosti, dok je za slučaj kablovskih vodova ona znatno manja.

Periodi odgovarajucih komponenti sklopnog prenapona iznose 4τ , odnosno $4\tau_0$.

Pri trofaznoj prezentaciji sledeće vrijednosti frekvencija su izračunate:

- Frekvencija nastala usled prelamanja i odbijanja direktne komponente putujućih talasa brzine v po neopterećenom vodu dužine l iznosi:

$$f = v/(4 \cdot l) \quad (3.39)$$

- Frekvencija nastala usled prelamanja i odbijanja nulte komponente putujućih talasa brzine v_0 po neopterećenom vodu dužine l iznosi:

$$f_0 = v_0 / (4 \cdot l) \quad (3.40)$$

- Takođe, usled prelaska sistema iz jednog stacionarnog stanja u drugo, javlja se prirodna frekvencija sistema (direktna i nulta komponenta), koje su proračunate na bazi ekvivalentne T šeme voda:

$$f = 1 / \left(2 \cdot \pi \sqrt{(L_e + L \cdot l/2) \cdot C \cdot l} \right) \quad (3.41)$$

gdje je L_e ekvivalentna induktivnost generatora i transformatora,

$$f_0 = 1 / \left(2 \cdot \pi \sqrt{(L_{e0} + L_0 \cdot l/2) \cdot C_0 \cdot l} \right) \quad (3.42)$$

pri čemu je L_{e0} ekvivalentna nulta induktivnost generatora i transformatora.

3.1.3 Analiza dobijenih rezultata

U cilju provjere tačnosti korišćenih metoda digitalne obrade signala i procjene njihove efikasnosti u analizi prenapona koji se javljaju pri procesu energetizacije neopterećenog voda u normalnom random režimu, izvršeno je poređenje rezultata dobijenih primjenom navedenih metoda (EMD i STFT) sa analitički određenim vrijednostima.

Rezultati dobijeni sprovedenim poređenjima imaju veoma važnu ulogu u procesu odabira najpovoljnijeg metoda za dalje analize.

U tabelama 3.4 i 3.5 prikazano je poređenje frekvencija koje se javljaju pri uključenju voda 1, izdvojenih EMD i STFT metodama sa vrijednostima dobijenim putem proračuna, na osnovu jednačina 3.39-3.42.

Tabela 3.4 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog voda dužine 204 km

Proračunata Frekvencija [Hz]	EMD		STFT	
	Frekvencija [Hz]	Greška [%]	Frekvencija [Hz]	Greška [%]
125.4	127.53	1.698	105	16.27
172.78	184.2	6.61	179	3.599
269.61	283.39	5.11	-	-
362.74	396.75	9.37	-	-

Tabela 3.5 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog voda dužine 30 km

Proračunata Frekvencija [Hz]	EMD		STFT	
	Frekvencija [Hz]	Greška [%]	Frekvencija [Hz]	Greška [%]
749	745.54	0.46	747.5	0.2
1601.8	1677.45	4.72	1676	4.63
1689.67	1863.85	10.31	-	
2385.71	2423	1.56	-	

Izvršeno poredjenje rezultata dobijenih EMD i STFT metodom sa proračunatim vrijednostima pokazuje da je u oba posmatrana slučaja EMD metodom izdvojen veći broj komponenti nego primjenom STFT metoda. Moguće je uočiti da su izdvojene samo osnovna učestanost od 50Hz i sopstvene učestanosti, dok komponente nastale usled prostiranja talasa duž voda nisu detektovane primjenom STFT metoda.

3.2 Jednofazni zemljospoj

Zemljospoj spada u havarijske režime rada koji se najčešće pojavljuju u toku eksploatacije elektro-energetskih mreža, a definiše se kao kontakt faznog provodnika sa zemljom ili uzemljenim djelovima.

Jednofazni kratki spojevi su znatno češći od ostalih (oni čine preko 70% od ukupnog broja kratkih spojeva [24-26]), a u nekim slučajevima mogu prerasti u dvofazne ili trofazne kratke spojeve sa zemljom. U procesu uključenja voda u kratkom spoju, zavisno od uslova uključenja, može doći do pojave sklopnih prenapona višestruko većih od vrijednosti nominalnog napona voda na kome se vrši komutacija. Takođe, dolazi do promjene međusobnog faznog pomjeraja faznih napona u sistemu.

U ovom poglavlju razvijen je matematički model koji opisuje vremenski oblik naponskog signala na kraju neopterećenog voda prilikom njegovog uključenja za slučaj postojanja jednofaznog zemljospoja u proizvoljnoj tački voda.

Kompleksnost sprovedene analize javlja se kao neposredna posljedica činjenice da jednofazni zemljospoj, koji je prisutan u trenutku uključenja, po svojoj prirodi spada u nesimetrične vrste kvara. Stoga je za njegovu analizu neophodno koristiti trofaznu prezentaciju. Ipak, proračun je moguće donekle uprostiti korišćenjem Klarkove transformacije i Laplasove transformacije.

U cilju postizanja što veće tačnosti modela za simulaciju, prilikom proračuna vod je predstavljen preko raspoređenih parametara (slika 3.1), gdje je d rastojanje mjesta kvara od tačke 1 (početak voda).

Kao i u slučaju procesa uključenja voda u normalnom radnom režimu, i za analizu procesa uključenja neopterećenog voda u nesimetričnom kratkom spoju, korišćena je transformacija analiziranog nesimetričnog sistema na α , β i 0 komponentne sisteme.

Jednačine dijela kola lijevo od prekidača u Laplasovom domenu imaju sledeći oblik:

$$U_{\alpha} + Z_{e\alpha} I_{\alpha} = E_{\alpha}, \quad (3.43)$$

$$U_{\beta} + Z_{e\beta} I_{\beta} = E_{\beta}, \quad (3.44)$$

$$U_0 + Z_{e0} I_0 = 0, \quad (3.45)$$

gdje U_{α} , U_{β} , U_0 i I_{α} , I_{β} , I_0 predstavljaju napone i struje za α , β i 0 komponentne sisteme u krajnjoj tački analiziranog dijela kola, respektivno; $Z_{e\alpha}$, $Z_{e\beta}$ i Z_{e0} su α , β i 0 komponente ekvivalentne impedanse bloka generator-transformator; E_{α} and E_{β} predstavljaju α i β komponente elektromotne sile generatora, dok je E_0 jednaka nuli.

Analiza samog voda sprovodi se na osnovu opšte poznatih jednačina telegrafičara. To su linearne diferencijalne jednačine koje prikazuju zavisnost napona (struje) od rastojanja i vremena. Generalno se rješenja jednačina telegrafičara mogu predstaviti sledećim jednačinama [27]:

$$U_2 = U_1 ch(\gamma l) - I_1 Z_C sh(\gamma l), \quad (3.46)$$

$$I_2 = I_1 ch(\gamma l) - \frac{U_1}{Z_C} sh(\gamma l), \quad (3.47)$$

gdje U_1 i I_1 predstavljaju napon i struju u tački 1, U_2 i I_2 su napon i struja u tački 2, Z_C je karakteristična impedansa voda, l je dužina voda, a γ je konstanta prostiranja talasa.

Dio voda koji je lijevo od mjesta nastanka kratkog spoja ($0 \leq x \leq d$) može se opisati jednačinama u Laplasovom domenu:

$$U_{x\alpha} = U_{\alpha}(0) ch(\gamma x) - Z_C I_{\alpha}(0) sh(\gamma x), \quad (3.48)$$

$$U_{x\beta} = U_{\beta}(0) ch(\gamma x) - Z_C I_{\beta}(0) sh(\gamma x), \quad (3.49)$$

$$U_{x0} = U_0(0)ch(\gamma_0 x) - Z_{c0}I_0(0)sh(\gamma_0 x), \quad (3.50)$$

$$Z_c I_{x\alpha} = Z_c I_\alpha(0)ch(\gamma x) - U_\alpha(0)sh(\gamma x), \quad (3.51)$$

$$Z_c I_{x\beta} = Z_c I_\beta(0)ch(\gamma x) - U_\beta(0)sh(\gamma x), \quad (3.52)$$

$$Z_{c0} I_{x0} = Z_{c0} I_0(0)ch(\gamma_0 x) - U_0(0)sh(\gamma_0 x), \quad (3.53)$$

u kojima $U_\alpha(0)$, $U_\beta(0)$, $U_0(0)$ i $U_{x\alpha}$, $U_{x\beta}$, U_{x0} predstavljaju komponente napona u tački 1 i u odabranoj tački x respektivno, dok su $I_\alpha(0)$, $I_\beta(0)$, $I_0(0)$ i $I_{x\alpha}$, $I_{x\beta}$, I_{x0} odgovarajuće komponente struje; Z_{c0} je nulta komponenta karakteristične impedanse voda; γ i γ_0 su konstanta prostiranja talasa i njena nulta komponenta.

Za dio voda desno od mjesta kvara ($d \leq x \leq l$) na isti način dobija se:

$$U_{x\alpha} = U_\alpha(d)ch(\gamma(x-d)) - Z_c I_\alpha(d)sh(\gamma(x-d)), \quad (3.54)$$

$$U_{x\beta} = U_\beta(d)ch(\gamma(x-d)) - Z_c I_\beta(d)sh(\gamma(x-d)), \quad (3.55)$$

$$U_{x0} = U_0(0)ch(\gamma_0 x) - Z_{c0} I_0(0)sh(\gamma_0 x), \quad (3.56)$$

$$Z_c I_{x\alpha} = Z_c I_\alpha(d)ch(\gamma(x-d)) - U_\alpha(d)sh(\gamma(x-d)), \quad (3.57)$$

$$Z_c I_{x\beta} = Z_c I_\beta(d)ch(\gamma(x-d)) - U_\beta(d)sh(\gamma(x-d)), \quad (3.58)$$

$$Z_{c0} I_{x0} = Z_{c0} I_0(d)ch(\gamma_0(x-d)) - U_0(d)sh(\gamma_0(x-d)), \quad (3.59)$$

gdje su $U_\alpha(d)$, $U_\beta(d)$, $U_0(d)$ i $U_{x\alpha}$, $U_{x\beta}$, U_{x0} komponente napona u tački kvara i u proizvoljnoj tački x respektivno, dok su $I_\alpha(d)$, $I_\beta(d)$, $I_0(d)$ i $I_{x\alpha}$, $I_{x\beta}$, I_{x0} odgovarajuće komponente struje.

U slučaju jednopolnog kratkog spoja pretpostavlja se da je faza 'A' u zemljospoju, što daje sledeće uslove na mestu kratkog spoja, tj. za $x = d$, sa lijeve i desne strane od mjesta kvara:

$$U_A(d) = 0.$$

$$u_{lA}(d^L) = u_{lA}(d^D) = 0,$$

$$u_{lB}(d^L) = u_{lB}(d^D), \quad (3.60)$$

$$u_{IC}(d^L) = u_{IC}(d^D),$$

$$i_{IB}(d^L) = i_{IB}(d^D),$$

$$i_{IC}(d^L) = i_{IC}(d^D).$$

Nakon zatvaranja kontakata prekidača važe dodatni uslovi, koji uzimaju u obzir veze izvora sa vodom:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= U_\alpha(0), \\ U_\beta &= U_\beta(0), \\ U_0 &= U_0(0), \\ I_\alpha &= I_\alpha(0), \\ I_\beta &= I_\beta(0), \\ I_0 &= I_0(0), \end{aligned} \tag{3.61}$$

Za $x = l$, odnosno na kraju otvorenog voda (tačka 2) sve komponente struja su jednake nuli, pa važi:

$$\begin{aligned} I_\alpha(l) &= 0, \\ I_\beta(l) &= 0, \\ I_0(l) &= 0. \end{aligned} \tag{3.62}$$

Rješavanjem sistema jednačina (3.43)-(3.45) i (3.48)-(3.59), uz uvažavanje uslova (3.60)-(3.62) dobijaju se α, β i 0 komponente napona u Laplasovom domenu:

$$U_\alpha = -E_\alpha Z_{C0} Z_C (Z_{C0} sh(\gamma_0 d) + Z_{e0} ch(\gamma_0 d)) ch(\gamma_0(l-d)) / \Delta, \tag{3.63}$$

$$U_\beta = E_\beta Z_C / (Z_C ch(\gamma l) + Z_e sh(\gamma l)), \tag{3.64}$$

$$U_0 = E_\alpha Z_{C0} Z_C (Z_{C0} sh(\gamma_0 d) + Z_{e0} ch(\gamma_0 d)) ch(\gamma(l-d)) / \Delta, \tag{3.65}$$

gdje su E_α i E_β - α i β komponente elektromotorne sile generatora, Z_e i Z_{e0} predstavljaju ekvivalentnu impedansu generatora i transformatora i njenu nultu komponentu respektivno, dok je Δ definisano kao:

$$\Delta = 2Z_C(Z_{C0}ch(\gamma_0 l) + Z_{e0}sh(\gamma_0 l))(Z_e ch(\gamma d) + Z_C sh(\gamma d))ch(\gamma(l-d)) + Z_{C0}(Z_C ch(\gamma l) + Z_e sh(\gamma l))(Z_{e0} ch(\gamma_0 d) + Z_{C0} sh(\gamma_0 d))ch(\gamma_0(l-d)), \quad (3.66)$$

Nakon transformacije (3.63) i (3.65) u vremenski domen, dobijaju se α i 0 komponente napona u tački na kraju voda, u slučaju postojanja jednofaznog zemljospoja u momentu njegovog uključenja:

$$u_\alpha(t) = \frac{E_m Z_C a}{m} \sin \omega t - 2E_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k Z_C}{(1-v_k^2)n} \sin(v_k \omega t) e^{-\delta_\alpha t}, \quad (3.67)$$

$$u_0(t) = \frac{E_m Z_C q}{m} \sin \omega t - 2E_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k Z_C}{(1-v_k^2)n} \sin(v_k \omega t) e^{-\delta_0 t}, \quad (3.68)$$

gdje je E_m amplituda napona napajanja.

U (3.67) i (3.68), v_k su koeficijenti koji, pomnoženi osnovnom frekvencijom sistema (50 Hz) daju vrijednosti frekvencija za α i 0 komponente napona. Navedeni koeficijenti su dobijeni rješavanjem jednačine $\Delta=0$ u vremenskom domenu, gdje je Δ dato jednačinom (3.66):

$$2Z_C(Z_{C0} \cos v_k \lambda_0 - X_{e0} v_k \sin v_k \lambda_0)(Z_C \sin v_k \lambda_L + X_e v_k \cos v_k \lambda_L) \cos v_k \lambda_D + Z_{C0}(Z_{C0} \sin v_k \lambda_{L0} + X_{e0} v_k \cos v_k \lambda_{L0})(Z_C \cos v_k \lambda - X_e v_k \sin v_k \lambda) \cos v_k \lambda_{D0} = 0, \quad (3.69)$$

gdje su X_e i X_{e0} ekvivalentna reaktivna otpornost generatora i transformatora i njena nulta komponenta, λ i λ_0 su talasna dužina voda i odgovarajuća nulta komponenta, λ_L , λ_D , λ_{L0} i λ_{D0} su talasne dužine djelova voda lijevo i desno od tačke kvara i njihove nulte komponente, respektivno. Talasne dužine λ , λ_0 , λ_L , λ_D , λ_{L0} i λ_{D0} moguće je izračunati na osnovu sledećih jednačina:

$$\lambda = \omega l \sqrt{LC}, \quad (3.70)$$

$$\lambda_0 = \omega l \sqrt{L_0 C_0}, \quad (3.71)$$

$$\lambda_L = \omega d \sqrt{LC}, \quad (3.72)$$

$$\lambda_D = \omega(l-d)\sqrt{LC}, \quad (3.73)$$

$$\lambda_{L0} = \omega d\sqrt{L_0 C_0}, \quad (3.74)$$

$$\lambda_{D0} = \omega(l-d)\sqrt{L_0 C_0}, \quad (3.75)$$

gdje je ω osnovna ugaona učestanost sistema.

Ostali parametri iz izraza (3.67) i (3.68) definisani su na sledeći način:

$$a = -Z_{C0} (Z_{C0} \sin \lambda_{L0} + X_{e0} \cos \lambda_{L0}) \cos \lambda_{D0} \quad (3.76)$$

$$a_k = -Z_{C0} (Z_{C0} \sin \nu_k \lambda_{L0} + X_{e0} \nu_k \cos \nu_k \lambda_{L0}) \cos \nu_k \lambda_{D0} \quad (3.77)$$

$$\delta_\alpha = R_\alpha / L_\alpha \quad (3.78)$$

gdje R_α i L_α predstavljaju α komponente otpornosti i induktivnosti voda po jedinici dužine,

$$q = Z_{C0} (Z_{C0} \sin \lambda_{L0} + X_{e0} \cos \lambda_{L0}) \cos \lambda_D \quad (3.79)$$

$$q_k = Z_{C0} (Z_{C0} \sin \nu_k \lambda_{L0} + X_{e0} \nu_k \cos \nu_k \lambda_{L0}) \cos \nu_k \lambda_D \quad (3.80)$$

$$\delta_0 = R_0 / L_0 \quad (3.81)$$

gdje R_0 i L_0 predstavljaju nultu komponentu podužne otpornosti i induktivnosti voda,

$$m = 2Z_C (Z_{C0} \cos \lambda_0 - X_{e0} \sin \lambda_0) (Z_C \sin \lambda_L + X_e \cos \lambda_L) \cos \lambda_D + Z_{C0} (Z_C \cos \lambda - X_e \sin \lambda) (Z_{C0} \sin \lambda_{L0} + X_{e0} \cos \lambda_{L0}) \cos \lambda_{D0}, \quad (3.82)$$

$$n = 2Z_C \cos \nu_k \lambda_D [c_6 (\lambda_L c_7 + X_e \cos \nu_k \lambda_L) - c_3 (\lambda_0 c_2 + X_{e0} \sin \nu_k \lambda_0)] + Z_{C0} \cos \nu_k \lambda_{D0} [c_5 (\lambda_{L0} c_8 + X_{e0} \cos \nu_k \lambda_{L0}) - c_4 (\lambda c_1 + X_e \sin \nu_k \lambda)] - 2Z_C c_3 c_6 \lambda_D \sin \nu_k \lambda_D - Z_{C0} c_4 c_5 \lambda_{D0} \sin \nu_k \lambda_{D0} \quad (3.83)$$

$$c_1 = Z_C \sin \nu_k \lambda + X_e \nu_k \cos \nu_k \lambda \quad (3.84)$$

$$c_2 = Z_{C0} \sin \nu_k \lambda_0 + X_{e0} \nu_k \cos \nu_k \lambda_0, \quad (3.85)$$

$$c_3 = Z_C \sin \nu_k \lambda L + X_e \nu_k \cos \nu_k \lambda_L, \quad (3.86)$$

$$c_4 = Z_{C0} \sin \nu_k \lambda_{L0} + X_{e0} \nu_k \cos \nu_k \lambda_{L0}, \quad (3.87)$$

$$c_5 = Z_C \cos v_k \lambda - X_e v_k \sin v_k \lambda, \quad (3.88)$$

$$c_6 = Z_{C0} \cos v_k \lambda_0 - X_{e0} v_k \sin v_k \lambda_0, \quad (3.89)$$

$$c_7 = Z_C \cos v_k \lambda_L - X_e v_k \sin v_k \lambda_L, \quad (3.90)$$

$$c_8 = Z_{C0} \cos v_k \lambda_{L0} - X_{e0} v_k \sin v_k \lambda_{L0}. \quad (3.91)$$

Izraz za β komponentu napona na kraju neopterećenog voda u vremenskiom domenu ima sledeći oblik:

$$u_\beta(t) = \frac{E_m Z_C}{b} \cos \omega t + 2E_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Z_C \mu_k}{(1 - \mu_k^2) g} \cos(\mu_k \omega t) e^{-\delta_\beta t}. \quad (3.92)$$

U izrazu (3.92), μ_k su koeficijenti koji, pomnoženi osnovnom frekvencijom sistema (50 Hz) daju vrijednosti frekvencija za β komponentu napona. Navedeni koeficijenti su dobijeni rješavanjem jednačine (3.93), koja predstavlja imenilac izraza (3.64) u vremenskom domenu:

$$\cos(\mu_k \lambda) = \frac{X_e \mu_k}{Z_C} \sin(\mu_k \lambda), \quad (3.93)$$

Parametri b , g i δ_β definisani su na sledeći način:

$$b = Z_C \cos \lambda - X_e \sin \lambda, \quad (3.94)$$

$$g = \left(X_e + Z_C \lambda + \frac{\lambda X_e^2 \mu_k^2}{Z_C} \right) \sin(\mu_k \lambda), \quad (3.95)$$

$$\delta_\beta = R_\beta / L_\beta, \quad (3.96)$$

gdje R_β i L_β predstavljaju β komponente otpornosti i induktivnosti voda po jedinici dužine.

Procedura za određivanje $U_B(t)$ i $U_C(t)$ može se predstaviti pomoću sledećeg algoritma:

- I. E_m , l , ω , X_e , X_{e0} , R_e , R_{e0} , R , R_0 , L , L_0 , C , C_0 , Z_C , Z_{C0} su poznati ulazni parametri;
- II. Proračun v_k i μ_k koeficijenata iz (3.69) i (3.93), korišćenjem odgovarajućih programa u MATLAB-u. Navedeni koeficijenti, pomnoženi osnovnom

frekvencijom sistema, daju frekvencije za α , β i 0 komponente napona. Ovako dobijeni rezultati predstavljaju analitičke vrijednosti frekvencija;

III. Proračun $u_\alpha(t)$, $u_\beta(t)$ i $u_0(t)$ u skladu sa jednačinama (3.67), (3.92) i (3.68), respektivno;

IV. Primjena inverzne Klarkove transgormacije:

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_0(t) \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

na $u_\alpha(t)$, $u_\beta(t)$ i $u_0(t)$ u cilju određivanja $u_B(t)$ i $u_C(t)$.

Naponi na zdravim fazama 'B' i 'C' dobijaju se kao:

$$u_B(t) = u_0(t) - \frac{u_\alpha(t)}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta(t), \quad (3.98)$$

$$u_C(t) = u_0(t) - \frac{u_\alpha(t)}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta(t), \quad (3.99)$$

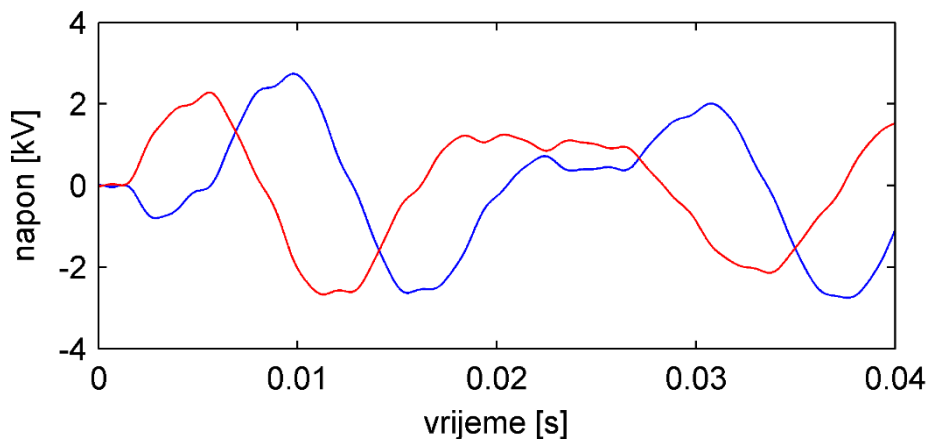
Na osnovu urađenog matematičkog modela napisan je program u MATLAB-u koji omogućava praćenje nastalih prenapona pri uključenju voda u jednofaznom zemljospoju.

Iz niza urađenih proračuna prikazani su, kao karakteristični, slučajevi uključenja dugog voda (500 km) i kratkog voda (30 km), u jednofaznom zemljospoju. Podaci analiziranih sistema dati su u tabeli 3.6.

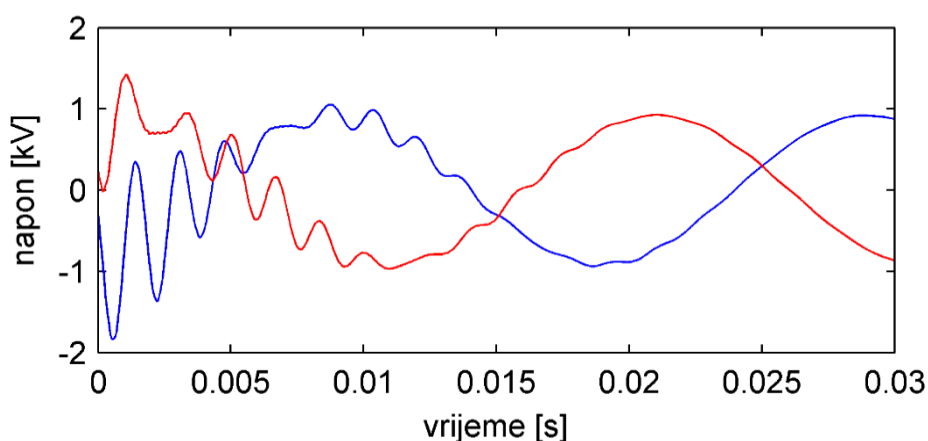
Tabela 3.6 Osnovne karakteristike analiziranih vodova

Vod br.	l [km]	Ems[r.j.]	$X_e[\Omega]$	$X_{e0}[\Omega]$	$R[\Omega]$	$R_0[\Omega]$	$Z_c[\Omega]$	$Z_{c0}[\Omega]$	$R[\Omega]$	$R_0[\Omega]$
1	500	1	100	70	8	7	273	600.6	0.021	0.17
2	30	1	63	16	4.4	0.7	370	740	0.33	0.48

Na slikama 3.10 i 3.11 prikazani su prenaponi nastali u krajnjim tačkama zdravih faza (B i C) pri uključenju vodova dužine 500 km i 30 km jednofaznom zemljospoju (faza A) na kraju posmatranog voda.



Slika 3.10 Prenapon pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju



Slika 3.11 Prenapon pri uključenju voda dužine 30 km u jednofaznom zemljospoju

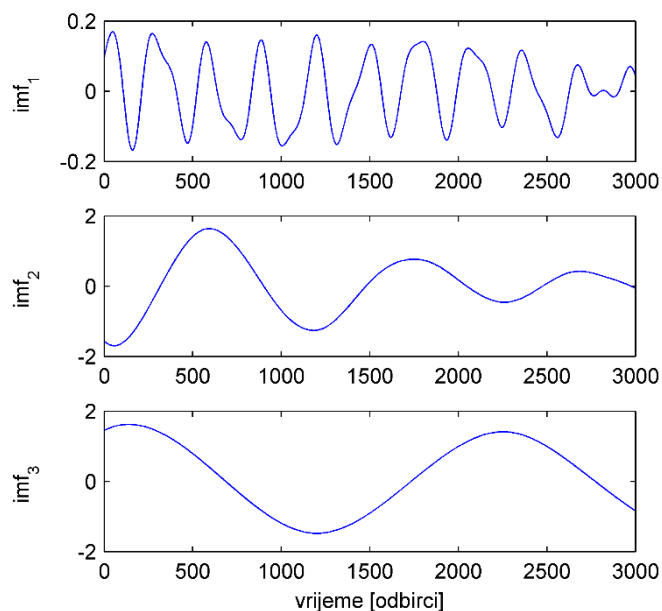
Na osnovu jednačine (3.69) moguće je odrediti sopstvene učestanosti za α i 0, a pomoću jednačine (3.93) za β komponentu. U slučaju posmatranih vodova, proračunom se dobijaju sledeće vrijednosti sopstvenih učestanosti, prezentovane u tabeli 3.7:

Tabela 3.7 Vrijednosti analitički dobijenih frekvencija pri uključenju vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u jednofaznom zemljospoju

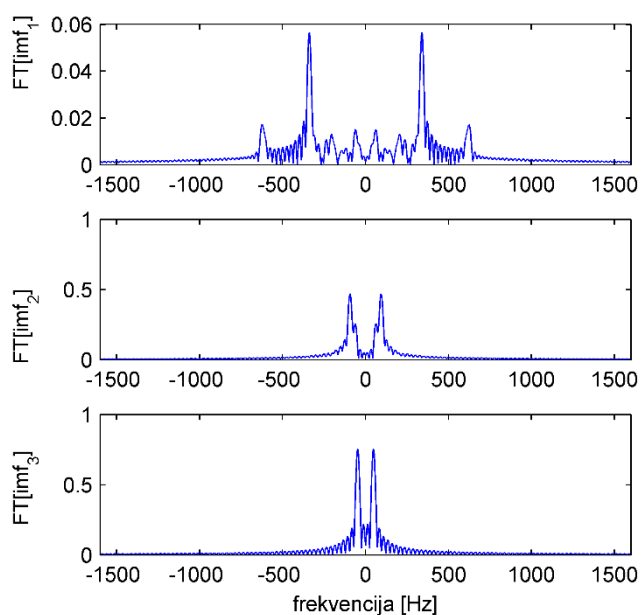
Vod br.	l [km]	Frekvencija [Hz]					
		ν_1	ν_2	ν_3	μ_1	μ_2	μ_3
1	500	89.245	185.625	292.13	92.925	336.775	620.670
2	30	557.25	2670.85	4375.15	663.985	5091.5	10046.5

Naponski signal, prikazan na slici 3.10, koji je dobijen simulacijom uključenja neopterećenog trofaznog voda uz prisustvo jednofaznog zemljospoja (faza A) na

njegovoj krajnjoj tački, analiziran je primjenom EMD metoda. Na slici 3.12 prikazano je razlaganje posmatranog signala na prirodne sastavne funkcije, dok je na slici 3.13 urađena procjena odgovarajućih frekvencija.

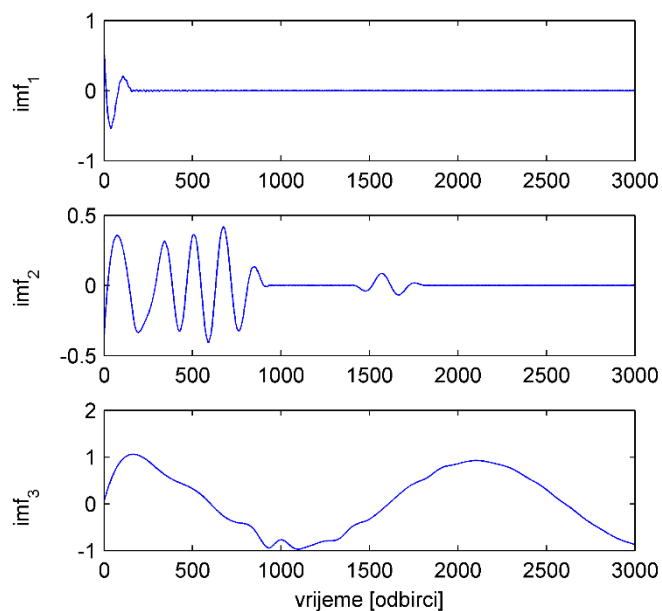


Slika 3.12 Naponski signal na fazi “B” pri uključenju voda 1 razložen na IMF-ove

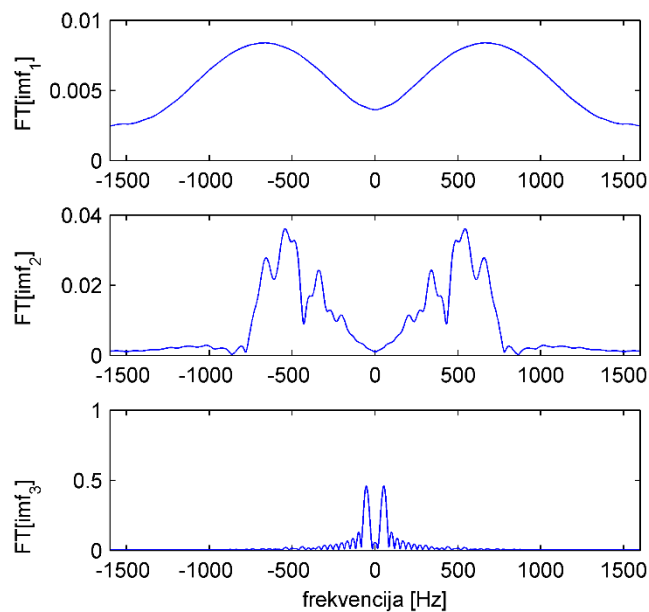


Slika 3.13 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 1

Na isti način analizirano je i uključnje relativno kratkog voda. Na slici 3.14 prikazana je dekompozicija naponskog signala u krajnjoj tački voda 2, predstavljenog na slici 3.11, primjenom EMD, a na slici 3.15 je urađena procjena dobijenih frekvencija.



Slika 3.14 Napon na fazi “B” pri uključenju voda 2 rastavljen na prirodne sastavne funkcije



Slika 3.15 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 2

Dobijene su sledeće vrijednosti frekvencija, prikazane tabelom 3.8:

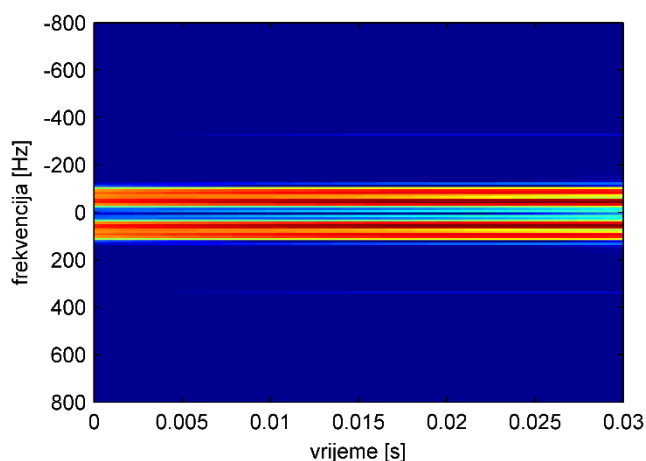
Tabela 3.8 Vrijednosti frekvencija dobijene primjenom EMD pri uključenju vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u jednofaznom zemljospoju

Vod br.	L [km]	Frekvencija [Hz]				
		48.83	94.6	204.47	338.75	622.56
1	500					
2	30	51.88	543.2	662.4		

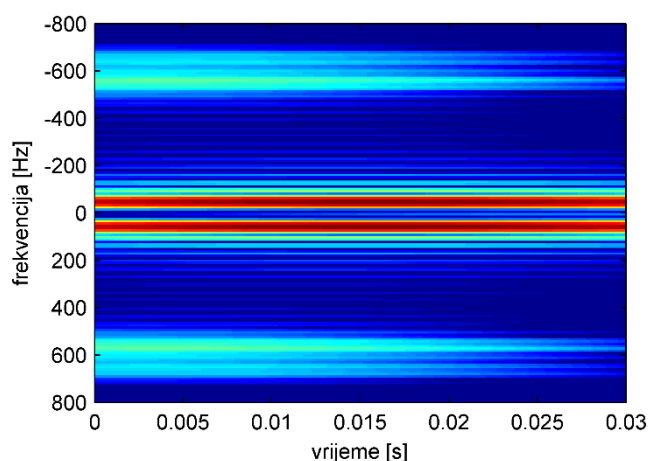
U cilju provjere tačnosti dobijenih rezultata i efikasnosti primijenjene metode, izvršena je analiza posmatranih signala korišćenjem STFT metode, što je prikazano na slikama 3.16 i 3.17.

Slika 3.16 prikazuje analizu naponskog signala na fazi fazi “B” pri uključenju voda 1, a slika 3.17 analizu naponskog signala na fazi fazi “B” pri uključenju voda 2.

Rezultati dobijeni primjenom STFT metoda prikazani su u tabeli 3.9.



Slika 3.16 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju



Slika 3.17 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 30 km u jednofaznom zemljospoju

Tabela 3.9 Vrijednosti frekvencija dobijene STFT metodom pri uključenju vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u jednofaznom zemljospoju

Vod br.	l [km]	Frekvencija [Hz]		
1	500	49	107.5	327.5
2	30	51	567	635

Na osnovu poredjenja rezultata dobijenih EMD i STFT metodom sa proračunatim vrijednostima, može se vidjeti da je u primjenom EMD metode izdvojen veći broj komponenti frekvencija, i sa većom tačnošću.

3.3 Dvofazni zemljospoj

Dvofazni zemljospoj se definiše kao dodir dva fazna provodnika na istom mjestu sa zemljom. Kao i u slučaju jednofaznog zemljospoja, i pri postojanju ove vrste kvara u trenutku uključenja voda može doći do pojave izuzetno visokih prenapona, koji su višestruko veći od vrijednosti nominalnog napona voda na kome se vrši komutacija. Takođe postoji opasnost od njegovog prelaska u trolni zemljospoj.

U ovom poglavlju razvijen je matematički model koji opisuje vremenski oblik naponskog signala na kraju neopterećenog voda prilikom uključenja za slučaj postojanja dvofaznog zemljospoja u proizvoljnoj tački voda.

Kao što je istaknuto za slučaj jednofaznog zemljospoja, i kod prisustva dvofaznog zemljospoja u trenutku uključenja voda sprovedene analize su veoma složene, što je posledica činjenice da oba slučaja predstavljaju nesimetrične vrste kvara. Stoga je i za njegovu analizu neophodno koristiti trofaznu prezentaciju, uz primjenu Klarkove transformacije i Laplasove transformacije.

Kako bi tačnost razvijenog modela za simulaciju bila što veća, prilikom proračuna vod je predstavljen preko raspoređenih parametara.

Za analizu procesa uključenja neopterećenog voda u dvofaznom (nesimetričnom) zemljospoju, korišćena je zamjenska šema prikazana na slici 3.1, a proračuni su sprovedeni transformacijom analiziranog nesimetričnog sistema na α , β i 0 komponentne sisteme.

I u slučaju uključenja voda u dvofaznom zemljospoju, analiza se sprovodi na osnovu jednačina (3.43) - (3.59), koje u oba slučaja imaju potpuno isti oblik.

U slučaju dvopolnog kratkog spoja, uz pretpostavku se da su faze 'B' i 'C' u zemljospoju, što na mjestu kratkog spoja, tj. za $x = d$, sa lijeve i desne strane od mjesta kvara daje sledeće uslove:

$$\begin{aligned} U_B(d) &= U_C(d) = 0, \\ u_{lA}(d^L) &= u_{lA}(d^D), \\ u_{lB}(d^L) &= u_{lB}(d^D) = 0, \\ u_{lC}(d^L) &= u_{lC}(d^D) = 0, \\ i_{lA}(d^L) &= i_{lA}(d^D) \end{aligned} \quad (3.100)$$

Uslovi koji opisuju veze izvora sa vodom za dvofazni zemljospoj kao i u analizi sprovedenoj kod jednofaznog zemljospoja, mogu se predstaviti jednačinom (3.61).

Kako su za $x = l$, odnosno na kraju otvorenog voda (tačka 2) sve komponente struja su jednake nuli, važi i jednačina (3.62).

Rješavanjem sistema jednačina (3.43)-(3.45) i (3.48)-(3.59), uz uvažavanje uslova (3.61), (3.62) i (3.100) dolazi se do α i 0 komponenti napona u Laplasovom domenu, dok je β komponenta jednaka nuli :

$$U_\alpha = 2E_\alpha Z_{C0} Z_C (Z_{C0} sh(\gamma_0 d) + Z_{e0} ch(\gamma_0 d)) ch(\gamma_0 (l - d)) / \Delta_1, \quad (3.101)$$

$$U_0 = E_\alpha Z_{C0} Z_C (Z_{C0} sh(\gamma_0 d) + Z_{e0} ch(\gamma_0 d)) ch(\gamma (l - d)) / \Delta_1, \quad (3.102)$$

U jednačinama (3.101) i (3.102), izraz Δ_1 definisan je kao:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= Z_C (Z_{C0} ch(\gamma_0 l) + Z_{e0} sh(\gamma_0 l)) (Z_e ch(\gamma d) + Z_C sh(\gamma d)) ch(\gamma (l - d)) \\ &+ 2Z_{C0} (Z_C ch(\gamma l) + Z_e sh(\gamma l)) (Z_{e0} ch(\gamma_0 d) + Z_{C0} sh(\gamma_0 d)) ch(\gamma_0 (l - d)) \end{aligned} \quad (3.103)$$

Nakon transformacije u vremenski domen, dobijaju se sledeći izrazi za α i 0 komponente napona u tački na kraju posmatranog voda:

$$u_{\alpha}(t) = 2 \frac{E_m Z_C a}{w} \sin \omega t - 4 E_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k Z_C}{(1 - v_k^2) h} \sin(v_k \omega t) e^{-\delta_{\alpha} t}, \quad (3.104)$$

$$u_0(t) = - \frac{E_m Z_C q}{w} \sin \omega t + 2 E_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k Z_C}{(1 - v_k^2) h} \sin(v_k \omega t) e^{-\delta_0 t}. \quad (3.105)$$

Parametri w i h se imaju sledeći oblik:

$$w = Z_C (Z_{C0} \cos \lambda_0 - X_{e0} \sin \lambda_0) (Z_C \sin \lambda_L + X_e \cos \lambda_L) \cos \lambda_D + 2 Z_{C0} (Z_C \cos \lambda - X_e \sin \lambda) (Z_{C0} \sin \lambda_{L0} + X_{e0} \cos \lambda_{L0}) \cos \lambda_{D0}, \quad (3.106)$$

$$h = Z_C \cos v_k \lambda_D [c_6 (\lambda_L c_7 + X_e \cos v_k \lambda_L) - c_3 (\lambda_0 c_2 + X_{e0} \sin v_k \lambda_0)] + 2 Z_{C0} \cos v_k \lambda_{D0} [c_5 (\lambda_{L0} c_8 + X_{e0} \cos v_k \lambda_{L0}) - c_4 (\lambda c_1 + X_e \sin v_k \lambda)] - Z_C c_3 c_6 \lambda_D \sin v_k \lambda_D - 2 Z_{C0} c_4 c_5 \lambda_{D0} \sin v_k \lambda_{D0} \quad (3.107)$$

gdje su v_k koeficijenti frekvencija za α i θ komponente napona dobijeni rješavanjem jednačine $\Delta_1=0$ u vremenskom domenu, gdje je Δ_1 dato jednačinom (3.103):

$$Z_C (Z_{C0} \cos v_k \lambda_0 - X_{e0} v_k \sin v_k \lambda_0) (Z_C \sin v_k \lambda_L + X_e v_k \cos v_k \lambda_L) \cos v_k \lambda_D + 2 Z_{C0} (Z_{C0} \sin v_k \lambda_{L0} + X_{e0} v_k \cos v_k \lambda_{L0}) (Z_C \cos v_k \lambda - X_e v_k \sin v_k \lambda) \cos v_k \lambda_{D0} = 0. \quad (3.108)$$

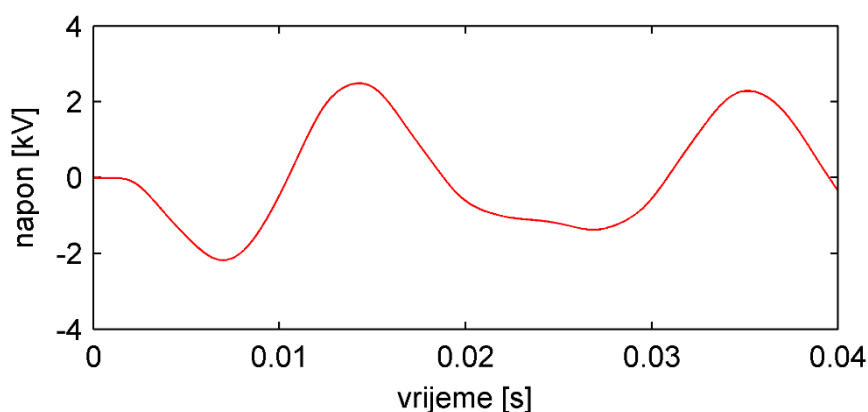
Napon na zdravoj fazi 'A' dobija se pomocu izraza:

$$u_A(t) = u_0(t) + u_{\alpha}(t) \quad (3.109)$$

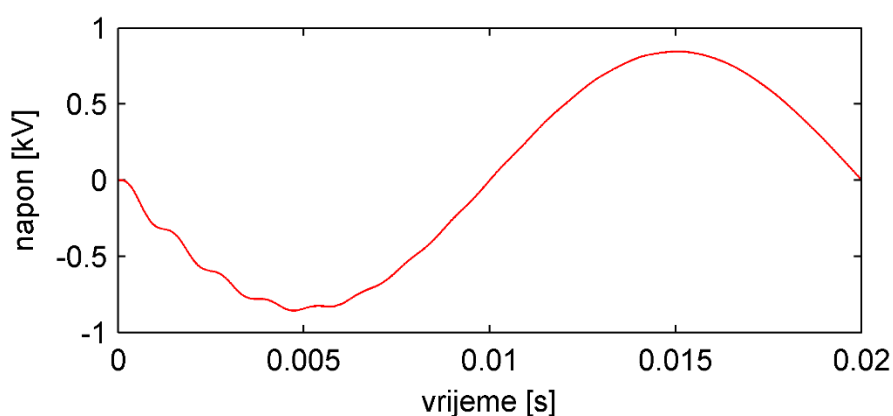
Na osnovu urađenog matematičkog modela napisan je program u MATLAB-u koji omogućava simulaciju nastalih prenapona pri uključenju voda u dvofaznom zemljospoju.

Kao i u slučaju jednofaznog kratkog spoja prikazani su, kao karakteristični, slučajevi uključenja dugog voda (500 km) i relativno kratkog voda (30 km), u dvofaznom zemljospoju. Podaci analiziranih sistema dati su u tabeli 3.6.

Na slikama 3.18 i 3.19 prikazani su prenaponi nastali u krajnjim tačkama zdrave faze (A) pri uključenju vodova dužine 30 km i 500 km u dvofaznom zemljospoju (faza B i C) na kraju posmatranog voda.



Slika 3.18 Prenapon u tački na kraju voda dužine 500 km pri njegovom uključanju uz prisustvo dvofaznog zemljospoja



Slika 3.19 Prenapon u krajnjoj tački voda dužine 30 km pri njegovom uključanju uz postojanje dvofaznog zemljospoja

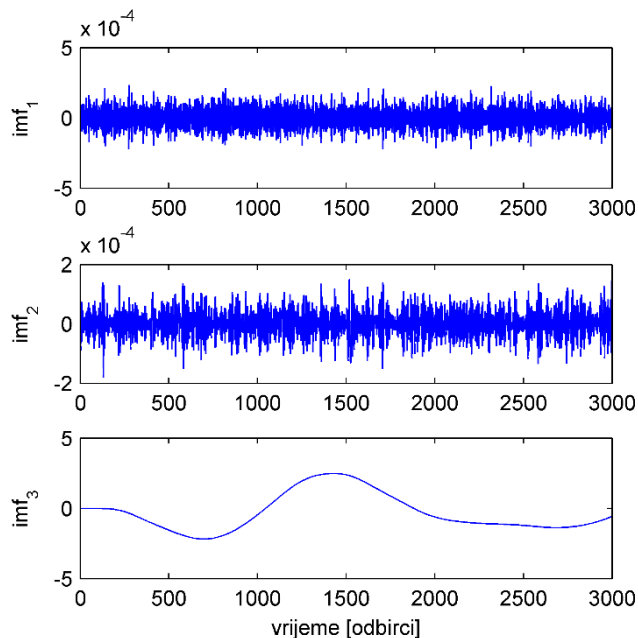
U skladu sa prethodno sprovedenom analizom, vrijednosti sopstvenih učestanosti za α i 0 komponentu moguće je odrediti na osnovu jednačine (3.108).

U slučaju posmatranih vodova, proračunom se dobijaju sledeće vrijednosti sopstvenih učestanosti (tabela 3.10) :

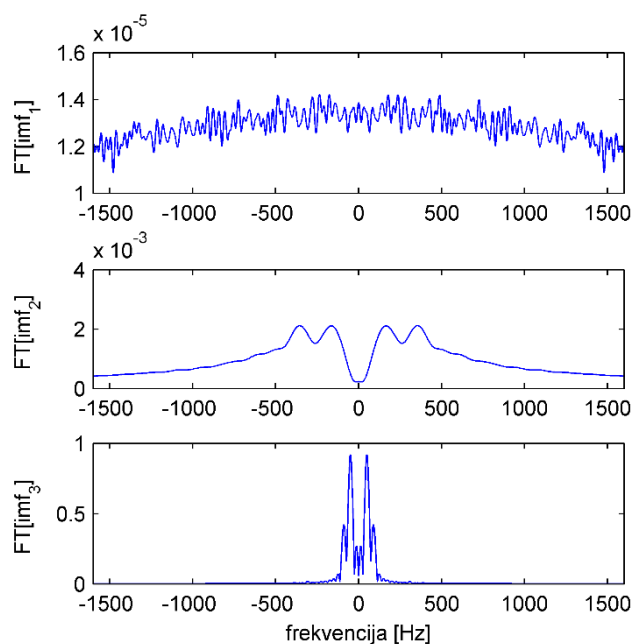
Tabela 3.10 Vrijednosti analitički dobijenih frekvencija pri uključanju vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u dvofaznom zemljospoju

Vod br.	l [km]	Frekvencija [Hz]			
		ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
1	500	91.435	177.235	312.115	375.525
2	30	802	2670	4849	

Naponski signal, dobijen simulacijom uključenja neopterećenog trofaznog voda (vod 1) uz prisustvo dvofaznog zemljospoja (faza B i C) na njegovoj krajnjoj tački, koji je prezentovan slikom 3.18, analiziran je i primjenom EMD metoda. Razlaganje posmatranog signala na prirodne sastavne funkcije prikazano je na slici 3.20, dok je na slici 3.21 urađena procjena odgovarajućih frekvencija za svaku izdvojenu IMF.



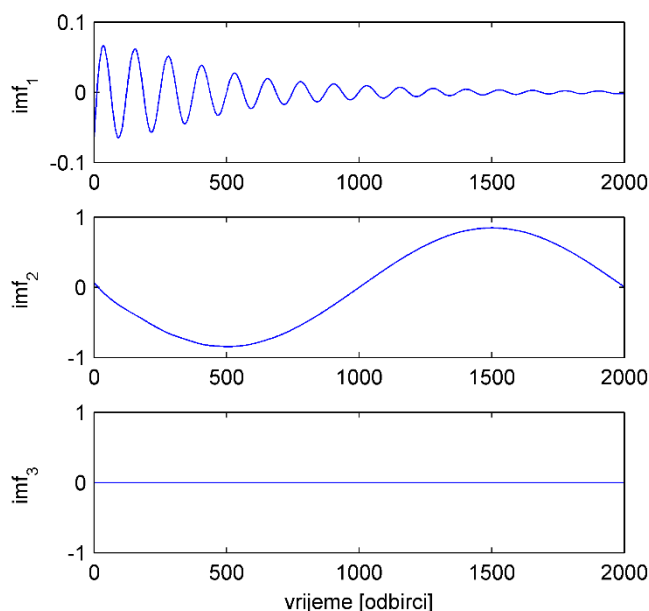
Slika 3.20 Napon na zdravoj fazi “A” pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



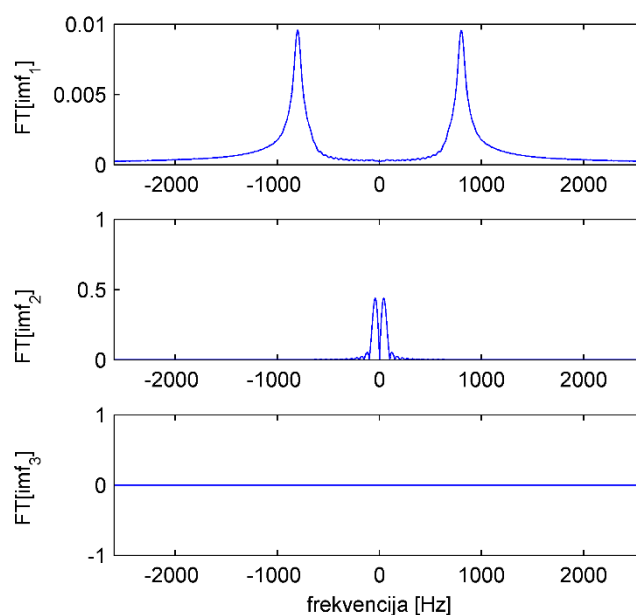
Slika 3.21 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 1

Na isti način kao u slučaju voda 1, sprovedena je i analiza naponskog signala prikazanog slikom 3.19, nastalog simulacijom uključenja voda 2 uz postojanje dvofaznog zemljospoja u njegovoj krajnjoj tački.

Slika 3.22 prikazuje dekompoziciju posmatranog signala na prirodne sastavne funkcije, dok je određivanje prisutnih komponenti frekvencije prikazano je na slici 3.23.



Slika 3.22 Napon na zdravoj fazi “A” pri uključenju voda dužine 30 km u dvofaznom zemljospoju predstavljen preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 3.23 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod 2

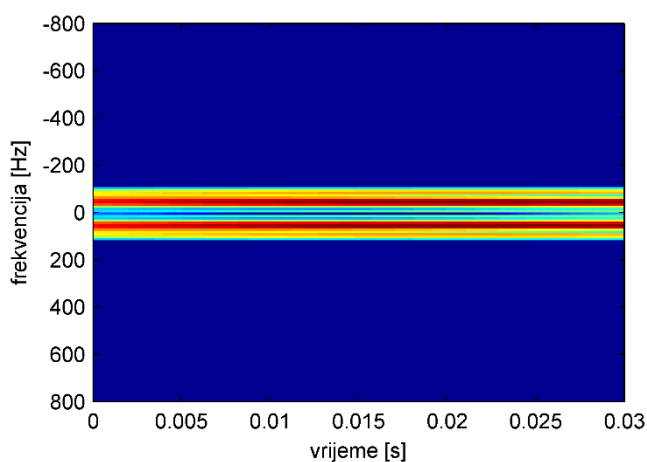
Vrijednosti frekvencija, koje su u ovom slučaju dobijene primjenom EMD metoda, prikazane su tabelom 3.11:

Tabela 3.11 Vrijednosti frekvencija pri uključenju vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u dvofaznom zemljospoju dobijene EMD metodom

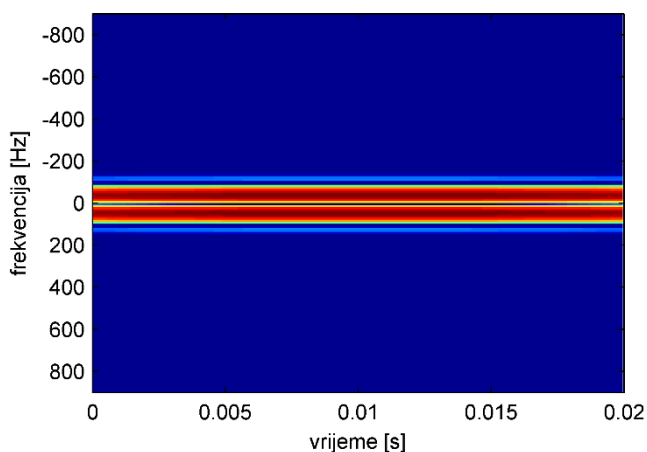
Vod br.	l [km]	Frekvencija [Hz]			
1	500	48.83	88.5	164.8	354
2	30	42.8	799.6		

Da bi se omogućila dodatna provjera dobijenih rezultata je izvršena i analiza posmatranih signala korišćenjem STFT metode, što je prikazano na slikama 3.24 i 3.25.

Slika 3.24 prikazuje analizu naponskog signala na fazi fazi “A” pri uključenju voda 1, a slika 3.25 analizu naponskog signala na fazi “A” pri uključenju voda 2.



Slika 3.24 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju



Slika 3.25 STFT analiza prenapona pri uključenju voda dužine 30 km u dvofaznom zemljospoju

Rezultati dobijeni primjenom STFT metoda prikazani su u tabeli 3.12.

Tabela 3.12 Vrijednosti frekvencija dobijene STFT metodom pri uključenju vazdušnih vodova dužina 500 km i 30 km u dvofaznom zemljospoju

Vod br.	L [km]	Frekvencija [Hz]	
1	500	49	88
2	30	40	

I u ovom slučaju iz dobijenih rezultata vidi se da se primjenom EMD metoda izdvaja veći broj prisutnih komponenti frekvencije, a dobijene vrijednosti se bolje poklapaju sa analitički dobijenim rezultatima.

Stoga se, na osnovu sprovedene analize uključenja neopterećenog voda, može zaključiti da je EMD metoda veoma pogodna u slučaju posmatranja nesimetričnih, nestacionarnih prelaznih procesa kratkog trajanja, kao što su poremećaji nastali pri sklopnim operacijama u elektroenergetskom sistemu.

POGLAVLJE 4

Analiza realnih poremećaja napona primjenom metoda digitalne obrade signala

U ovom poglavlju je prikazana primjena metoda digitalne obrade signala za analizu realnih naponskih signala nastalih pri procesu uključenja i isključenja trofaznih kablovskih i vazdušnih vodova u praznom hodu, zasnovanih na eksperimentalno dobijenim podacima. Naime, u električnim mrežama veoma često dolazi do pojave unutrašnjih prenapona, tj. prenapona usljed prelaznih procesa čiji je uzrok u samoj mreži. U unutrašnje prenapone, pored ostalih, spadaju i tzv. sklopni prenaponi, koji nastaju pri naglim promjenama režima u kolu, odnosno pri komutacijama prekidača. Uključenje i isključenje voda u praznom hodu su komutacije koje su u praksi veoma česte, pa je neophodno poznavati i prateće pojave koje pri tim procesima nastaju. Pri procesu uključenja može, zavisno od uslova, doći do pojave sklopnih prenapona veoma visokih vrijednosti, a proces isključenja može biti praćen pojavom višestrukog paljenja luka među kontaktima prekidača. Kako ove pojave mogu dovesti do značajnog narušavanja kvaliteta električne energije u elektroenergetskim sistemima, a takođe i do oštećenja opreme, neophodno je prepoznati i korigovati njihove efekte.

U dostupnoj literaturi ova analiza se vrši monofazno [28-31], pa se stoga ne uzima u obzir međusobni uticaj pojedinih faza, ili nesimetrija usled različitih momenata zatvaranja kontakata pojedinih faza nije uračunata [32-34]. U radu [35] analizirano je uključenje neopterećenog trofaznog voda (trofazna prezentacija), uz uzimanje u obzir uticaja frekventno zavisnih parametara (skin efekta i povratnog puta kroz zemlju), kao i nesimetrije usljed kašnjenja zatvaranja kontakata pojedinih faza. Navedene analize pružaju nam podatke o maksimalnim vrijednostima i talasnom obliku prenapona, ali ne

daju informacije o vrijednostima frekvencija i harmonicima koji prate posmatrane procese.

Raspolaganje podacima koji se odnose na strukturu harmonijskog spektra omogućava detaljnija saznanja o navedenim prelaznim procesima i pratećim pojavama do kojih tom prilikom dolazi.

Zbog sve veće potrebe za ovakvim informacijama uvodi se primjena metoda digitalne obrade signala prilikom analize prelaznih procesa na vodovima.

U početnom periodu, harmonijska analiza signala je, u cilju sveobuhvatne analize poremećaja kvaliteta električne energije, vršena primjenom FFT, STFT i wavlet transformacije [36-41]. Međutim, pokazalo se da svaka od njih posjeduje značajne nedostatke kada je u pitanju obrada nelinearnih i nestacionarnih signala, pa se stoga javila potreba za uvođenjem novih metoda kada je ova problematika u pitanju.

Rad [10] prikazuje empirijski metod dekompozicije signala kao relativno novi veoma uspješan metod za analiziranje nelinearnih i nestacionarnih podataka, a glavna inovacija je uvođenje prirodnih sastavnih funkcija baziranih na lokalnim svojstvima signala, što čini trenutnu frekvenciju značajnom i eliminiše pojavu lažnih harmonika.

Radovi [42- 47] primjenjuju empirijski metod dekompozicije signala kao veoma dobru tehniku za posmatranje kvaliteta električne energije u elektroenergetskim sistemima.

Treba naglasiti da je, sa aspekta kvalitete električne energije, od posebnog značaja analiza realnih naponskih signala dobijenih mjerenjima, jer oni reprezentuju posmatrani proces na najrealniji način [48].

Ovako dobijeni signali su složeniji, a obično ih prati i prisustvo šuma, pa su znatno komplikovaniji za analizu od signala koji su rezultat manje ili više preciznih programa za simulaciju.

Analizirano je uključanje i isključenje neopterećenog 35 kV kablovskog voda, uključanje neopterećenog 10 kV kablovskog voda, kao i isključenje neopterećenog 10 kV vazdušnog voda, uz pojavu višestrukog paljenja i gašenja luka među kontaktima prekidača prilikom isključenja.

U slučaju sklopnih prenapona dobijene signale karakterišu brze promjene spektralnog sadržaja, pa je stoga veoma bitno izabrati metod koji će dati najbolje rezultate prilikom njihove analize.

Analiza je vršena na dva načina: primjenom EMD metoda (empirijski metod dekompozicije) i pomoću STFT metoda (koji se uobičajeno koristi za analizu nestacionarnih signala). Takođe je izvršeno upoređivanje rezultata dobijenih navedenim metodama i rezultata dobijenih proračunom. Frekvencije dobijene navedenim metodama omogućile su izvođenje zaključaka o pojavama koje nastaju prilikom analiziranih procesa.

4.1 Harmonijska analiza realnih naponskih signala primjenom EMD i STFT metoda

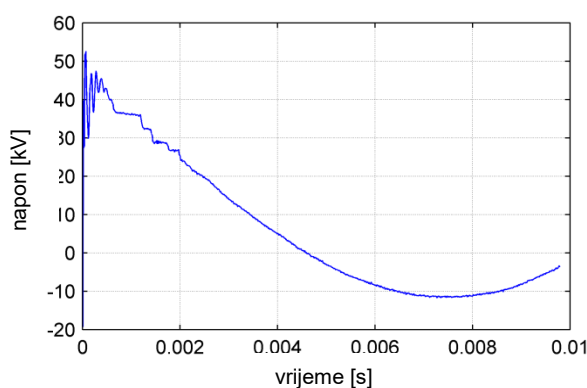
U cilju sprovođenja detaljne analize prelaznih procesa koji nastaju prilikom uključanja i isključenja neopterećenih kablovskih i vazdušnih elektroenergetskih vodova, kao i radi provjere efikasnosti primjene metoda digitalne obrade signala u ove svrhe, izvršena je harmonijska analiza realnih, eksperimentalno dobijenih naponskih signala.

Analizirani su vodovi sledećih karakteristika:

- 35 kV kablovski vod, dužine $l=2.163$ km, karakteristične impedanse $Z_c=34.4\Omega$
- 10 kV vazdušni vod, dužine $l=4.8$ km, karakteristične impedanse $Z_c=349\Omega$
- 10 kV kablovski vod, dužine $l=5.7$ km, karakteristične impedanse $Z_c=38.82\Omega$

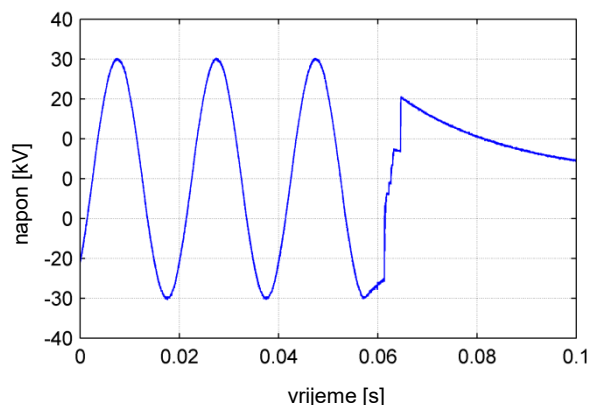
Naponski signali, snimljeni u fazi A u procesu uključanja i isključenja neopterećenih kablovskih i nadzemnih elektroenergetskih vodova, prikazani su na slikama 4.1-4.4.

Slika 4.1 prikazuje naponski signal dobijen u procesu uključanja neopterećenog 35 kV kablovskog voda, dužine $l=2.163$ km, karakteristične impedanse $Z_c=34.4$



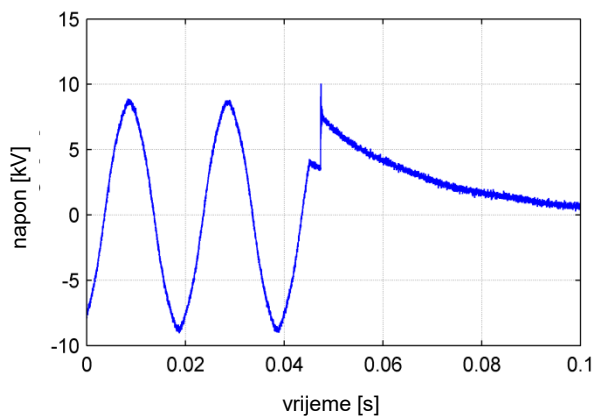
Slika 4.1 Uključenje neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Slika 4.2 prikazuje naponski signal dobijen u procesu isključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda, dužine $l=2.163$ km, karakteristične impedanse $Z_c=34.4 \Omega$, sa višestrukom pojavom luka među kontaktima prekidača.



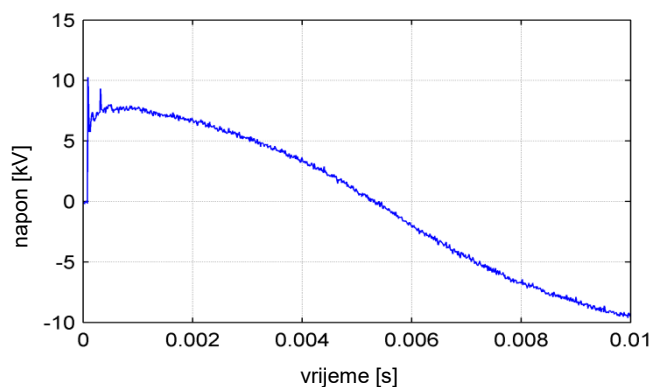
Slika 4.2 Isključenje neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Naponski signal dobijen u procesu isključenja neopterećenog 10 kV nadzemnog voda, dužine $l=4.8$ km, karakteristične impedanse $Z_c=349 \Omega$, sa višestrukom pojavom luka među kontaktima prekidača, prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3 Isključenje neopterećenog 10 kV nadzemnog voda

Slika 4.4 prikazuje naponski signal dobijen u procesu uključivanja neopterećenog 10 kV kablovskog voda, dužine $l=5.7$ km, karakteristične impedanse $Z_c=28.82 \Omega$.



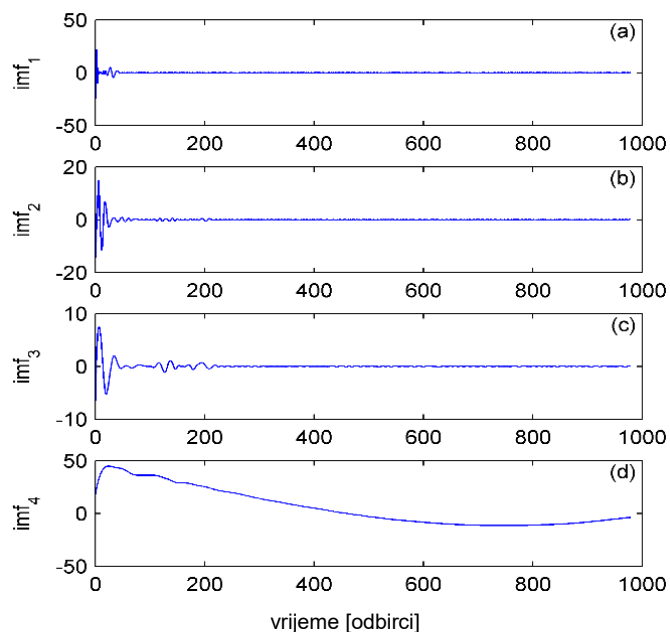
Slika 4.4 Uključenje neopterećenog 10 kV kablovskog voda

Sa slika 4.1-4.4 može se uočiti da su prikazani naponski signali, koji su dobijeni mjerenjem, znatno složeniji od signala dobijenih raznim manje ili više preciznim simulacijama kod kojih se unaprijed znaju vrijednosti postojećih frekvencija. Takođe se mora uzeti u obzir i prisustvo šuma, koji se iz različitih razloga uvijek javlja u realnim signalima.

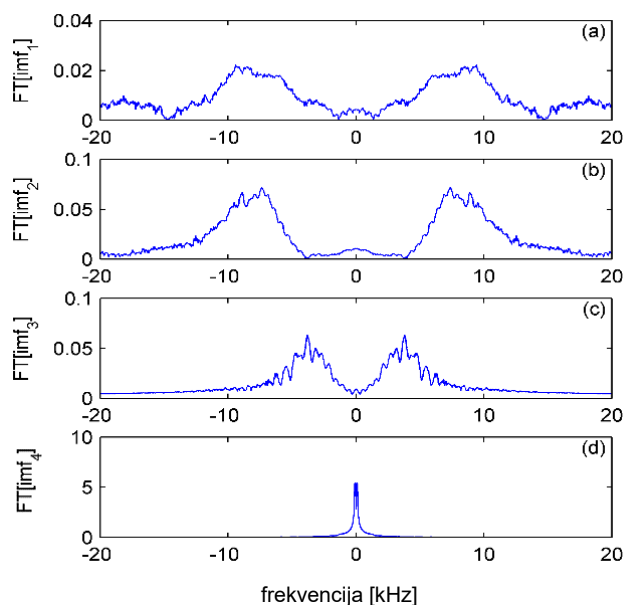
A) Uključenje neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Harmonijska analiza naponskog signala prikazanog na slici 4.1, koji je dobijen u procesu uključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda, dužine $l=2.163$ km, karakteristične impedanse $Z_c=34.4 \Omega$, sprovedena je pomoću EMD metoda na dva načina. Najprije je signal analiziran direktnom primjenom EMD metoda. Nakon toga je iz originalnog signala prije analize izvršeno odstranjivanje sinusne komponente frekvencije 50 Hz, kao i direktne eksponencijalne komponente, sa ciljem da se obezbijedi preciznije određivanje vrijednosti frekvencija izdvojenih prirodnih sastavnih funkcija.

Posmatrani signal, razložen na prirodne sastavne funkcije, prikazan je na slici 4.5, dok je Furijeova transformacija ovih funkcija prikazana slikom 4.6.



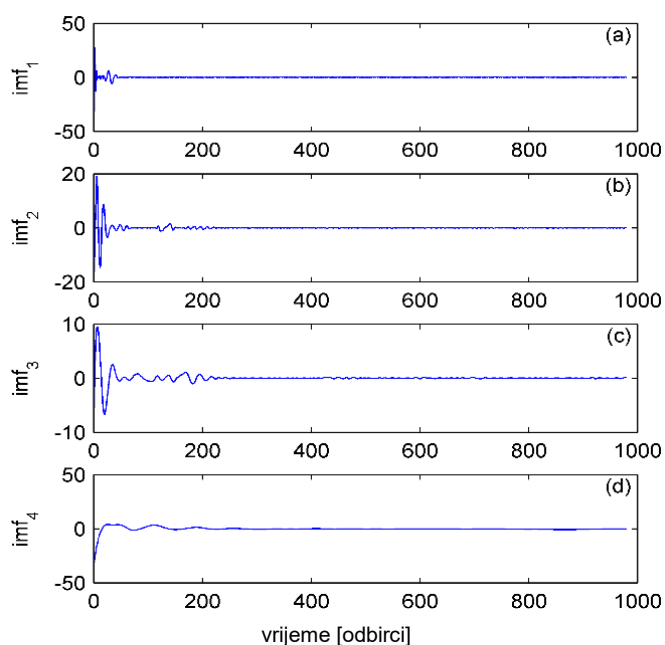
Sika 4.5 Naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije



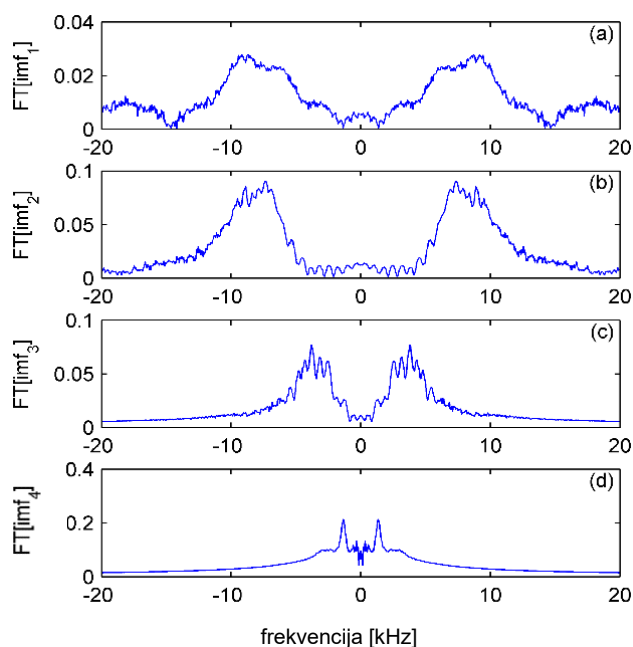
Slika 4.6 Procjena vrijednosti frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Isti naponski signal, iz koga je odstranjena sinusna komponenta frekvencije 50 Hz, kao i direktna eksponencijalna komponenta takođe je analiziran pomoću EMD metoda.

Na slici 4.7 prikazan je analizirani signal, razložen na prirodne sastavne funkcije. Procjena frekvencija izdvojenih iz ovako razloženog signala prikazana je na slici 4.8.



Slika 4.7 Naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)



Slika 4.8 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)

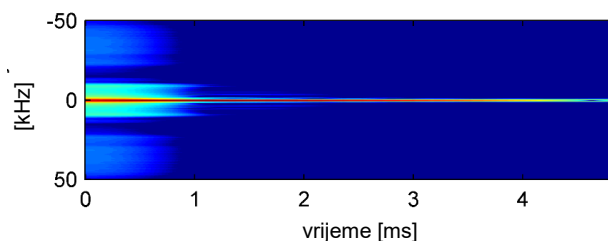
Rezultati dobijeni sprovedenim analizama upoređeni su sa analitički dobijenim vrijednostima frekvencija koje su proračunate primjenom izraza (3.39-3.42), što je

prikazano u tabeli 4.1. Prikazana tabela je rezultat kombinovane primjene teorije i razmatranih metoda digitalne obrade signala, pri čemu su rezultati koji se odnose na direktnu primjenu EMD metoda označeni sa EMD1, a rezultati dobijeni nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente sa EMD2.

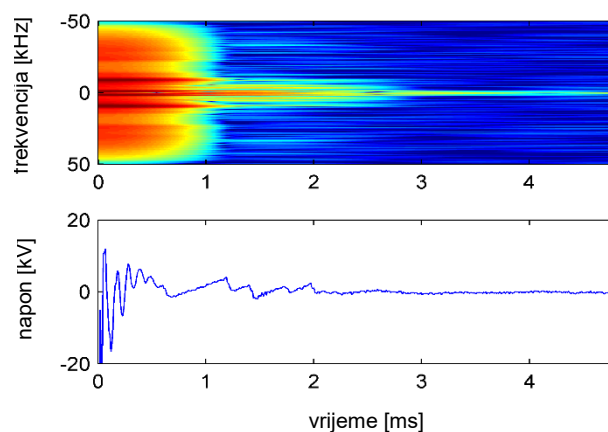
Tabela 4.1 Frekvencije dobijene EMD metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Proračunata frekvencija	EMD 1		EMD 2	
	Frekvencija	Greška	Frekvencija	Greška
365 Hz	-	-	341.8 Hz	6.35 %
1286.8 Hz	-	-	1318.3 Hz	2.4 %
3997.4 Hz	3808.8 Hz	4.7 %	3808.5 Hz	4.7 %
9601.7 Hz	9423.8 Hz	1.8 %	9423.8 Hz	1.8 %
	7373 Hz	-	7324.2 Hz	-

Takođe je izvršena analiza signala direktnom primjenom STFT metoda. Dobijeni rezultati i njihova analiza prikazani su slikama 4.9 i 4.10 i tabelom 4.2.



Slika 4.9 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda



Slika 4.10 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)

Tabela 4.2 Frekvencije dobijene STFT metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Proračunata frekvencija	STFT 1		STFT 2	
	Frekvencija	Greška	Frekvencija	Greška
365 Hz	521 Hz	42.73 %	655 Hz	79.45 %
1286.8 Hz	1175 Hz	8.68 %	1175 Hz	8.68 %
3997.4 Hz	-	-	3782 Hz	5.38 %
9601.7 Hz	8310 Hz	13.45 %	9005 Hz	6.21 %
	24020 Hz	-	24525 Hz	-
	31580 Hz		31035 Hz	
	36190 Hz			

Poređenje rezultata analize naponskog signala primjenom EMD i STFT metode sa vrijednostima dobijenih proračunom pokazuje da su rezultati dobijeni primjenom EMD metoda veoma bliski tačnim (računski dobijenim) vrijednostima, naročito u slučaju kad je izvršeno prethodno odstranjivanje sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente iz posmatranog signala. U tom slučaju, sve proračunate vrijednosti su izdvojene, sa greškom od 1.8-6.35%. Treba napomenuti da maksimalna vrijednost greške, koja odgovara minimalnoj očekivanoj vrijednosti frekvencije, iznosi 6.35%, i posledica je koraka proračuna $\Delta f = 12.22$ Hz. Primjenom STFT metoda na posmatrani signal takođe su izdvojene sve očekivane vrijednosti frekvencija, sa greškom od 5.38-79.45%.

Na osnovu sprovedene analize u ovom slučaju može se zaključiti da su rezultati dobijeni primjenom EMD metoda, u poređenju sa STFT metodom, mnogo bliži realnim vrijednostima.

Uzimajući u obzir vrijednosti relevantnih parametara realnog voda, izdvojene vrijednosti frekvencija mogu biti objašnjene na sledeći način:

- osnovna učestanost je 50 Hz
- sopstvene učestanosti posmatranog sistema su 1286.8 Hz i 365 Hz
- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v=83074.1$ km/s po kablu dužine $l=2.163$ km dobija se frekvencija od 9601.7 Hz.
- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v_0=34585.5$ km/s po kablu dužine $l=2.163$ km dobija se frekvencija od 3997.4 Hz.
- frekvencija od 7324.2 Hz javlja se samo na početku prelaznog procesa (prvih ms), dok još nisu zatvorena sva tri kontakta prekidača, i posledica je nesimetričnog zatvaranja kontakata prilikom uključenja.

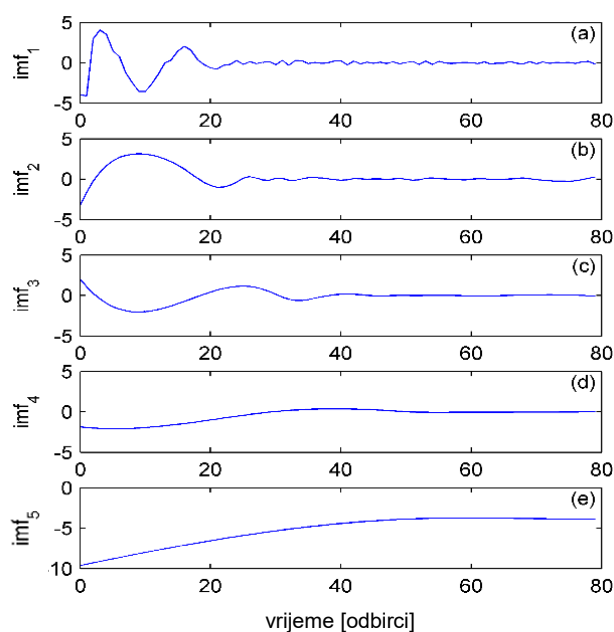
B) Isključenje neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Naponski signal, prikazan na slici 4.2, koji je dobijem prilikom isključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda dužine $l=2.163$ km, karakteristične impedanse $Z_c=34.4 \Omega$, sa pojavom višestrukog paljenja i gašenja luka među kontaktima prekidača analiziran je primjenom EMD metoda (slike 4.11 i 4.12), pri čemu je posmatran onaj dio signala koji odgovara prelaznom procesu.

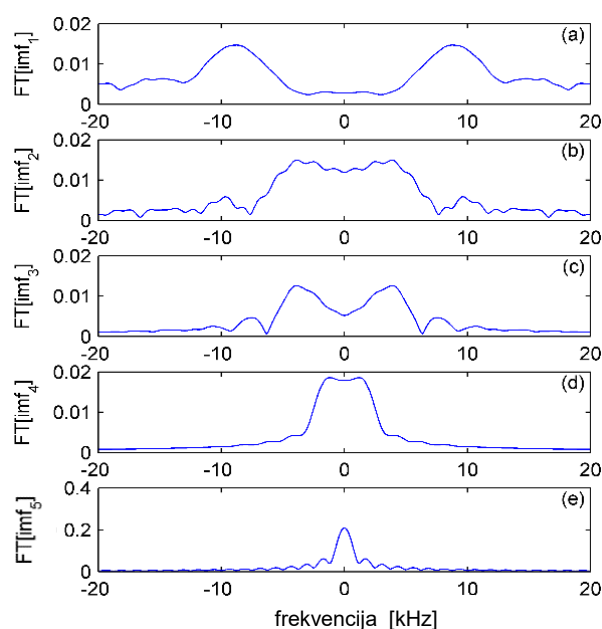
Na slici 4.11 prikazan je naponski signal nastao pri procesu isključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda, razložen na prirodne sastavne funkcije. Slika 4.12 prikazuje procjenu vrijednosti frekvencija koje su izdvojene iz pojedinih funkcija ovako dekomponovanog signala.

Signal je takođe analiziran i primjenom STFT metoda, što je prikazano na slici 4.13.

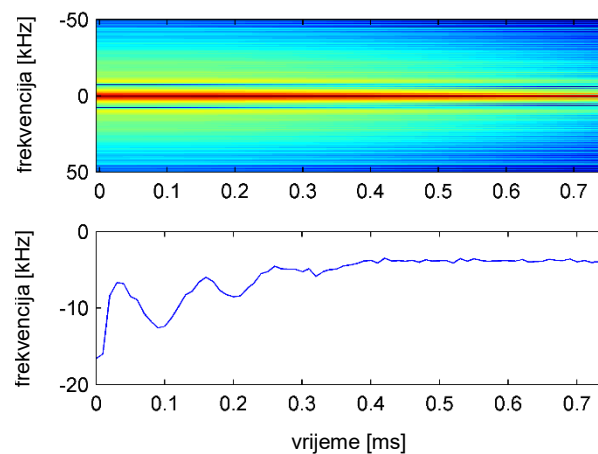
Dobijeni rezultati upoređeni su sa analitički dobijenim vrijednostima frekvencija, što je prikazano u tabeli 4.3.



Slika 4.11 Naponski signal dobijen isključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije



Slika 4.12 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski signal dobijen isključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda



Slika 4.13 STFT analiza naponskog signala dobijenog isključenjem neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Tabela 4.3 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces isključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda

Proračunata frekvencija	EMD		STFT	
	Frekvencija	Greška	Frekvencija	Greška
365 Hz	—	—	—	—
1286.8 Hz	1200 Hz	6.68 %	1179 Hz	8.37 %
3997.4 Hz	3877 Hz	3.02 %	4118 Hz	3.02 %
9601.7 Hz	9320 Hz	2.93 %	10052 Hz	4.68 %

Za naponski signal dobijen u procesu isključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda EMD metoda daje veoma tačne rezultate. Izdvojene su tri od četiri očekivane vrijednosti frekvencija, sa greškom od 2.93-6.68%.

Analizom navedenog signala pomoću STFT metoda, takođe su izdvojene tri od četiri očekivane vrijednosti frekvencija, sa greškom od 3.02-8.37%.

Može se zaključiti da su rezultati dobijeni primjenom EMD metoda, u poređenju sa STFT metodom, i u ovom slučaju bliži realnim vrijednostima.

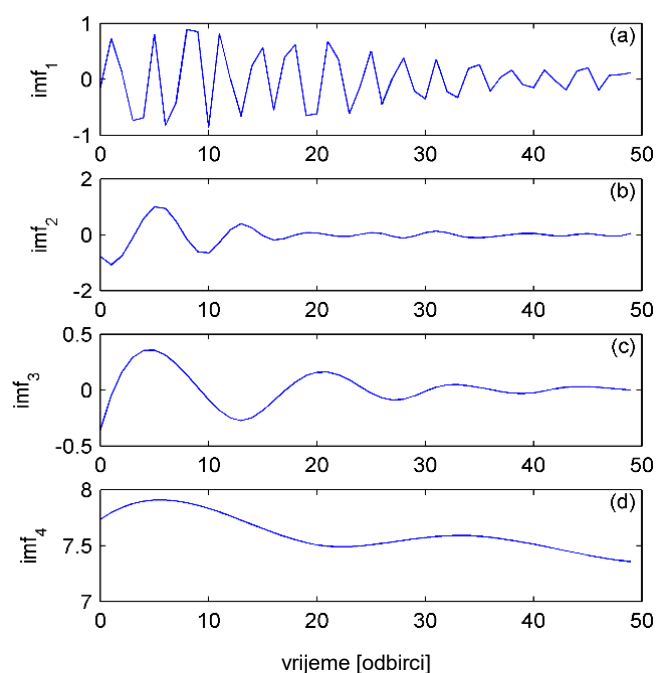
U slučaju koji se odnosi na proces isključenja neopterećenog 35 kV kablovskog voda izdvojene vrijednosti frekvencija mogu biti objašnjene na sledeći način:

- sopstvene učestanosti posmatranog sistema su 1286.8 Hz i 365 Hz
- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v=83074.1$ km/s po kablu dužine $l=2.163$ km dobija se frekvencija od 9601.7 Hz.
- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v_0=34585.5$ km/s po kablu dužine $l=2.163$ km dobija se frekvencija od 3997.4 Hz.

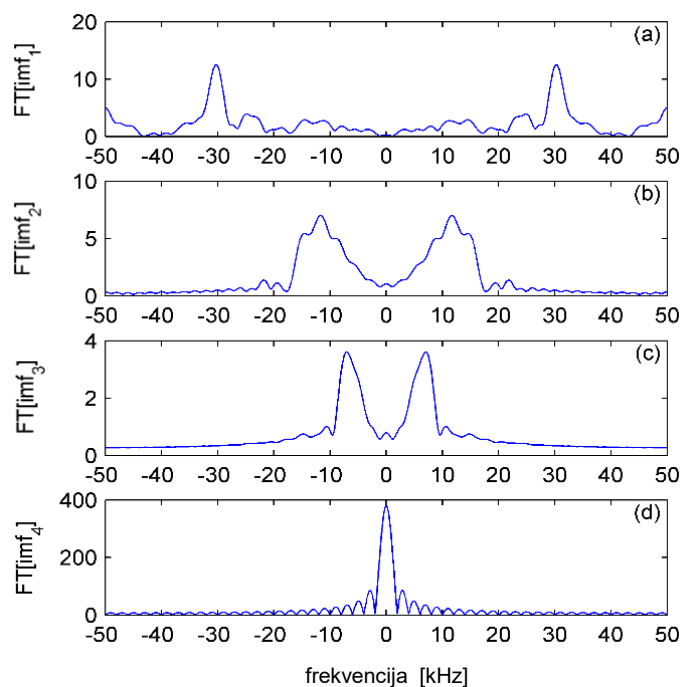
C) Isključenje neopterećenog 10 kV nadzemnog voda

Naponski signal, koji je dobijen u procesu isključenja neopterećenog 10 kV nadzemnog voda dužine $l=4.8$ km, karakteristične impedanse $Z_c=349 \Omega$ (slika 4.3), sa pojavom višestrukog paljenja i gašenja luka među kontaktima prekidača analiziran je primjenom EMD metoda (slike 4.14 i 4.15), pri čemu je posmatran onaj dio signala koji odgovara prelaznom procesu.

Na slici 4.14 prikazan je naponski signal nastao pri procesu isključenja neopterećenog 10 kV nadzemnog voda, razložen na prirodne sastavne funkcije. Slika 4.15 prikazuje procjenu vrijednosti frekvencija koje su izdvojene iz pojedinih funkcija ovako dekomponovanog signala.



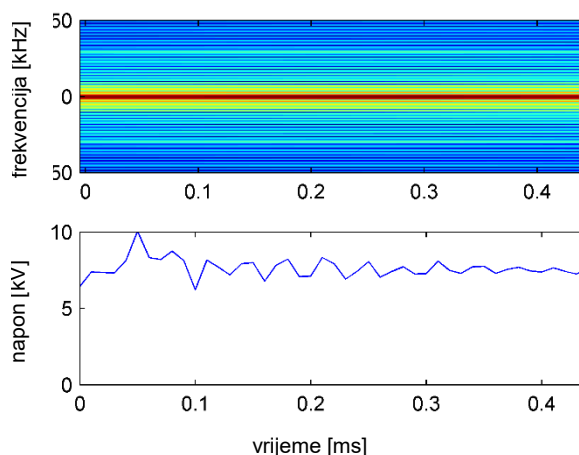
Slika 4.14 Naponski signal dobijen isključenjem neopterećenog 10 kV nadzemnog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije



Slika 4.15 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski signal dobijen isključenjem neopterećenog 10 kV nadzemnog voda

Signal je takođe analiziran i primjenom STFT metoda, što je prikazano na slici 4.16.

Dobijeni rezultati upoređeni su sa vrijednostima frekvencija koje su dobijene analitički, što je prezentovano u tabeli 4.4.



Slika 4.16 STFT analiza naponskog signala dobijenog isključenjem neopterećenog 10 kV nadzemnog voda

Tabela 4.4 Frekvencije dobijene EMD i STFT metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces isključenja neopterećenog 10 kV nadzemnog voda

Proračunata frekvencija	EMD		STFT	
	Frekvencija	Greška	Frekvencija	Greška
6859 Hz	7050 Hz	2.78 %	2000 Hz	70.84 %
11460 Hz	11670 Hz	1.83 %	-	-
11741 Hz	-	-	-	-
14910.7 Hz	14540 Hz	2.48 %	-	-
	30272 Hz	-	29370 Hz	-

Za naponski signal dobijen u procesu isključenja neopterećenog neopterećenog 10 kV nadzemnog voda EMD metoda takođe daje veoma tačne rezultate. Izdvojene su tri od četiri očekivane vrijednosti frekvencija, sa greškom od 1.83-2.78%. Pored analitički dobijenih vrijednosti frekvencija, u ovom slučaju je uočeno i prisustvo komponente signala sa frekvencijom od 30272 Hz, koji je posledica konstrukcionih karakteristika prekidača.

Analizom navedenog signala direktnom prijenom STFT metoda dobijena je samo jedna komponenta frekvencije od 29370 Hz.

Uočene vrijednosti mogu biti objašnjene na sledeći način:

- sopstvene učestanosti posmatranog sistema su 6859 Hz i 11741 Hz
- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v=286285.6$ km/s po vodu dužine $l=4.8$ km dobija se frekvencija od 14910.7 Hz.

- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v_0=220032$ km/s po vodu dužine $l=4.8$ km dobija se frekvencija od 11460 Hz
- prisustvo frekvencije vrijednosti 30272 Hz je rezultat konstrukcionih karakteristika prekidača

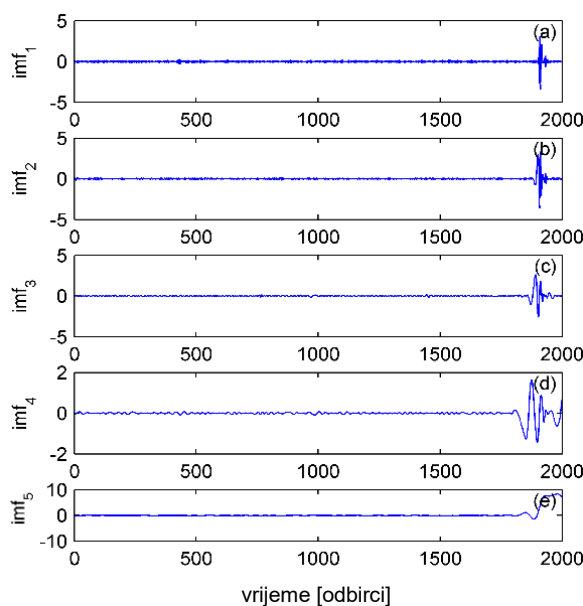
D) Uključenje neopterećenog 10 kV kablovskog voda

Harmonijska analiza naponskog signala prikazanog na slici 4.4, koji je dobijen u procesu uključenja neopterećenog 10 kV kablovskog voda, dužine $l=5.7$ km, karakteristične impedanse $Z_c=28.82 \Omega$, sprovedena je na isti način kao u poglavlju A.

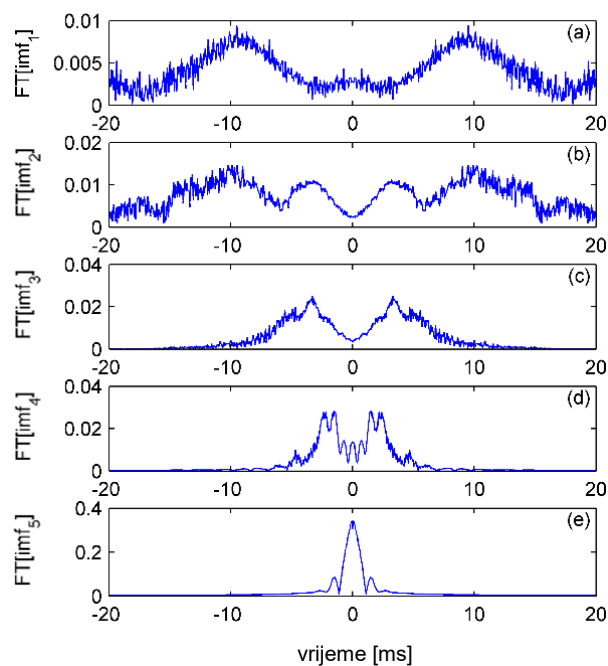
Najprije je izvršena analiza direktnom primjenom EMD metoda na originalni signal.

Posmatrani signal je razložen na prirodne sastavne funkcije, što je prikazano na slici 4.17, dok je Furijeova transformacija ovih funkcija prikazana slikom 4.18.

Isti naponski signal, iz koga je odstranjena sinusna komponenta frekvencije 50 Hz, kao i direktna eksponencijalna komponenta takođe je analiziran pomoću EMD metoda.

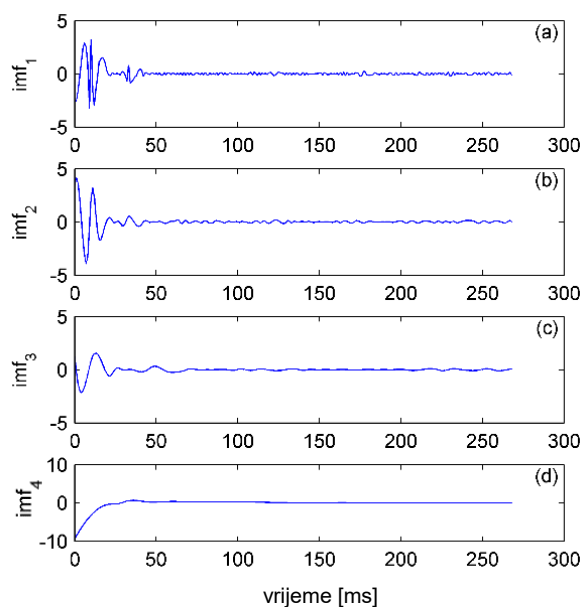


Slika 4.17 Naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije

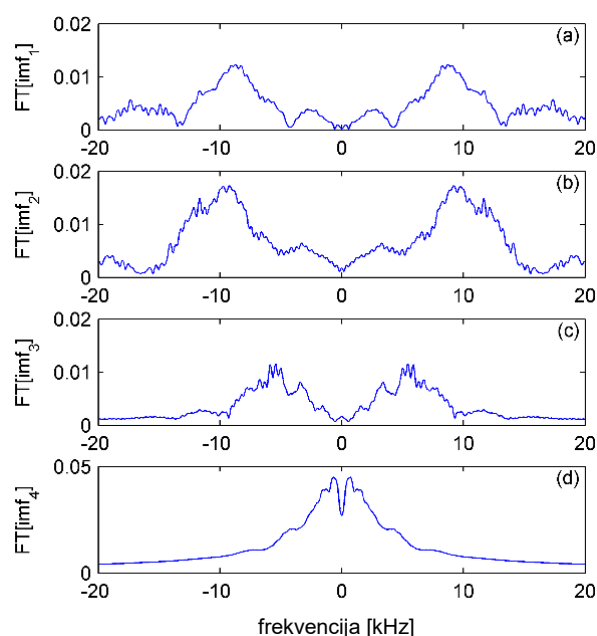


Slika 4.18 Procjena vrijednosti frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski signal dobijen uključanjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda

Na slici 4.19 prikazan je analizirani signal, razložen na prirodne sastavne funkcije. Procjena frekvencija izdvojenih iz ovako razloženog signala prikazana je na slici 4.20.



Slika 4.19 Naponski signal dobijen uključanjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda, dekomponovan na prirodne sastavne funkcije (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)



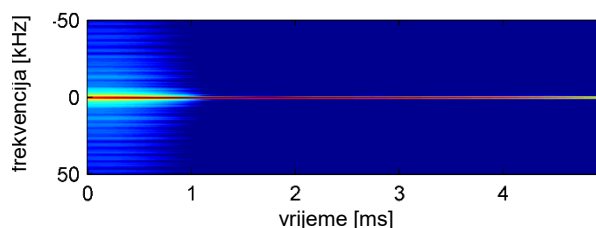
Slika 4.20 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za naponski signal dobijen uključenjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)

Rezultati dobijeni sprovedenim analizama upoređeni su sa analirički dobijenim vrijednostima frekvencija, što je prikazano u tabeli 4.5, u kojoj su rezultati koji se odnose na direktnu primjenu EMD metoda označeni sa EMD1, a rezultati dobijeni nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente sa EMD2.

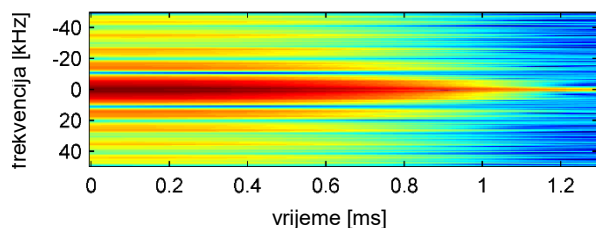
Tabela 4.5 Frekvencije dobijene EMD metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 10 kV kablovskog voda

Proračunata frekvencija	EMD 1		EMD 2	
	Frekvencija	Greška	Frekvencija	Greška
754Hz	683 Hz	9.32 %	707 Hz	6.23 %
1344 Hz	1464.9 Hz	8.95 %	1264.9 Hz	5.53%
2118 Hz	2197.2 Hz	3.74 %	2148.43 Hz	1.43 %
3385 Hz	3320.31 Hz	1.91 %	3471.95 Hz	0.97%
	9521.5 Hz		9521.5 Hz	

Izvršena je i analiza originalnog signala, kao i signala nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente primjenom STFT metode. Dobijeni rezultati prikazani su na slikama 4.21 i 4.22, kao i tabelom 4.6.



Slika 4.21 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda



Slika 4.22 STFT analiza naponskog signala dobijenog uključenjem neopterećenog 10 kV kablovskog voda (nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente)

Tabela 4.6 Frekvencije dobijene STFT metodom upoređene sa izračunatim vrijednostima za proces uključenja neopterećenog 10 kV kablovskog voda nakon odstranjivanja sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente

Proračunata frekvencija	STFT 1		STFT 2	
	Frekvencija	Greška	Frekvencija	Greška
754Hz	802 Hz	5.57 %	772	2.45 %
1344 Hz	1398 Hz	6.89 %	1560	16.07 %
2118 Hz	-	-	-	-
3385 Hz	-	-	-	-
			8950	

Poređenje rezultata analize naponskog signala primjenom EMD i STFT metode sa vrijednostima dobijenih proračunom pokazuje da su rezultati dobijeni primjenom EMD metoda veoma bliski tačnim (računski dobijenim) vrijednostima, naročito u slučaju kad je izvršeno prethodno odstranjivanje sinusne komponente frekvencije 50 Hz i direktne eksponencijalne komponente iz posmatranog signala. U tom slučaju, sve proračunate vrijednosti su izdvojene, sa greškom od 0.97-6.23%. Treba napomenuti da maksimalna vrijednost greške, koja odgovara minimalnoj očekivanoj vrijednosti frekvencije od 754 Hz, iznosi 6.23%, i posledica je koraka proračuna $\Delta f = 12.22$ Hz. Primjenom STFT metoda na posmatrani signal dvije od četiri očekivane vrijednosti frekvencija su izdvojene, sa greškom od 2.45-16.07%.

Na osnovu sprovedene analize u ovom slučaju može se zaključiti da su rezultati dobijeni primjenom EMD metoda, u poređenju sa STFT metodom, mnogo bliži realnim vrijednostima.

Izdvojene vrijednosti frekvencija mogu biti objašnjene na sledeći način:

- osnovna učestanost je 50 Hz
- sopstvene učestanosti posmatranog sistema su 754 Hz i 2118 Hz
- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v=75418.12$ km/s po kablju dužine $l=5.57$ km dobija se frekvencija od 3385 Hz.
- usled prelamanja i odbijanja talasa brzine $v_0=29372$ km/s po kablju dužine $l=5.57$ km dobija se frekvencija od 1344 Hz.
- frekvencija od 9521.5 Hz javlja se samo na početku prelaznog procesa (prvih ms), prije nego što su zatvorena sva tri kontakta prekidača, i posledica je nesimetričnog zatvaranja kontakata prilikom uključjenja .

POGLAVLJE 5

Metod za detekciju i klasifikaciju raznih vrsta zemljospoja na neopterećenom vodu

Detekcija i klasifikacija poremećaja kvaliteta električne energije je oblast kojoj se u novije vrijeme posvećuje velika pažnja. Pravovremeno određivanje vrste poremećaja, kao i vremenskog perioda u kome se on javlja je od izuzetnog značaja za pouzdan rad elektroenergetskog sistema, pa veliki broj radova izučava navedenu problematiku.

U literaturi je predstavljena primjena različitih metoda digitalne obrade signala za detekciju i klasifikaciju poremećaja kvaliteta električne energije, od kojih su najzastupljenije Wavelet [16], [49-53] i EMD [54-57]. U početnom periodu izučavanja ove problematike primjenjivani su metodi klasifikacije poremećaja na osnovu vrijednosti nekog karakterističnog svojstva, izdvojenog navedenim metodama (energija, frekvencija), a za analizu su korišćeni jednofazni naponski signali dobijeni simulacijom.

Primjena automatske klasifikacije poremećaja kvaliteta električne energije, koja počinje devedesetih godina dvadesetog vijeka [58], veoma je značajna jer se na taj način u velikoj mjeri smanjuje vrijeme potrebno za određivanje vrste poremećaja koji je prisutan u posmatranom naponskom signalu, što omogućava njegovo otklanjanje u kraćem vremenskom periodu. Prilikom automatske klasifikacije uobičajeno se koristi kombinacija neke od metoda digitalne obrade signala (wavelet, EMD, S metod i slično) i neuralnih mreža (PNN, SVM, RBF), što predstavlja dosta komplikovanu proceduru [59-65]. U dostupnoj literaturi pretežno se koristi jednofazna prezentacija simuliranih naponskih signala. Treba naglasiti da je ovaj način znatno jednostavniji od trofazne

prezentacije, ali je takvim pristupom moguće analizirati samo ograničen broj poremećaja (pretežno simetrične vrste poremećaja). Međutim, ovakav pristup ne uzima u obzir međusobni uticaj pojedinih faza, koji je kod nekih vrsta poremećaja (nesimetričnih), neophodno uračunati. Stoga je, u cilju dobijanja validnih rezultata kada je analiza nesimetričnih poremećaja u pitanju, neophodno korišćenje trofazne prezentacije.

Uobičajen primjer za nesimetričan tip poremećaja u svakodnevnoj praksi je pojava prenapona koji prati proces uključanja neopterećenog voda. Uključenje se može vršiti u normalnom radnom režimu ili uz postojanje neke vrste kvara na vodu.

Uključenje otvorenog voda u normalnom režimu se predstavlja kao nesimetričan proces [66], koji uzima u obzir nejednovremeno zatvaranje kontakata prekidača. Prenaponi, koji se tom prilikom javljaju, mogu dostići veoma visoke vrijednosti, sa koeficijentom prenapona reda veličine 3.5 i više. Ukoliko postoji određena vrsta kvara na vodu u trenutku njegovog uključanja, problem se dodatno usložnjava, jer se u tom slučaju mogu javiti prenaponi još veće vrijednosti [67, 68]. Stoga je, prilikom uključanja voda od posebne važnosti pravovremena detekcija zemljospoja, kako bi se omogućilo njegovo isključenje u što kraćem vremenskom periodu.

U dostupnoj literaturi, detekcija i klasifikacija određenih vrsta kvara, kao što su su jednofazni, dvofazni i trofazni zemljospoj, uglavnom se odnosi na stacionarni režim rada, kada je proces uključanja voda već završen [69, 70].

U ovom poglavlju razvijen je klasifikacioni metod za određivanje režima rada neopterećenog vazdušnog voda prilikom uključanja. Prednost urađenog metoda je u njegovoj jednostavnoj primjeni, velikoj tačnosti i brzini, jer vremenski period neophodan za detekciju i klasifikaciju poremećaja iznosi 20 ms. Metod omogućava da se utvrdi da li je posmatrani vod u normalnom režimu rada ili u zemljospoju. Takođe, metodom se detektuje vrsta zemljospoja – jednofazni, dvofazni ili trofazni. Treba posebno naglasiti da jednofazni i dvofazni zemljospoj spadaju u nesimetrične procese, dok je trofazni zemljospoj simetričan. S tim u vezi, naponski signali u slučaju normalnog režima i jednofaznog i dvofaznog zemljospoja su nesimetrični, pa je predloženim metodom njihova analiza izvršena razlaganjem na simetrične α , β i 0 komponentne sisteme primjenom Clarke-ove transformacije. Upravo će nulta

komponenta signala biti od vitalne važnosti za predloženi klasifikaciono-detekcioni metod, jer svaki od razmatranih kvarova ima specifične karakteristike nulte komponente. Takođe, u sklopu metoda će biti upotrijebljena EMD metoda.

U sledećem dijelu rada dat je prikaz nulte komponente naponskog signala na kraju neopterećenog voda u slučaju normalnog režima rada, jednofaznog, dvofaznog i trofaznog zemljospoja na proizvoljno odabranoj tački voda. Naime, sprovedenom analizom neophodno je uvažiti činjenicu da postoji zavisnost nulte komponente napona na vodu od lokacije kvara.

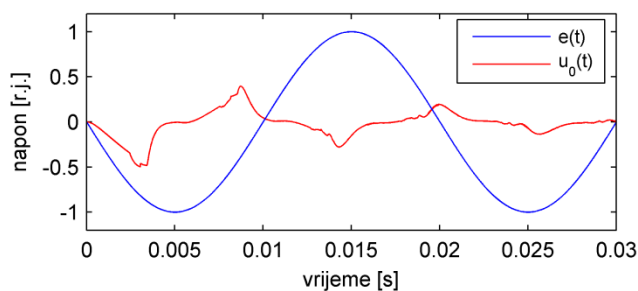
Naponski signali su dobijeni simulacijama u Matlab Simulink-u.

5.1 Karakteristike nulte komponente napona na kraju neopterećenog voda u slučaju normalnog režima rada

Na osnovu matematičkog modela i programa urađenih u trećem poglavlju (3.1.1), koji omogućavaju trofaznu simulaciju procesa uključjenja neopterećenog voda, uzimajući u proračun nesimetriju usled različitih momenata zatvaranja kontakata prekidača pojedinih faza, izvršeno je izdvajanje i analiza nulte komponente napona na kraju voda.

Od niza urađenih primjera prikazani su, kao karakteristični, oblici nulte komponente napona u tački na kraju voda, u slučajevima uključjenja dugog voda (500 km) i kratkog voda (30 km), (sa podacima datim u tabeli 3.6) u praznom hodu.

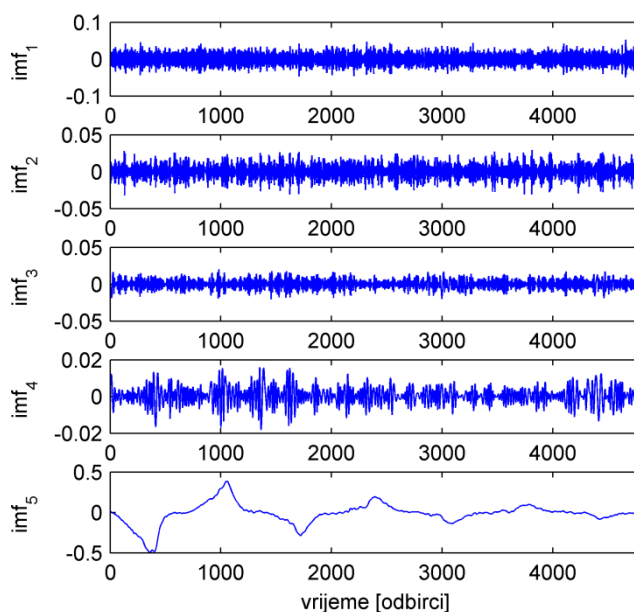
Slika 5.1 prikazuje simulirani signal koji predstavlja nultu komponentu napona $u_0(t)$ u slučaju uključjenja neopterećenog voda dužine 500 km, u tački na kraju voda u normalnog radnog režima, kao i napon generatora $e(t)$. Vrijednosti napona prikazane su u relativnim jedinicama.



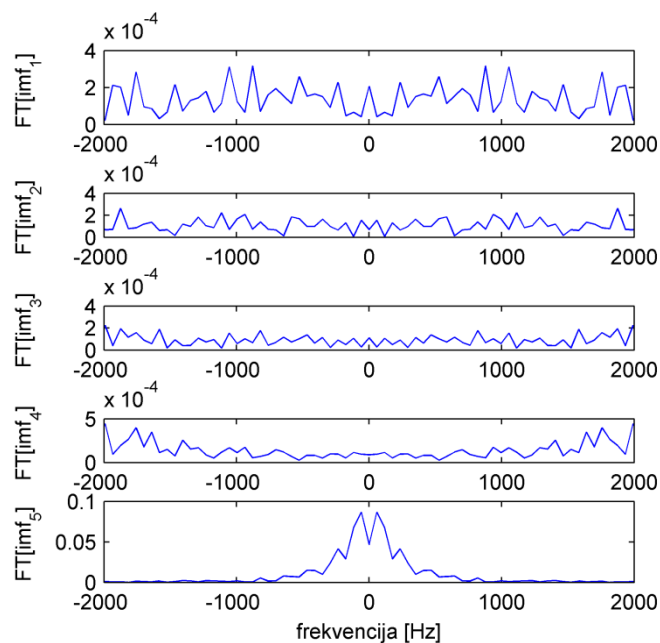
Slika 5.1 Nulta komponenta napona pri uključenju neopterećenog voda dužine 500 km u tački na kraju voda u normalnom režimu rada

Primjenom EMD metoda na nultu komponentu napona sa slike 5.1 izvršena je dekompozicija analiziranog signala na prirodne sastavne funkcije, kao što je prikazano slikom 5.2. Slika 5.3 prikazuje procjenu vrijednosti frekvencija sadržanih u odgovarajućim IMF-ovima.

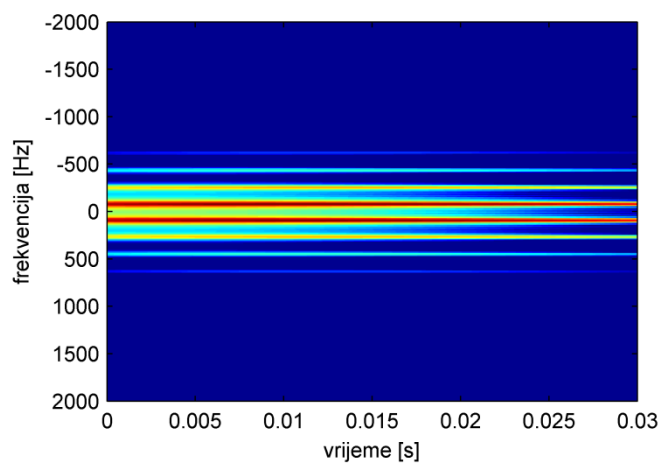
U cilju provjere dobijenih rezultata, izvršena je i analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, što prikazuje slika 5.4.



Slika 5.2 Primjena EMD metode za analizu nulte komponente napona pri uključenju neopterećenog voda dužine 500km u normalnom random režimu

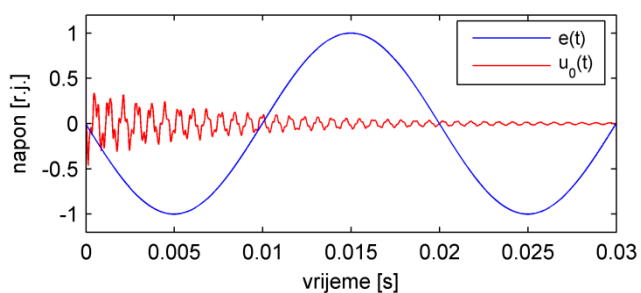


Slika 5.3 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 500 km



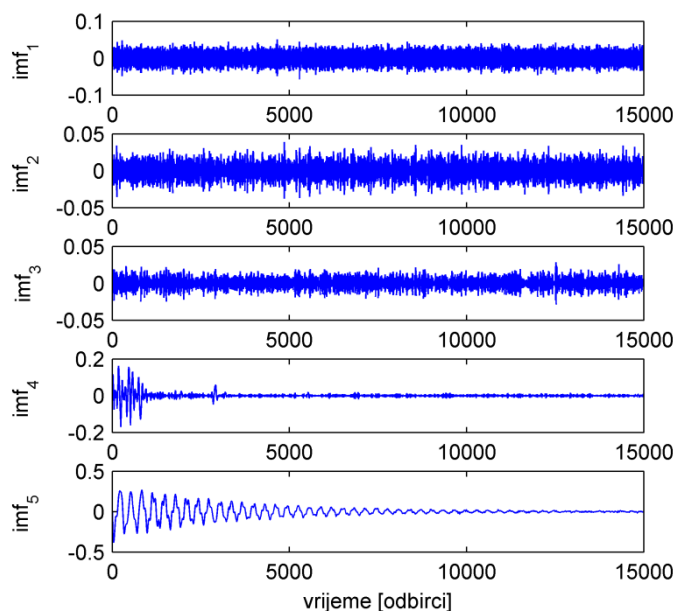
Slika 5.4 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 500 km u tački na kraju voda u normalnom režimu rada

Slika 5.5 prikazuje nultu komponentu napona u tački na kraju voda u slučaju uključenja neopterećenog voda dužine 30 km, u normalnom režimu rada.

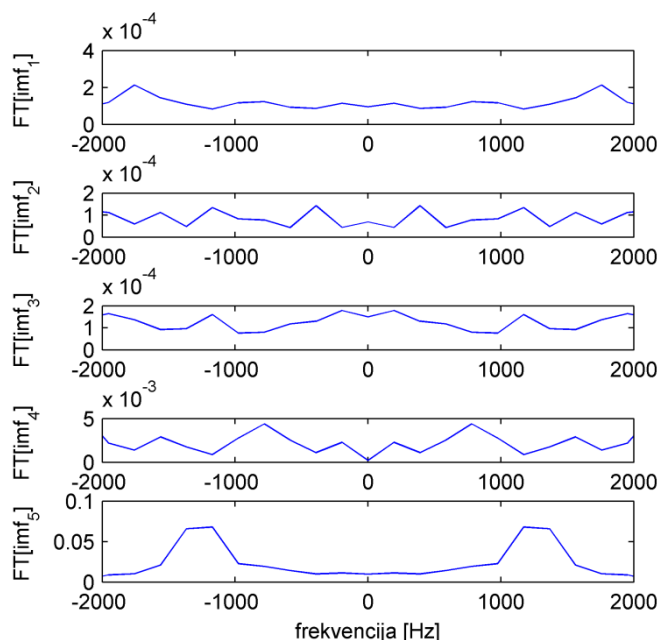


Slika 5.5 Nulta komponenta napona pri uključenju neopterećenog voda dužine 30 km u tački na kraju voda u normalnom režimu rada

Kao i u slučaju veoma dugog voda, primjenom EMD metoda na nultu komponentu napona sa slike 5.5 razložen je naponski signal na prirodne sastavne funkcije, što je prikazano slikom 5.6, dok je izdvajanje vrijednosti frekvencija sadržanih u odgovarajućim IMF-ovima dato slikom 5.7.

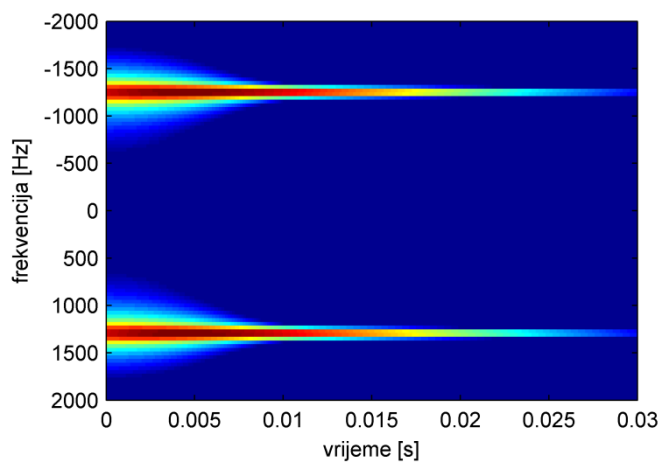


Slika 5.6 Primjena EMD metode za analizu nulte komponente napona pri uključenju neopterećenog voda dužine 30 km u normalnom random režimu



Slika 5.7 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 30 km

Izvršena je i analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, što prikazuje slika 5.8.



Slika 5.8 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 30 km u tački na kraju voda u normalnom režimu rada

Na osnovu rezultata analize dobijenih primjenom EMD i STFT metoda može se uočiti da nulta komponenta napona na kraju neopterećenog voda u normalnom režimu rada prilikom njegovog uključenja ima frekvencije koje su veće od 50Hz. U realnim slučajevima, vrijednost ovih komponenti frekvencije može se kretati i do nekoliko

desetina kHz. Poslije određenog vremenskog perioda, koji zavisi od karakteristika voda (posebno od otrornosti i induktivnosti), dolazi do njenog prigušivanja.

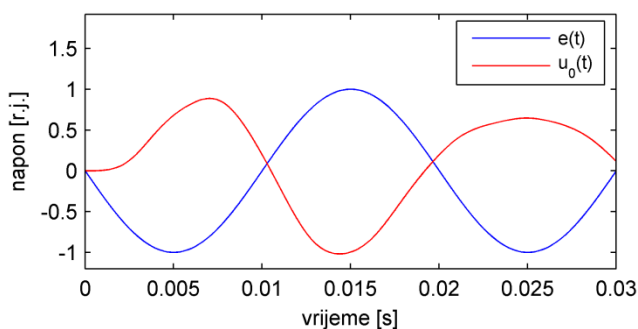
5.2 Karakteristike nulte komponenta napona na kraju neopterećenog voda u slučaju jednofaznog zemljospoja

Na osnovu analize sprovedene u trećem poglavlju (3.2) izveden je matematički izraz (3.68) koji predstavlja vremenski oblik nulte komponente napona na kraju neopterećenog voda u jednofaznom zemljospoju u procesu njegovog uključenja. Iz navedenog izraza može se zaključiti da nulta komponenta napona u ovom slučaju ima karakterističan oblik, što je čini pogodnom za automatsku detekciju prisustva jednofaznog zemljospoja u proizvoljnoj tački voda u trenutku njegovog uključenja. Izraz je dobijen pod pretpostavkom da je do pojave jednofaznog zemljospoja došlo na fazi A.

U cilju korišćenja za dalju analizu, od velikog broja urađenih primjera prikazani su, kao reprezentativni, oblici nulte komponente napona u slučajevima uključenja dugog voda (500 km) i kratkog voda (30 km), u jednofaznom zemljospoju. Vodovi različitih dužina su odabrani da bi se mogao uzeti u obzir i eventualni uticaj dužine voda na vrijednost frekvencijskih komponenti koje se javljaju pri posmatranom procesu. Takođe su posmatrani slučajevi pojave kvara na početku i na kraju voda.

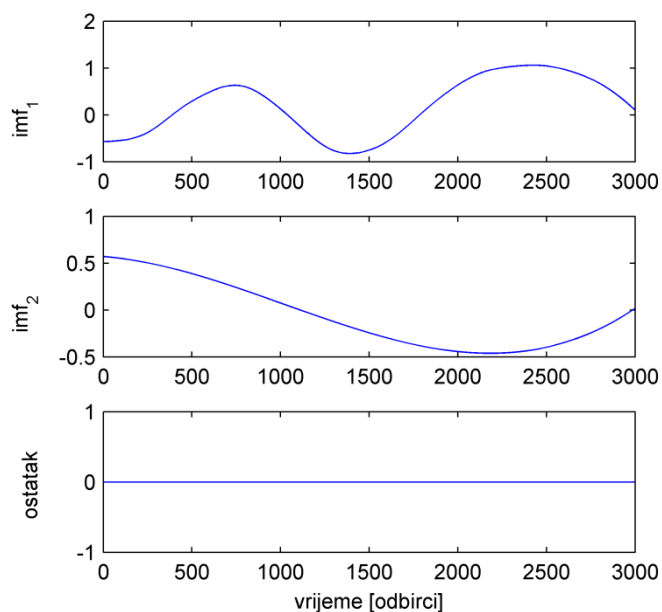
Podaci analiziranih sistema dati su u tabeli 3.6.

Na slici 5.9 prikazana je nulta komponenta napona u slučaju uključenja neopterećenog voda dužine 500 km. Vod je u jednofaznom zemljospoju, a tačka kvara je na kraju voda.

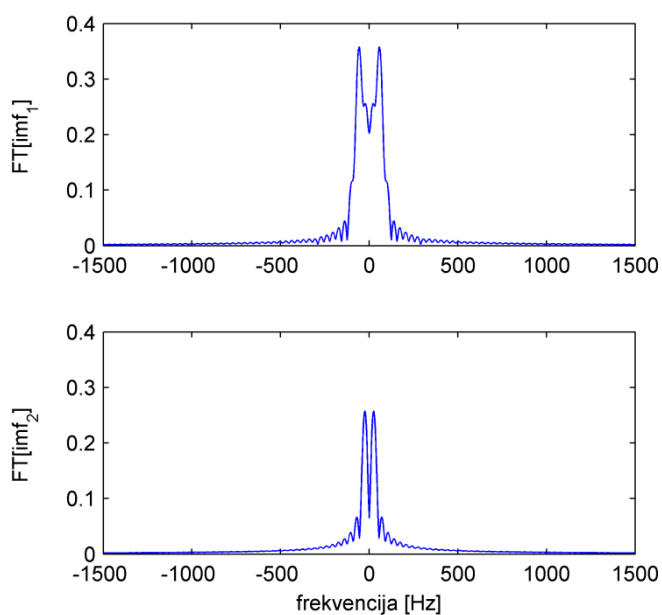


Slika 5.9 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju na kraju voda

Na slici 5.10 prikazana je analiza nulte komponente napona sa slike 5.9 u krajnjoj tački voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju prilikom njegovog uključenja primjenom EMD metoda, dok je na slici 5.11 urađena procjena dobijenih frekvencija.

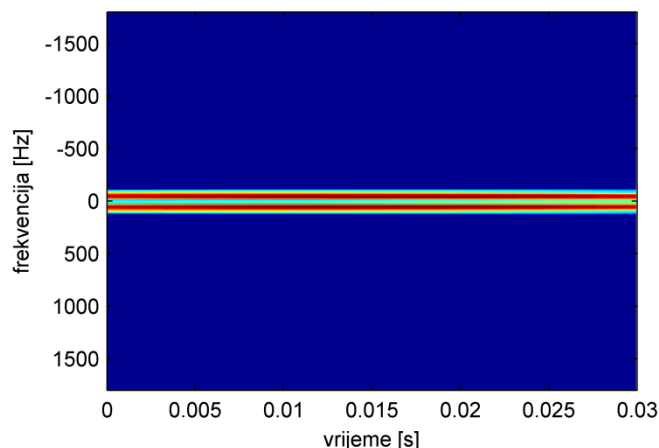


Slika 5.10 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju na kraju voda, predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija



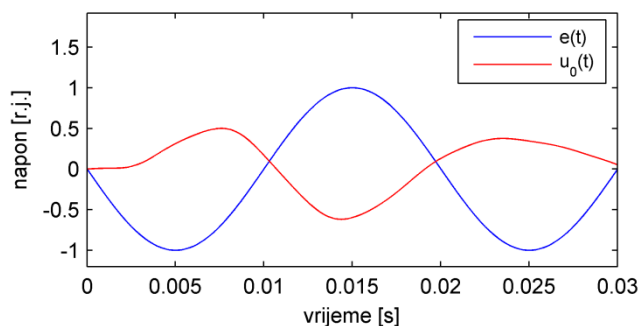
Slika 5.11 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 500 km

Izvršena je i analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, što je prikazano na slici 5.12



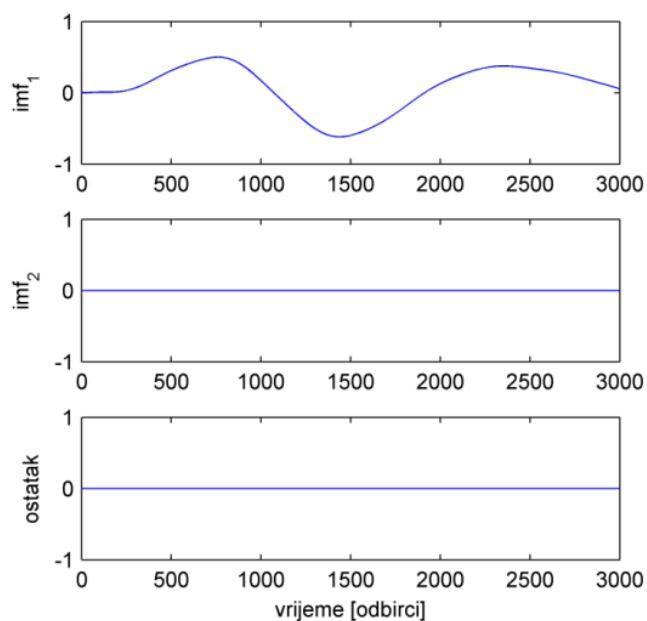
Slika 5.12 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju na kraju voda

Na slici 5.13 prikazana je nulta komponenta napona u slučaju uključenja neopterećenog voda dužine 500 km, koji je u jednofaznom zemljospoju, pri čemu je tačka kvara na početku voda.

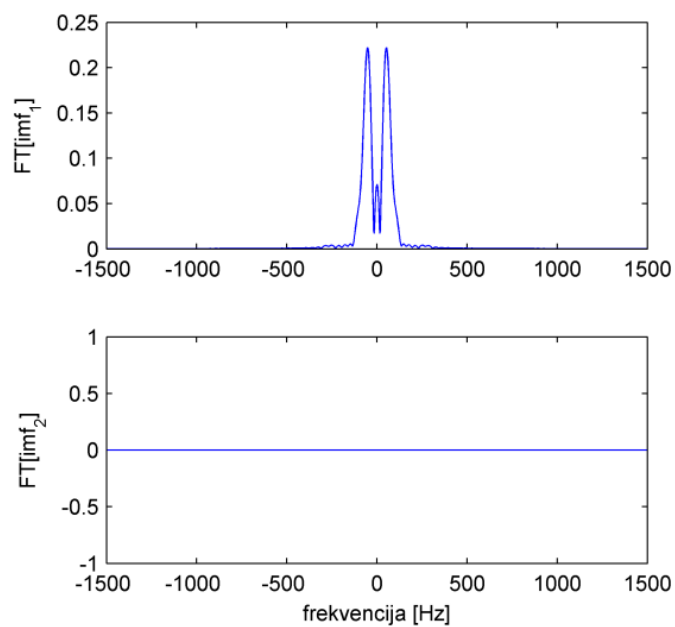


Slika 5.13 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju na početku voda

Primjena EMD metoda na naponski signal sa slike 5.13, kao i određivanje odgovarajućih komponenti frekvencija, prikazana je slikama 5.14 i 5.15 respektivno.

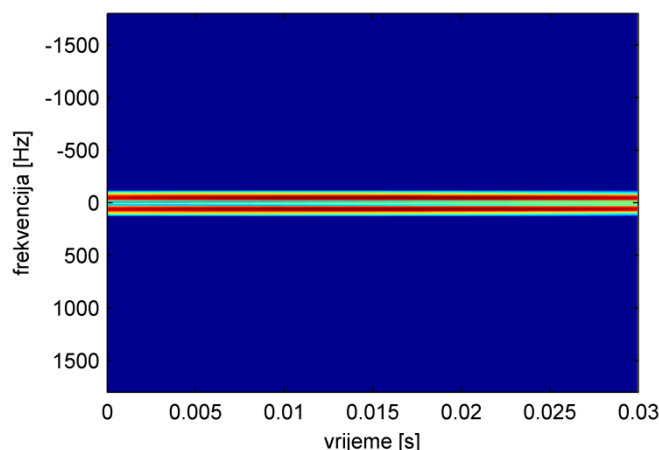


Slika 5.14 Nulta komponenta napona pri uključenju voda u jednofaznom zemljospoju (kvar na početku voda) predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 5.15 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod

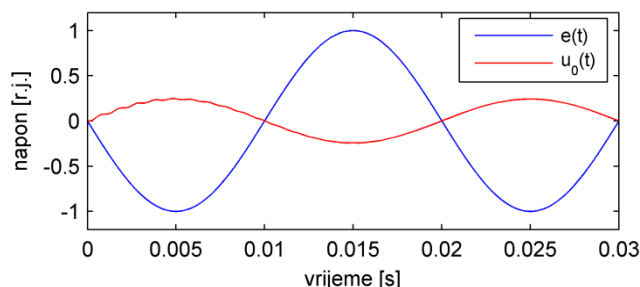
Izvršena je i analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, što je prikazano na slici 5.16.



Slika 5.16 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 500 km u jednofaznom zemljospoju na početku voda

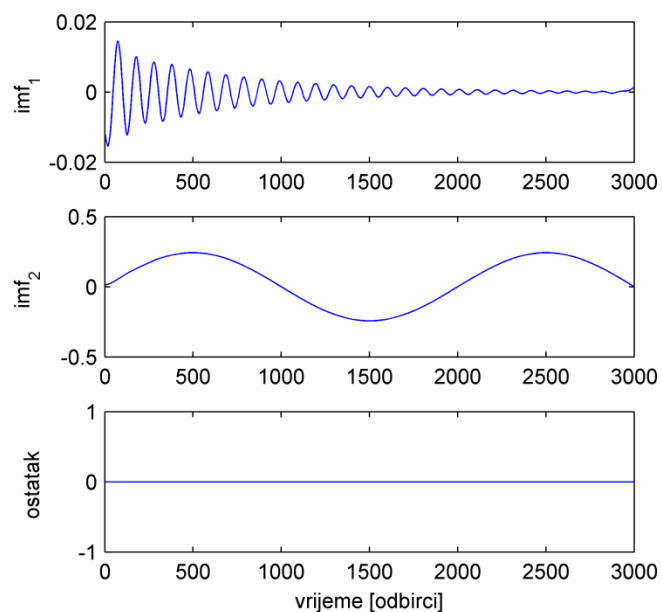
Upoređivanjem naponskih signala prezentovanih na slikama 5.9 i 5.13, koji se razlikuju samo po mjestu pojave zemljospoja, dolazi se do zaključka da oba signala imaju u svom harmonijskom spektru dominantnu komponentu učestanosti 50Hz (osnovna učestanost), konstantne amplitude, koja je po fazi suprotna naponu izvora. U posmatranim signalima dolazi i do prisustva viših komponenti frekvencije, ali je njihova amplituda zanemarljiva u poređenju sa dominantnom komponentom. Uočava se takođe da pozicija tačke kvara utiče na amplitudu nulte komponente napona.

Na slici 5.17 prikazana je nulta komponenta napona u slučaju uključenja neopterećenog voda dužine 30 km. Vod je u jednofaznom zemljospoju, a tačka kvara je na kraju voda.

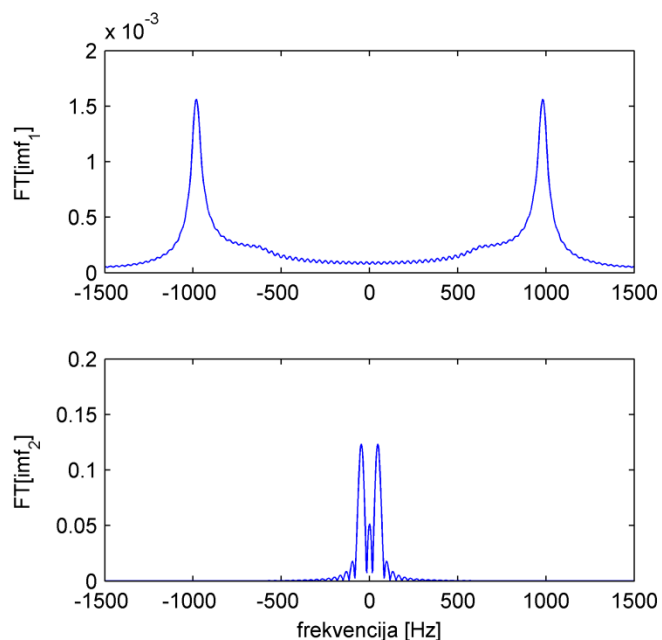


Slika 5.17 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 30 km u jednofaznom zemljospoju (tačka kvara je na kraju voda)

Kao i u slučaju dugog voda, naponski signal predstavljen na slici 5.17 analiziran je EMD metodom. Na slici 5.18 predstavljena je njegova dekompozicija na odgovarajuće IMF-ove, dok je određivanje harmonijskog spektra prikazano slikom 5.19.



Slika 5.18 Nulta komponenta napona pri uključenju voda u jednofaznom zemljospoju predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija

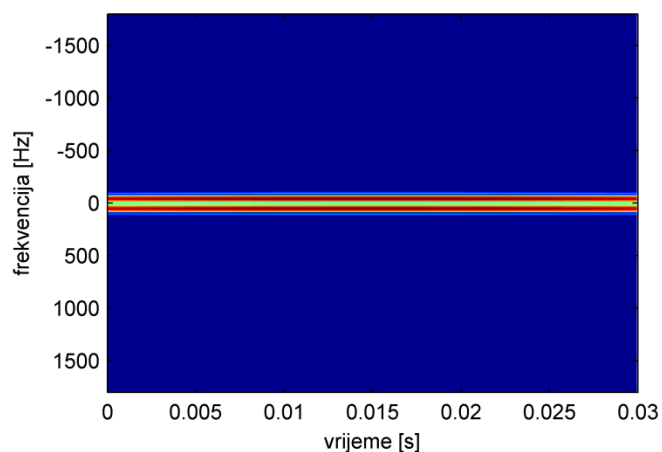


Slika 5.19 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod dužine 30 km

Sa slika 5.17-5.19 vidi se da i u ovom slučaju postoji dominantna komponenta učestanosti 50 Hz, konstantne amplitude, koja je po fazi suprotna naponu izvora. U posmatranom signalima dolazi i do prisustva viših komponenti frekvencije (982.66 Hz), ali je njihova amplituda zanemarljiva u poređenju sa dominantnom komponentom.

Analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, urađena u cilju provjere rezultata dobijenih EMD metodom, prikazana je na slici 5.20.

Kao i u prethodnim slučajevima, dobijeni rezultat (49.4 Hz) potvrđuje dominaciju osnovne komponente učestanosti kod nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 30 km u jednofaznom zemljospoju.



Slika 5.20 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 30 km u jednofaznom zemljospoju

Na osnovu rezultata dobijenih primjenom EMD i STFT metoda može se uočiti da nulta komponenta napona na kraju neopterećenog voda koji je u jednofaznom kratkom spoju, u procesu njegovog uključenja, sadrži komponentu frekvencije 50 Hz. Ova komponenta, koja ima konstantnu vrijednost amplitude je dominantna u odnosu na ostale i po fazi je suprotna naponu generatora. Treba istaći i da vrijednost amplitude zavisi od pozicije mjesta kvara, kao i da tokom vremenskog perioda u kome se posmatrani proces uključenja odvija ne dolazi do njenog slabljenja. Tokom prelaznog procesa mogu se uočiti i komponente srednjih i visokih učestanosti, ali je njihova amplituda veoma mala u poređenju sa komponentom učestanosti 50 Hz, i veoma brzo dolazi do njihovog prigušenja.

Navedeni zaključak važi za vod proizvoljne dužine, nezavisno od mjesta nastanka zemljospoja.

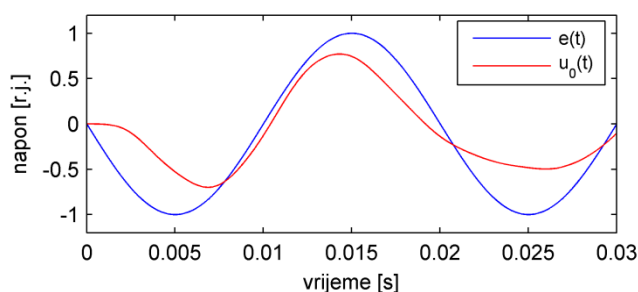
5.3 Karakteristike nulte komponenta napona na kraju neopterećenog voda u slučaju dvofaznog zemljospoja

U trećem poglavlju (3.3) dobijen je matematički izraz (3.105) koji predstavlja vremenski oblik nulte komponente napona na kraju neopterećenog voda u dvofaznom zemljospoju u procesu njegovog uključanja. Izvedeni izraz obijen je pod pretpostavkom da su faze 'B' i 'C' zemljospoju, ali se isto razmatranje može primijeniti i za ostale kombinacije faza. Kao i u slučaju jednofaznog zemljospoja, iz navedenog izraza uočavai se da nulta komponenta napona i u ovom slučaju ima karakterističan oblik, pa je stoga pogodna za automatsku detekciju prisustva dvofaznog zemljospoja u proizvoljnoj tački voda u trenutku njegovog uključanja. Izraz je dobijen pod pretpostavkom da je do pojave jednofaznog zemljospoja došlo na fazi A.

Kao i u poglavlju 5.2, za dalju analizu odabrani su, kao reprezentativni, oblici nulte komponente napona u slučajevima uključanja dugog voda (500 km) i kratkog voda (30 km), sa podacima datim u tabeli 3.6, u dvofaznom zemljospoju.

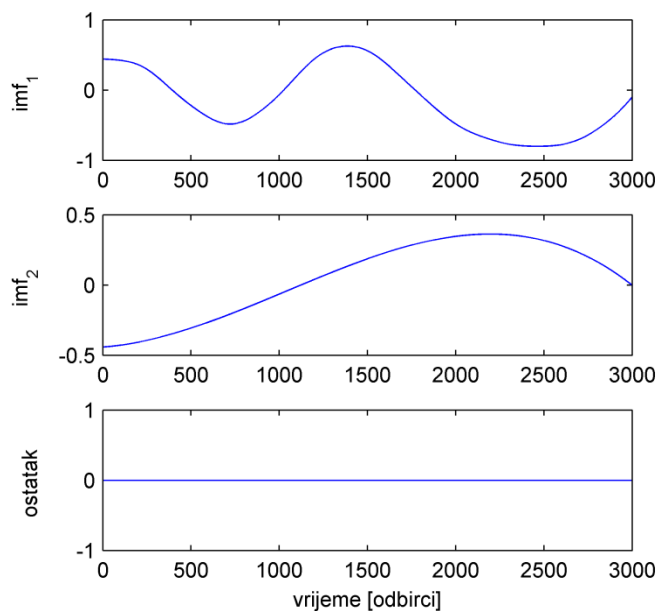
Kako bi se omogućila analiza uticaja pozicije kvara na oblik nulte komponente napona na kraju neopterećenog voda u dvofaznom zemljospoju u procesu njegovog uključanja, posmatrane su dvije karakteristične situacije: prisustvo zemljospoja na kraju voda i na početku voda, koje su prikazane slikama 5.21 i 5.25 respektivno.

Na slici 5.21 prezentovana je nulta komponenta napona u slučaju uključanja neopterećenog voda dužine 500km, u tački na kraju voda. Vod je u dvofaznom zemljospoju, a tačka kvara je na kraju voda.

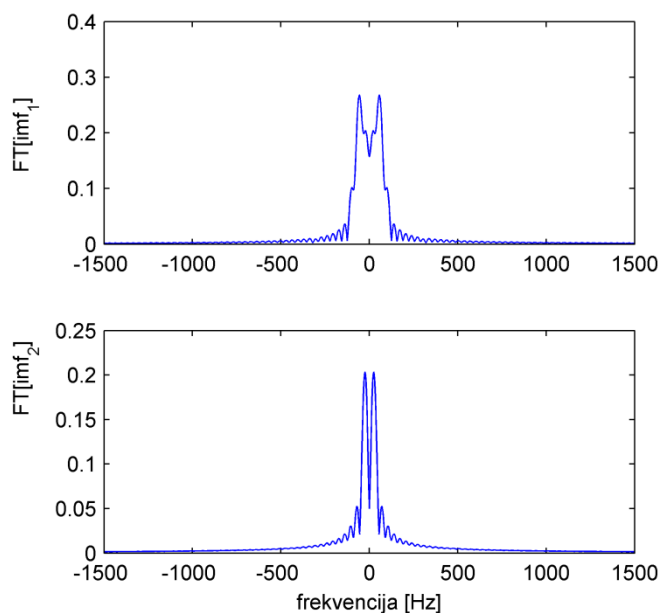


Slika 5.21 Nulta komponenta napona pri uključanju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju na kraju voda

Naponski signal sa slike 5.21 analiziran je pomoću EMD metoda. Na slici 5.22 prikazana je dekompozicija prikazanog signala na prirodne sastavne funkcije, dok je izdvajanje odgovarajućih vrijednosti frekvencija predstavljeno slikom 5.23.



Slika 5.22 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju u njegovoj krajnjoj tački predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija

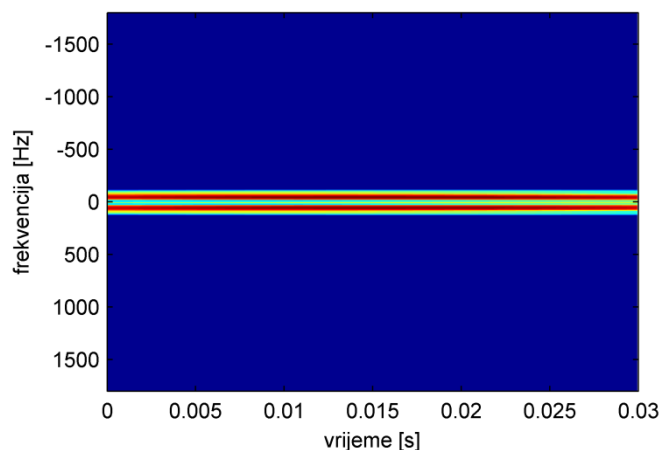


Slika 5.23 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija (kvar je na kraju voda)

Iz rezultata primjene EMD metode na posmatrani signal vidi se da nulta komponenta napona prilikom uključenja voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju

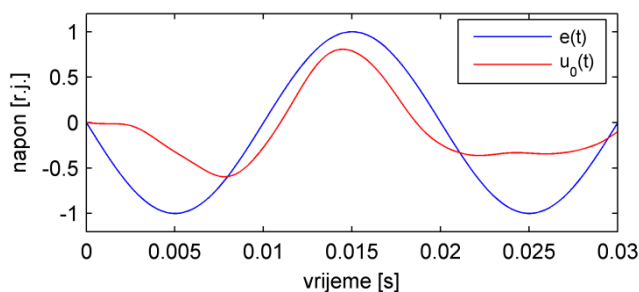
u njegovoj krajnjoj tački sadrži komponentu frekvencije 50 Hz, koja je dominantna, konstantne amplitude, i po fazi poklapa sa naponom generatora.

Izvršena je i provjera dobijenih rezultata, odnosno analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, što prikazuje slika 5.24, kojom je takođe dobijena frekvencija koja čija se vrijednost poklapa sa komponentom osnovne učestanosti.

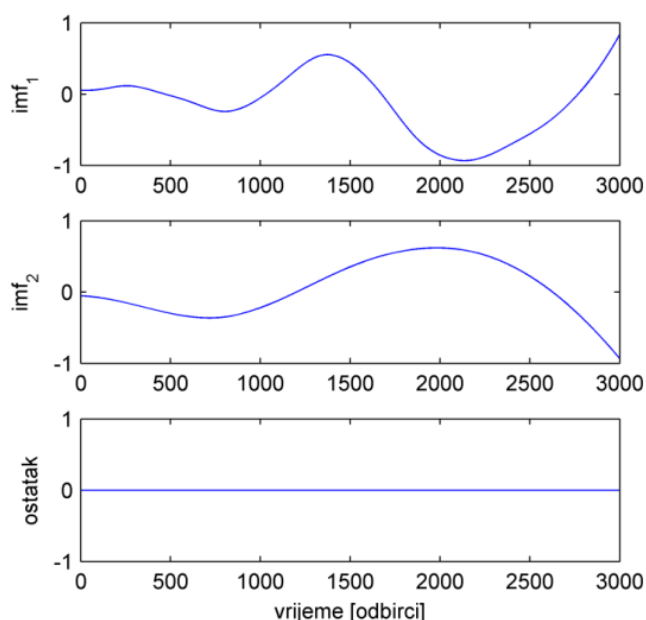


Slika 5.24 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju na kraju voda

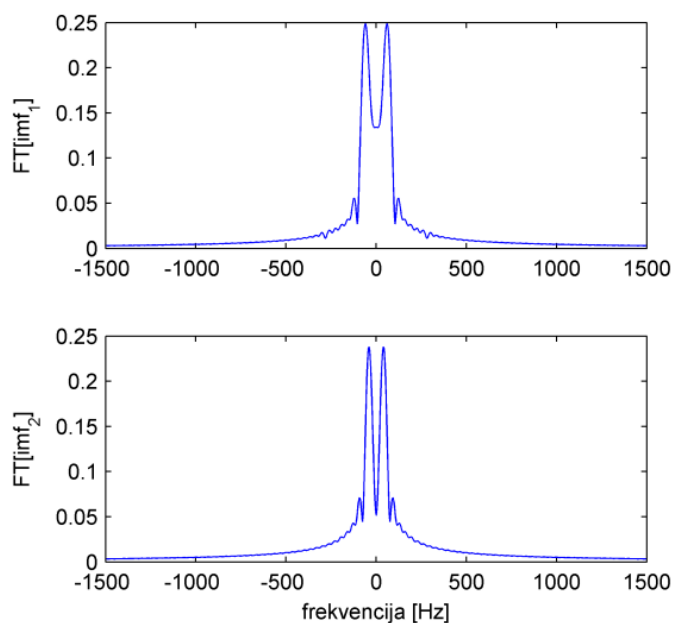
Na slici 5.25 prikazana je nulta komponenta napona u slučaju uključenja neopterećenog voda dužine 500km za slučaj kada je vod je u dvofaznom zemljospoju, a tačka kvara je na početku voda. Kao i u prethodnom slučaju, u okviru primjene EMD metode urađena je dekompozicija posmatranog signala na odgovarajuće IMF-ove, što je prikazano slikom 5.26, dok slika 5.27 prikazuje određivanje njihovih frekvencija.



Slika 5.25 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju na pocetku voda



Slika 5.26 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju u njegovoj početnoj tački predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija

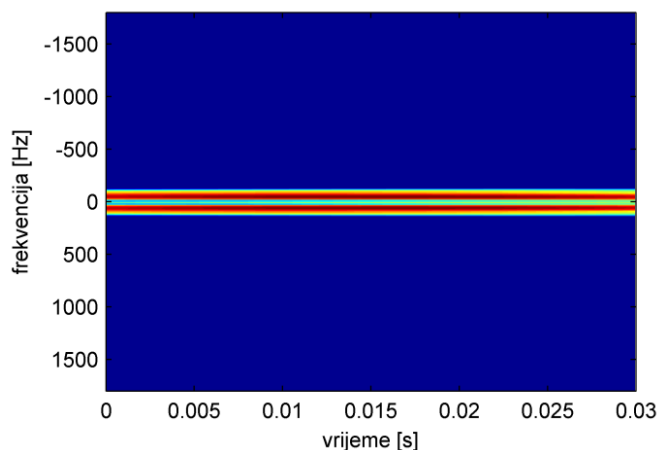


Slika 5.27 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod (kvar je na početku voda)

I u ovom slučaju, primjena EMD metode na posmatrani signal dovodi do istog zaključka, odnosno da nulta komponenta napona prilikom uključenja voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju u njegovoj početnoj tački sadrži dominantnu komponentu frekvencije od 50 Hz, konstantne amplitude (ali ne iste kao u prethodnom slučaju) koja se po fazi poklapa sa naponom generatora. Iz navedenog razmatranja slijedi da pozicija

kvara u slučaju dvofaznog zemljospoja ima uticaj samo na amplitudu komponente frekvencije 50 Hz.

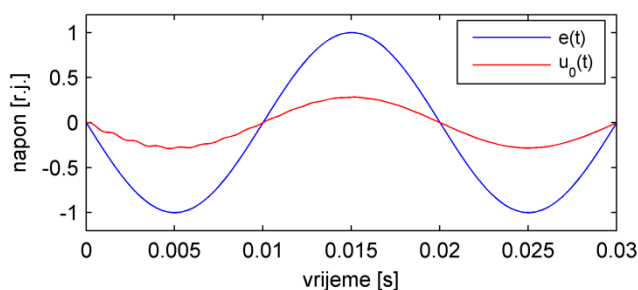
Na slici 5.28 prezentovana je analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, kojom je dobijena frekvencija vrijednosti 50 Hz.



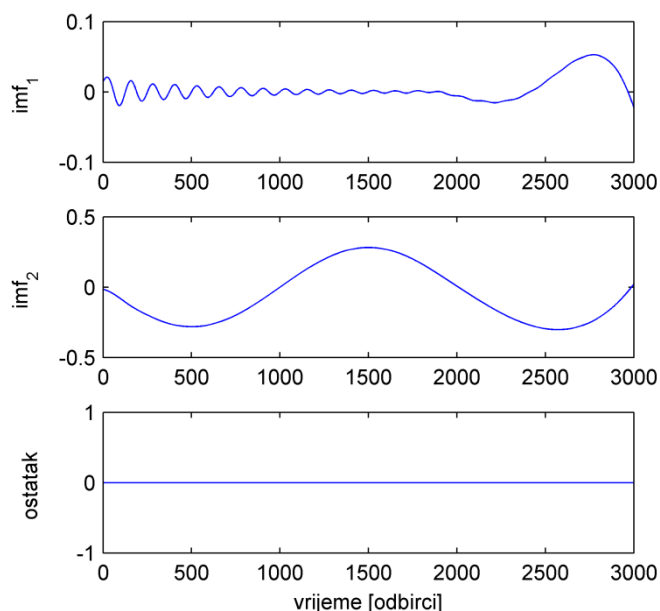
Slika 5.28 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 500 km u dvofaznom zemljospoju na početku voda

Kako bi se potvrdilo da navedeno razmatranje važi u slučaju voda bilo koje dužine, posmatran je i naponski signal pri uključenju neopterećenog voda dužine 30 km koji je u dvofaznom zemljospoju.

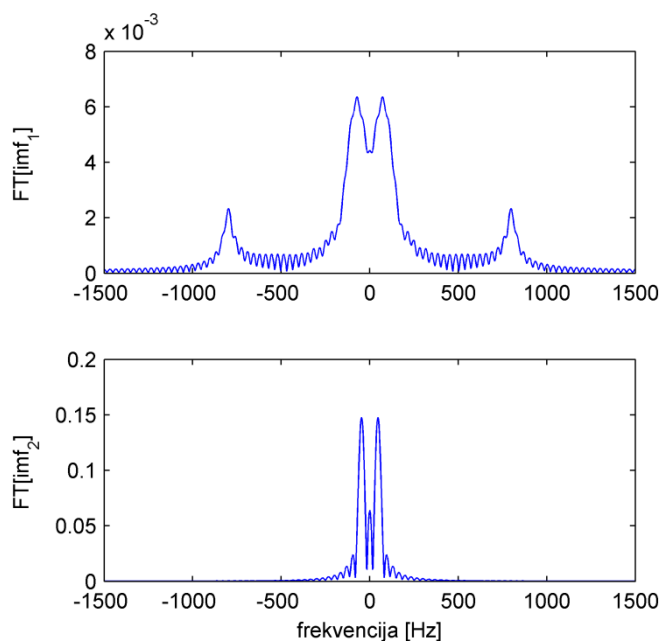
Na slici 5.29 prikazana je nulta komponenta napona u slučaju uključenja neopterećenog voda dužine 30 km. Vod je u dvofaznom zemljospoju, a tačka kvara je na kraju voda. Primjena EMD metoda na posmatrani signal data je slikama 5.30 i 5.31.



Slika 5. 29 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 30 km u dvofaznom zemljospoju na kraju voda



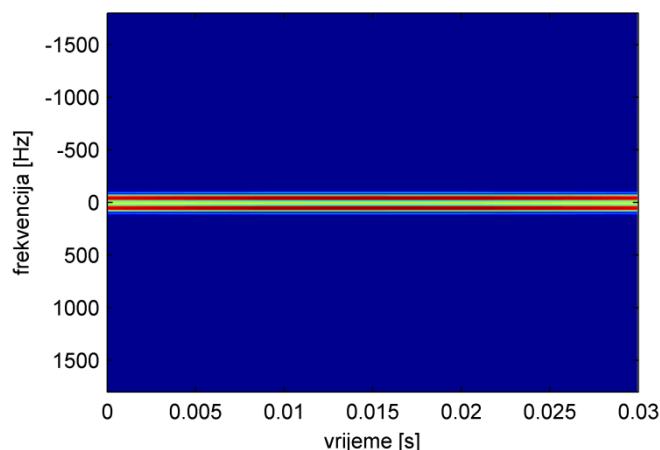
Slika 5.30 Nulta komponenta napona pri uključenju voda dužine 30 km u dvofaznom zemljospoju predstavljena preko prirodnih sastavnih funkcija



Slika 5.31 Procjena frekvencija prirodnih sastavnih funkcija za vod

Sa slika 5.29-5.31 može se jasno registrovati postojanje dominantne frekventne komponente osnovne učestanosti, koja se po fazi poklapa sa naponom generatora. Takođe se uočava prisustvo harmonijske komponente od 802.5 Hz, čija je amplituda znatno manja i koja se nakon određenog vremena potpuno gubi usled prigušenja.

Izvršena je i analiza posmatranog signala korišćenjem STFT metode, što prikazuje slika 5.32. Rezultat ove analize, kao i u prethodnim slučajevima, potvrđuje prisustvo komponente frekvencije vrijednosti 50 Hz u harmonijskom spektru analiziranog signala.



Slika 5.32 STFT analiza nulte komponente napona pri uključenju voda dužine 30 km u dvofaznom zemljospoju

Na osnovu rezultata dobijenih primjenom EMD i STFT metoda može se uočiti da nulta komponenta napona na kraju neopterećenog voda koji je u dvofaznom kratkom spoju, u procesu njegovog uključenja u svom harmonijskom spektru sadrži komponentu frekvencije 50 Hz, koja ima konstantnu vrijednost amplitude, dominantna je u odnosu na ostale komponente i po fazi jednaka sa fazom napona generatora. Kao i u slučaju jednofaznog zemljospoja, pozicija mjesta kvara ne utiče na vrijednost ove frekventne komponente, već samo na njenu amplitudu.

Neophodno je, u cilju daljeg razvijanja metoda za određivanje režima rada neopterećenog voda u procesu njegovog uključenja, naglasiti da je dominantna frekventna komponenta u slučaju jednofaznog zemljospoja po fazi suprotna naponu generatora, a kod postojanja dvofaznog zemljospoja njihove faze se poklapaju.

5.4 Karakteristike nulte komponenta napona na kraju neopterećenog voda u slučaju trofaznog zemljospoja

Trofazni zemljospoj spada u simetrične vrste kvara. Prilikom uključanja neopterećenog voda koji se nalazi u trofaznom zemljospoju, nulta komponenta napona u tački na kraju voda je jednaka nuli.

5.5 Metod razvijen za određivanje režima rada neopterećenog voda i klasifikaciju poremećaja

Nakon dobijenih zaključaka o karakteristikama nulte komponente naponskog signala voda čije se uključanje vrši, a koji je ili u normalnom radnom režimu ili režimu jednofaznog, dvofaznog ili trofaznog zemljospoja, može se pristupiti utvrđivanju metoda za detekciju i klasifikaciju radnog stanja.

Naime, iz izvedenih zaključaka proizilazi da u svim navedenim slučajevima nulta komponenta napona na kraju neopterećenog voda u procesu njegovog uključanja ima precizno definisane karakteristike. Najznačajnija svojstva su sadržaj njenog harmonijskog spektra, karakteristika amplitude dominantne učestanosti u spektru, i odnos njenog faznog stava u odnosu na fazni stav napona napajanja. Shodno tome, pokazuje se da su nabrojane karakteristike veoma pogodne za razvoj kriterijuma za detekciju i klasifikaciju u novom modelu.

Da bi se klasifikacija mogla vršiti automatski, na osnovu samo jednog pokazatelja, napravljen je model za klasifikaciju oblika:

$$K = \frac{1}{t_{kr}} \int_0^{t_{kr}} u_0(t) \bullet e(t) dt \quad (5.1)$$

koji je pogodan za dobijanje srednje vrijednosti promjene na posmatranom intervalu, gdje je:

K - vrijednost klasifikatora,

$u_0(t)$ - vremenski oblik nulte komponente napona na kraju voda,

$e(t)$ - elektromotorna sila generatora,

t_{kr} - vremenski interval u kome se posmatra proces uključanja

Model definisan na ovaj način omogućava uvažavanje na samo amplitude nulte komponente napona, već uključuje i odnos njenog faznog stava u poređenju sa faznim stavom napona napajanja.

Uvažavajući svojstva nulte komponente napona, istaknuta u poglavljima 5.1-5.4, različiti radni režimi u trenutku uključanja neopterećenog voda odgovaraće različitim vrijednostima klasifikatora K , pri čemu je vrijednosti dobijenih rezultata moguće klasifikovati i tumačiti na sledeći način, prikazan u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Vrijednosti klasifikatora K za pojedine radne režime

Vrijednost klasifikatora K	Režim rada
$ K \leq 0.01$	Normalni režim
$K < 0, K > 0.01$	Jednofazni zemljospoj
$K > 0, K > 0.01$	Dvofazni zemljospoj
$K = 0$	Trofazni zemljospoj

Izbor vrijednosti klasifikatora predložen tabelom 5.1 proizilazi iz sledećeg razmatranja:

Kao što je već istaknuto u poglavlju 5.1, koje se odnosi na uključenje neopterećenog voda u normalnom režimu rada, odnosno kada nema postojanja kvara u momentu uključanja, uočava se pojava komponenti frekvencije većih od 50 Hz u harmonijskom spektru nulte komponente napona na kraju voda. Treba naglasiti da je od velikog značaja činjenica da dolazi njenog jasnog slabljenja usled prigušenja u veoma kratkom vremenskom intervalu. Stoga je, u ovom slučaju, površina u XOY koordinatnom sistemu, označena kao $|K|$, skoro zanemarljive vrijednosti. U cilju lakše praktične primjene, u modelu je definisana vrijednost od 0.01 kao preporučena granica za ovaj slučaj.

Za slučaj postojanja jednofaznog zemljospoja na neopterećenom vodu u trenutku uključanja, koji je obrađen u poglavlju 5.2, za klasifikator K važi: $K < 0, |K| > 0.01$. Prvi uslov se odnosi na znak, odnosno uvažava se zaključak da je dominantna komponenta frekvencije (vrijednosti 50 Hz) u spektru nulte komponente napona po fazi suprotna naponu izvora. Drugi uslov proizilazi iz činjenice da je vrijednost amplitude ove

dominantne komponente skoro konstantna i nije izložena slabljenju usled prigušenja. Zato je vrijednost klasifikatora znatno veća nego u prethodnom slučaju.

Na sličan način se može razmatrati i slučaj postojanja dvofaznog zemljospoja na vodu u trenutku njegovog uključenja, koji je prezentovan u poglavlju 5.3. U ovom slučaju važi: $K > 0$, $|K| > 0.01$, pri čemu je prvi uslov posledica poklapanja faze dominantne frekventne komponente u spektru nulte komponente napona na kraju voda i faze napona izvora.

U slučaju postojanja trofaznog zemljospoja na neopterećenom vodu u trenutku uključenja, vrijednost klasifikatora K je jednaka nuli, iz razloga prikazanih u poglavlju 5.4.

Treba istaći i da parametar t_{kr} ima značajan uticaj na tačnost razvijenog modela. On zapravo predstavlja vremenski interval u kome model vrši određivanje i klasifikaciju radnog režima u trenutku uključenja voda. Ovo znači da bi smanjenje intervala t_{kr} povećalo brzinu modela, odnosno njegovu konkurentnost. Međutim, preveliko smanjenje ovog parametra ugrozilo bi tačnost modela.

Analiza nulte komponente napona u slučaju uključenja voda u normalnom radnom režimu pokazala je da postoji njeno značajno slabljenje usled prigušenja za vrijeme t_{kr} . Ovo međutim nije slučaj ako se uključenje vrši u uslovima postojanja jednofaznog ili dvofaznog zemljospoja u trenutku uključenja voda. Dolazi se do zaključka da previše kratak vremenski interval t_{kr} ne bi bio dovoljan za završetak procesa prigušenja nulte komponente prilikom uključenja voda u normalnom režimu rada. Stoga bi došlo do nerealno visokih vrijednosti klasifikatora K za ovaj slučaj, odnosno model ne bi bio sposoban da razlikuje uključenje pod normalnim uslovima od onog sa prisustvom kvara. Sprovedene simulacije potvrđuju da optimalna vrijednost za t_{kr} iznosi 20 ms.

Predloženi model prezentovan je na slučaju vodova dužina $l=500$ km i $l=30$ km, za slučajeve postojanja kvara na početku i na kraju voda. U cilju provjere njegove validnosti, ispitani su i druge mogući situacije, odnosno različite dužine vodova i pozicije kvara.

S obzirom na postojeću podjelu vodova prema dužini na kratke vodove (dužine manje od 80 km), srednje (dužine između 80 km i 240 km) i duge vodove (dužine veće od 240 km) [25], analizirani su vodovi sledećih karakteristika (tabela 5.2).

Tabela 5.2 Parametri analiziranih vodova

l [km]	X_e [Ω]	X_{e0} [Ω]	R_e [Ω]	R_{e0} [Ω]	R [Ω]	R_0 [Ω]	Z_C [Ω]	Z_{C0} [Ω]
10	63	16	4.4	0.7	0.33	0.48	370	740
30	63	16	4.4	0.7	0.33	0.48	370	740
50	63	16	4.4	0.7	0.33	0.48	370	740
100	201	91	4.4	0.7	0.069	0.219	321	640
500	100	70	8	7	0.021	0.170	273	600.6

Tabelom 5.3 sumirani su rezultati primjene predloženog klasifikacionog modela, za različite karakteristične dužine vodova i radne režime (normalni režim i režim poremećaja, odnosno zemljospoja). Za režim kvara razmatran je zemljospoj na početku, sredini i kraju svih analiziranih vodova.

Tabela 5.3 Vrijednosti klasifikatora K za karakteristične dužine vodova i radne režime

l [km]	Vrsta radnog režima							
	Normalni režim	Jednofazni zemljospoj			Dvofazni zemljospoj			Trofazni zemljospoj
		Pocetak voda	Sredina voda	Kraj voda	Pocetak voda	Sredina voda	Kraj voda	
10	8.85×10^{-5}	-0.0567	-0.0705	-0.0827	0.0847	0.0992	0.1107	0
30	-5.79×10^{-6}	-0.0574	-0.0943	-0.1210	0.0856	0.1207	0.1406	0
50	-2.35×10^{-5}	-0.0582	-0.1136	-0.1477	0.0865	0.1357	0.1574	0
100	-5.46×10^{-5}	-0.0602	-0.1499	-0.1898	0.0892	0.1597	0.1798	0
500	-3.4×10^{-3}	-0.220	-0.364	-0.389	0.245	0.295	0.296	0

Iz dobijenih rezultata, prikazanih tabelom 5.3, vidi se da K za slučaj normalnih radnih uslova u trenutku uključenja, može imati i pozitivne i negativne vrijednosti, ali su one uvijek veoma male. Ovo važi za bilo koju dužinu voda. Nasuprot tome, K je isključivo negativno za slučaj jednofaznog zemljospoja, a pozitivno za slučaj dvofaznog zemljospoja. Takođe, vrijednosti K su znatno veće nego u slučaju kad kvar ne postoji. Može se uočiti i da su navedeni zaključci validni nezavisno od lokacije kvara.

Odrađena analiza pokazala je da su svi dobijeni rezultati u skladu sa zaključcima izvedenim u poglavljima 5.1-5.5, čime se potvrđuje efikasnost i validnost predloženog modela. Dodatnu prednost razvijenog modela predstavlja njegova velika brzina, odnosno

podatak da vrijeme neophodno za pravilnu detekciju i klasifikaciju poremećaja iznosi svega 20 ms, što je od izuzetne važnosti kada su u pitanju ovakve vrste kvara.

Treba naglasiti da je predloženi metod, nasuprot komplikovanom matematičkom modelu korišćenom pri njegovj izradi, veoma brz i jednostavan za primjenu.

POGLAVLJE 6

Metod za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja u momentu uključenja voda

Trend porasta potrošnje električne energije, koji je u današnje vrijeme veoma izražen, praćen je ne samo povećanjem instalisanih proizvodnih kapaciteta, već i sve strožijim zahtjevima koji se odnose na poboljšanje kvaliteta energije predate potrošačima.

Poznato je da pojava kvarova na prenosnim i distributivnim vodovima može dovesti do prekida u napajanju električnom energijom, što pored negativnih posljedica na osjetljive potrošače, dovodi do velikih gubitaka kompanijama koje se bave proizvodnjom i distribucijom električne energije [71]. Stoga se problemima koji se odnose na zaštitu od pojave kvara, kao i njegovo otklanjanje u što kraćem vremenskom intervalu, u novije vrijeme posvećuje velika pažnja. U tom cilju posebno je značajna precizna i brza lokalizacija kvara na nadzemnim vodovima, jer se na taj način znatno skraćuje vrijeme otklanjanja smetnji i uspostavljanja normalnog radnog režima.

U dostupnoj literaturi uobičajeno se koriste dvije grupe metoda koje se bave problematikom lokalizacije kvarova nastalih na nadzemnim elektroenergetskim vodovima [72,73]. To su:

- Metode zasnovane na mjerenju impedanse (IMM)
- Metode koje su zasnovane na putujućim talasima (TWM)

Metode bazirane na mjerenju impedanse pokazuju veliku zavisnost od impedanse kvara, otpora uzemljenja i nehomogenosti parametara voda pa stoga kod njihove primjene može doći do pojave velikih grešaka [74-77].

Metode zasnovane na putujućim talasima pokazale su se značajno pouzdanijim i daju rezultate sa mnogo većom tačnošću. One se baziraju na snimanju upadnih i

reflektovanih putujućih talasa u krajnjim tačkama voda, pa je stoga za njihovu primjenu od presudnog značaja oprema za akviziciju podataka koja se odlikuje velikom brzinom [78-80].

Uzimajući broj nadgledanih krajnjih tačaka voda kao kriterijum, postoje metode za lokalizaciju kvara bazirane ne putujućim talasima koje prate jednu ili dvije krajnje tačke voda. Prvi pristup odlikuje niža cijena, ali i manja tačnost rezultata odnosu na drugi, koji zahtijeva dvije jedinice za akviziciju podataka i komunikacionu vezu kako bi se dobile informacije sa oba kraja voda. Generalno, može se reći da su TWM veoma pogodna za lokalizaciju tačke kvara na veoma dugim i homogenim elektroenergetskim vodovima.

Treba istaći da i metode bazirane na putujućim talasima pokazuju određene nedostatke. Pokazuje se da tačnost ovog tipa metoda umnogome zavisi od korišćene opreme za akviziciju podataka. Naime, primjena uređaja sa većom frekvencijom uzorkovanja signala omogućava veću tačnost metoda, ali je praćena povećanjem cijene koštanja sistema. Takođe, prilikom korišćenja proračuna putem TWM pretpostavljena je konstantna brzina prostiranja talasa po vodu, kao i homogenost njegovih parametara. Ovakva pretpostavka je nerealna, ako se ima u vidu velika dužina elektroenergetskih vodova, pa dolazi do različitih uticaja (neravnomjerno rastojanje pojedinih faza ima uticaj na induktivnost, temperatura uticaj na otpornost, javljaju se padovi napona i slično) [81].

U cilju prevazilaženja nedostataka IMM i TWM, predložen je i takozvani hibridni metod [82], koji predstavlja kombinaciju jednostavnosti IMM i tačnosti TWM.

Takođe, razvijen je i novi pristup zasnovan na beskontaktnom mjerenju magnetnog polja, koji podrazumijeva primjenu magnetnih senzora visoke osjetljivosti za mjerenje tranzijentnih struja [83]. Za navedeni metod nije potrebno poznavanje parametara voda, kao ni postavljanje opreme za akviziciju podataka na njegovim krajevima. Senzori se smiještaju na stub, i mora postojati komunikaciona veza između njih i centra za obradu podataka. Iako je ovaj metod veoma efikasan a njegova cijena niska, potrebno ga je dodatno poboljšati da bi se omogućila šira primjena u praksi. Naročito je bitno izvršiti poboljšanja koja se odnose na izbjegavanje štetnog uticaja magnetnih polja koja ne potiču od razmatranog voda. Takođe, ima prostora za dalja istraživanja kako bi se došlo do optimalne konfiguracije korišćenih senzora [84, 85].

Pored navedenih grupa metoda, postoje i takozvane smart metode za određivanje lokacije kvara, koje koriste podatke prikupljene pomoću različitih ineligentnih elektronskih uređaja, instaliranih u elektroenergetskom sistemu [86]. Složenost i velika cijena uređaja predstavljaju glavne nedostatke ovog metoda.

Primjena metoda digitalne obrade signala pri analizi prelaznih procesa daje potpuniji uvid u njihove karakteristike i omogućava izdvajanje određenih svojstava na osnovu kojih je moguće izvršiti detekciju i lokalizaciju kvara [87-91]. Najčešće primjenjivani metodi su Furijeova transformacija (FT), kratkotrajna Furijeova transformacija (STFT), Kalmanov filter, S-transformacija i empirijski metod dekompozicije (EMD). Ovi metodi mogu se koristiti samostalno, ali je u novije vrijeme sve više prisutna njihova kombinacija sa nekim od metoda vještačke inteligencije, kao što su neuralne mreže, fazi logika i genetski algoritmi [92-96].

Treba istaći da se sve navedene metode odnose na lokalizaciju mjesta kvara na vodu koji je u trenutku nastanka zemljospoja bio u stacionarnom stanju, odnosno u normalnom radnom režimu, kao i da se u tom slučaju detekcija kvara uglavnom zasniva na registrovanju prelaznog režima do kojeg dolazi pri njegovom nastanku.

Nasuprot velikom broju dostupnih naučnih radova i predloženih metoda koji se bave detekcijom i lokalizacijom kvarova nastalih na vodovima u normalnom radnom režimu, situacija je znatno drugačija kada se razmatra prisustvo kvara na vodu u trenutku njegovog uključenja. Kao što je poznato, prilikom samog uključenja voda dolazi do prelaznog procesa, koji u određenim slučajevima može biti uzrok veoma visokih prenapona. Postojanje zemljospoja u trenutku uključenja može dodatno povećati njihovu vrijednost što za posledicu može imati ugrožavanje normalnog funkcionisanja sistema i dovesti do oštećenja opreme. Stoga je od velikog značaja da se mjesto postojanja zemljospoja odredi sa što većom tačnošću, u cilju skraćivanja vremenskog perioda neophodnog za njegovo uklanjanje.

U ovom poglavlju prikazan je novi metod za procjenu mjesta nesimetričnog zemljospoja (jednofaznog ili dvofaznog) na neopterećenom nadzemnom vodu, koji je prisutan u momentu njegovog uključenja. Metod je baziran na analizi matematičkog modela naponskog signala u momentu uključenja voda i primjeni Empirijskog metoda dekompozicije za određivanje njegovog harmonijskog spektra.

Pogodan je za nadzemne vodove čija dužina ne prelazi 80 km.

6.1 Matematički model za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja na vodu u trenutku njegovog uključenja

6.1.1 Model za lokalizaciju jednofaznog zemljospoja

Na osnovu analize procesa uključenja neopterećenog voda uz postojanje jednofaznog zemljospoja sprovedene u trećem poglavlju (3.2), izveden je matematički model koji opisuje vremenski oblik napona na zdravim fazama voda tokom nastalog prelaznog režima, dat jednačinama (3.98) i (3.99).

Kao što je istaknuto u sprovedenoj analizi, ključnu ulogu za dobijanje sopstvenih frekvencija oscilovanja sistema ima transcendentna jednačina (3.69), koja je funkcija kako koeficijenta v_k (koeficijenti koji, pomnoženi osnovnom frekvencijom sistema od 50 Hz daju vrijednosti frekvencija za α i 0 komponente napona), tako i udaljenosti tačke kvara od početka voda d . Naime, uvrštavanjem uslova (3.70-3.75) u (3.69), dobija se:

$$\begin{aligned} & 2Z_C (Z_{C0} \cos v_k \lambda_0 - X_{e0} v_k \sin v_k \lambda_0) (Z_C \sin v_k \omega d \sqrt{LC} + X_e v_k \cos v_k \omega d \sqrt{LC}) \cdot \\ & \cos v_k \omega (l-d) \sqrt{LC} + Z_{C0} (Z_{C0} \sin v_k \omega d \sqrt{L_0 C_0} + X_{e0} v_k \cos v_k \omega d \sqrt{L_0 C_0}) \cdot \\ & (Z_C \cos v_k \lambda - X_e v_k \sin v_k \lambda) \cos v_k \omega (l-d) \sqrt{L_0 C_0} = 0, \end{aligned} \quad (6.1)$$

Stoga se navedena jednačina može iskoristiti i za lokalizaciju jednofaznog zemljospoja, odnosno proračunavanje udaljenosti tačke kvara od početka voda (d), uz poznavanje vrijednosti sopstvenih učestanosti oscilovanja i parametara sistema.

Kako je precizna procjena mjesta zemljospoja d pomoću predloženog modela direktno povezana sa tačnošću procjene frekvencije analiziranih naponskih signala, i sam proces određivanja frekvencije je od izuzetne važnosti u preporučenom modelu.

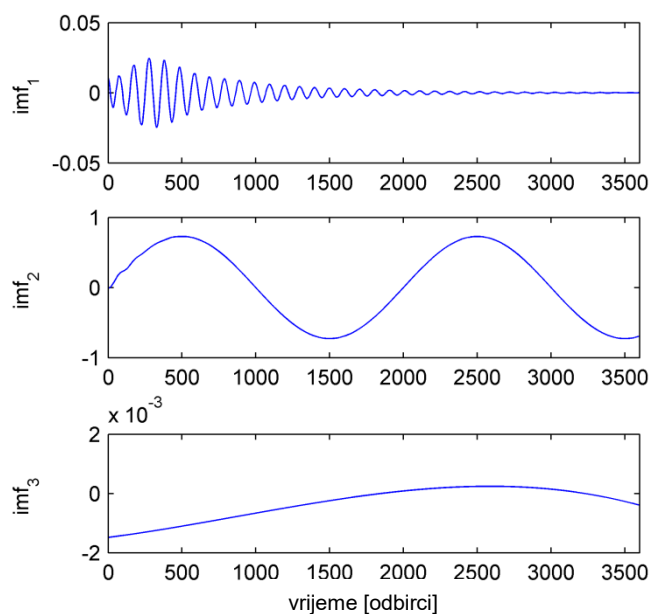
U razvijenom modelu, ove učestanosti se dobijaju primjenom EMD metoda na naponske signale u krajnjim tačkama zdravih faza analiziranog voda.

Analizirani su neopterećeni vazdušni vodovi dužine 10 km, 30 km, 50 km i 80 km.

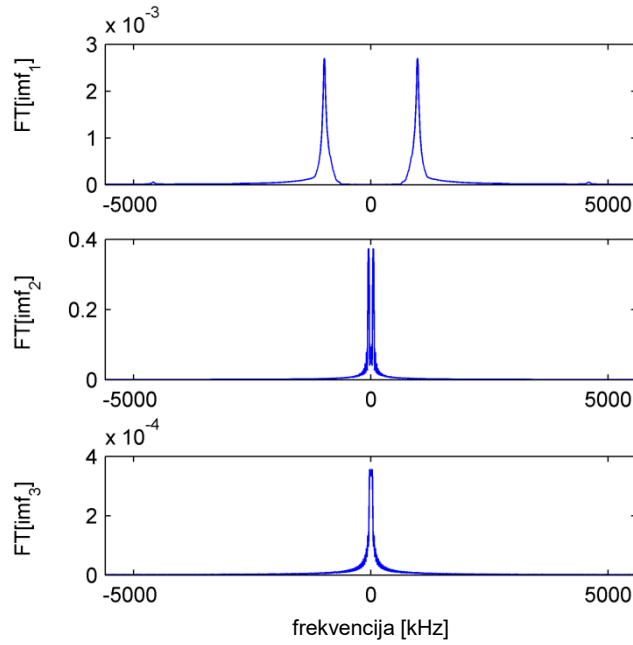
6.1.2 Određivanje frekvencija EMD metodom za slučaj jednofaznog zemljospoja

U cilju demonstracije i pojašnjenja urađenog metoda prikazana je analiza voda dužine $l = 30$ km sa parametrima datim u tabeli 3.6, u jednofaznom zemljospoju na fazi A, čiji su naponski signali na zdravim fazama prikazani na slici 3.11. Izdvajanje odgovarajućih vrijednosti frekvencija izvršeno je primjenom EMD metoda. Radi potvrđivanja tačnosti korišćenog metoda, procijenjene vrijednosti su upoređene sa analitički dobijenim rezultatima.

Na slici 6.1 prikazana je dekompozicija navedenog naponskog signala na prirodne sastavne funkcije, a na slici 6.2 procjena odgovarajućih frekvencija za svaku od izdvojenih IMF-ova.



Slika 6.1 Dekompozicija zbira naponskih signala na fazama “B i C” na IMF-ove



Slika 6.2 Frekvencijski spektar odgovarajućih IMF-ova

Kada je riječ o slikama 6.1 i 6.2, treba istaći da je EMD primijenjen na zbir naponskih signala na fazama B i C. Razlog za takav pristup leži u tome da se koeficijenti v_k u (6.1) odnose samo na frekvencije α i 0 komponenti napona, što znači da ne uključuju frekvencije za β komponentu. Primjena EMD na zasebne signale $u_B(t)$ i $u_C(t)$ rezultirala bi izdvajanjem frekvencija za sve tri (α , β i 0) naponske komponente, pa bi njihovom zamjenom u (6.1) dobili nekorektne rezultate. Predloženi pristup, da se vrši dekompozicija zbira signala na fazama B i C, može se objasniti posmatranjem njihovog vremenskog oblika:

$$u_B(t) = u_0(t) - \frac{u_\alpha(t)}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta(t), \quad (6.2)$$

$$u_C(t) = u_0(t) - \frac{u_\alpha(t)}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta(t), \quad (6.3)$$

Očigledno je da sumiranjem naponskih signala $u_B(t)$ i $u_C(t)$ dolazi do eliminacije β komponente napona. (Treba naglasiti da je u slučaju jednofaznog zemljospoja na fazi B ili C dovoljno analizirati naponski signal na kraju faze A.)

U tabeli 6.1 upoređene su analitički izračunate vrijednosti frekvencija, i vrijednosti dobijene primjenom EMD metoda na sumu naponskih signala na krajevima

zdravih faza voda. Znak “–” označava da navedena vrijednost frekvencije nije detektovana EMD metodom.

Tabela 6.1 Poređenje vrijednosti frekvencija detektovanih primjenom EMD metoda i proračunom dobijenih vrijednosti u slučaju uključenja voda u jednofaznom zemljospoju

Poračunate frekvencije [Hz]	Procijenjene frekvencije [Hz]	Greška [%]
50.00	49.85	0.30
983.19	982.66	0.05
2671.59	-	-
4591.49	4589.84	0.03

Kao što se vidi iz tabele 6.1, prisustvo jednofaznog zemljospoja u procesu uključenja voda praćeno je pojavom viših komponenti frekvencije. Pokazuje se da EMD metoda daje veliku tačnost pri ekstrakciji harmonika, ali da ipak nije u stanju da izdvoji sve frekvencije dobijene analitički. Takođe, iz dobijenih rezultata može se uočiti da najniža sopstvena učestanost oscilovanja ima najveću amplitudu.

6.1.3 Model za lokalizaciju dvofaznog zemljospoja

Analizom energetizacije neopterećenog voda uz postojanje dvofaznog zemljospoja, koja je sprovedena u trećem poglavlju (3.3), izveden je matematički model koji opisuje vremenski oblik napona na zdravoj fazi voda tokom nastalog prelaznog procesa, dat jednačinom (3.109).

Iz sprovedene analize slijedi da ključnu ulogu za dobijanje sopstvenih frekvencija oscilovanja sistema u slučaju uključenja neopterećenog voda uz prisustvo dvofaznog zemljospoja ima transcendentna jednačina (3.108). Uvrštavanjem uslova (3.70-3.75) u (3.108), navedena jednačina dobija sledeći oblik:

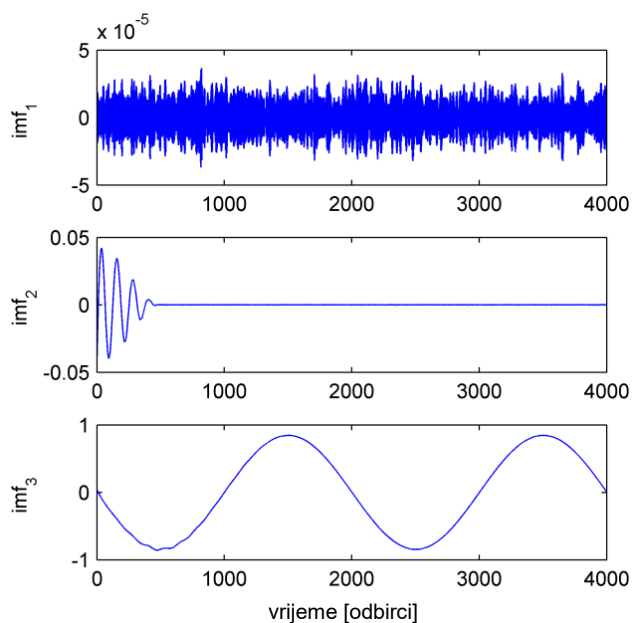
$$\begin{aligned}
 & Z_C (Z_{C0} \cos \nu_k \lambda_0 - X_{e0} \nu_k \sin \nu_k \lambda_0) (Z_C \sin \nu_k \omega d \sqrt{LC} + X_e \nu_k \cos \nu_k \omega d \sqrt{LC}) \cdot \\
 & \cos \nu_k \omega (l-d) \sqrt{LC} + 2Z_{C0} (Z_{C0} \sin \nu_k \omega d \sqrt{L_0 C_0} + X_{e0} \nu_k \cos \nu_k \omega d \sqrt{L_0 C_0}) \cdot \quad (6.4) \\
 & (Z_C \cos \nu_k \lambda - X_e \nu_k \sin \nu_k \lambda) \cos \nu_k \omega (l-d) \sqrt{L_0 C_0} = 0,
 \end{aligned}$$

Vidi se da je jednačina (6.4) funkcija rastojanja mjesta kvara od početka voda, i stoga se može iskoristiti za lokalizaciju dvofaznog zemljospoja, odnosno proračunavanje udaljenosti tačke kvara od početka voda (d), uz poznate vrijednosti sopstvenih učestanosti oscilovanja i parametara sistema.

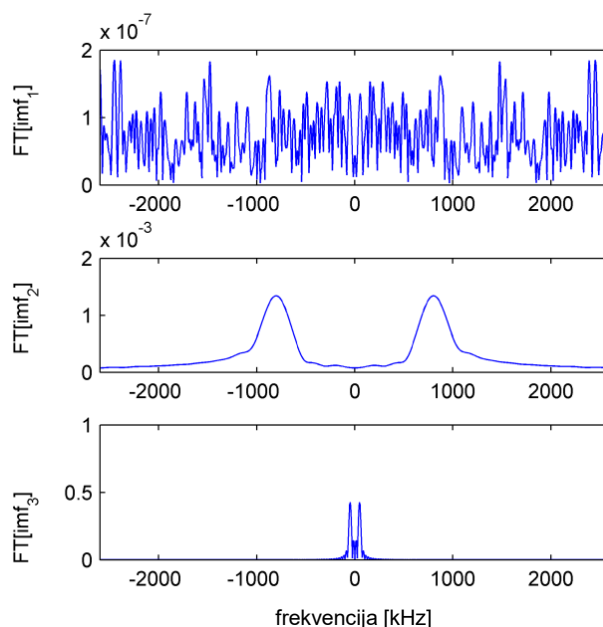
6.1.4 Određivanje frekvencija EMD metodom u slučaju dvofaznog zemljospoja

Kao i u slučaju jednofaznog zemljospoja, demonstracija metoda je izvršena na primjeru voda dužine $l = 30$ km sa parametrima datim u tabeli 3.6, u dvofaznom zemljospoju na fazama B i C, čiji je naponski signal na zdravoj fazi (A) prikazan na slici 3.19. Izdvajanje odgovarajućih vrijednosti frekvencija izvršeno je primjenom EMD metoda, a procijenjene vrijednosti su upoređene sa analitički dobijenim rezultatima.

Dekompozicija navedenog naponskog signala na prirodne sastavne funkcije prikazana je slikom 6.3, dok slika 6.4 prikazuje odgovarajuće frekventne komponente za izdvojene IMF-ove.



Slika 6.3 Dekompozicija naponskog signala na fazi “A” na IMF-ove



Slika 6.4 Frekvencijski spektar odgovarajućih IMF-ova

U tabeli 6.2 upoređene su analitički izračunate vrijednosti frekvencija, i vrijednosti dobijene primjenom EMD metoda na naponski signal na kraju zdrave faze voda.

Tabela 6.2 Poređenje vrijednosti frekvencija detektovanih primjenom EMD metoda i proračunom dobijenih vrijednosti u slučaju uključenja voda u dvofaznom zemljospoju

Poračunate frekvencije [Hz]	Procijenjene frekvencije [Hz]	Greška [%]
50.00	49.93	0.14
802.00	802.50	0.06
2670.00	2682.10	0.45
4849.00	-	-

Kao i u slučaju jednofaznog zemljospoja, prisustvo dvofaznog zemljospoja u procesu uključenja voda prati pojava viših komponenti frekvencije. EMD metoda i u ovom slučaju daje veliku tačnost pri ekstrakciji harmonika, ali takođe nisu izdvojene sve frekvencije dobijene analitički. Iz dobijenih rezultata može se uočiti da najniža sopstvena učestanost i u slučaju dvofaznog zemljospoja ima najveću amplitudu.

6.2 Primjena metoda za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja na vodu u trenutku njegovog uključenja

Za ispravnu primjenu razvijenog modela neophodno je poznavanje naponskih signala na kraju zdravih faza voda, kao i osnovnih parametara sistema.

Metod se može predstaviti sledećim algoritmom:

- I Primjena EMD metoda na odgovarajuće naponske signale, u cilju dobijanja vrijednosti frekvencija;
- II Procijenjene vrijednosti frekvencija se dijele sa osnovnom frekvencijom sistema, kako bi se dobili koeficijenti ν_k , koji se zatim uvrštavaju u jednačinu (6.1) u slučaju jednofaznog, odnosno u (6.4) za slučaj dvofaznog zemljospoja;
- III Rješavanje (6.1) ili (6.4) korišćenjem odgovarajućih kodova u MATLAB-u, u cilju dobijanja vrijednosti d .

Kada je riječ o drugom koraku algoritma neophodno je naglasiti da se primjenom EMD metoda dobija više od jedne izdvojene vrijednosti frekvencije (kao što se vidi iz rezultata prikazanih u Tab. 6.1 i Tab. 6.2). Može se postaviti pitanje koju od njih je najbolje upotrijebiti radi dobijanja ν_k koeficijenata. Pokazuje se da je u tu svrhu dovoljno iskoristiti samo jednu frekvenciju, i to onu koja je određena sa najvećom tačnošću. Kroz sprovedene simulacije zapaženo je da je spektralna komponenta sa najvećom amplitudon najčešće detektovana sa najvećom preciznošću. Ta frekvencija je generalno reda veličine od 1 KHz.

Ovakav pristup ne samo da doprinosi jednostavnosti preporučenog metoda, već ima i značajan uticaj na smanjenje ukupnih troškova sistema. Naime, EMD metodom se vrši dekompozicija naponskog signala koji se dobija pomoću instaliranog uređaja za snimanje, pa veća frekvencija uzorkovanja korišćenog uređaja rezultira većim kvalitetom analiziranog signala. Kvalitetniji signal predstavlja bolju osnovu za primjenu EMD metoda, posebno u opsegu većih vrijednosti frekvencija u spektru. Međutim, uređaji sa visokom vrijednostima uzorkovanja (200 KHz, 500 KHz ili više), imaju veoma visoku cijenu koštanja.

S obzirom na to da razvijeni metod koristi izdvojenu frekvenciju iz harmonijskog spektra analiziranog signala koja ima najveću amplitudu, i koja se

generalno nalazi u opsegu niskih frekvencija, dovoljna je primjena uređaja za snimanje frekvencija uzorkovanja između 10 KHz i 20 KHz.

U cilju procjene efikasnosti metoda izvršen je veliki broj simulacija, pri čemu dužina analiziranog voda varira od 10 km – 80 km, a pretpostavljena lokacija zemljospoja uzima vrijednosti od $d=l$, $d=0.6l$ i $d=0.3l$. Naponski signali, koji nastaju u procesu uključanja neopterećenog voda uz postojanje jednofaznog ili dvofaznog zemljospoja, simulirani su u MATLAB-u i dekomponovani primjenom EMD metoda.

Dobijene vrijednosti udaljenosti mjesta kvara od početka voda (d), kao i greške do kojih je došlo prilikom procjene, prikazane su u Tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Procjena tačnosti predloženog metoda

Dužina voda l [km]	Vrsta kvara					
	Jednofazni zemljospoj			Dvofazni zemljospoj		
	Lokacija kvara			Lokacija kvara		
	$d=l$	$d=0.6l$	$d=0.3l$	$d=l$	$d=0.6l$	$d=0.3l$
10	10.03 (0.30%)	6.03 (0.50%)	3.02 (0.66%)	9.93 (0.70%)	6.05 (0.83%)	3.01 (0.33%)
30	30.23 (0.76%)	18.15 (0.83%)	9.02 (0.22%)	29.78 (0.73%)	18.02 (0.11%)	9.05 (0.55%)
50	49.69 (0.62%)	30.18 (0.60%)	14.86 (0.93%)	49.60 (0.80%)	29.85 (0.50%)	14.88 (0.80%)
80	80.67 (0.83%)	48.29 (0.60%)	24.21 (0.87%)	79.77 (0.28%)	47.92 (0.16%)	23.80 (0.83%)

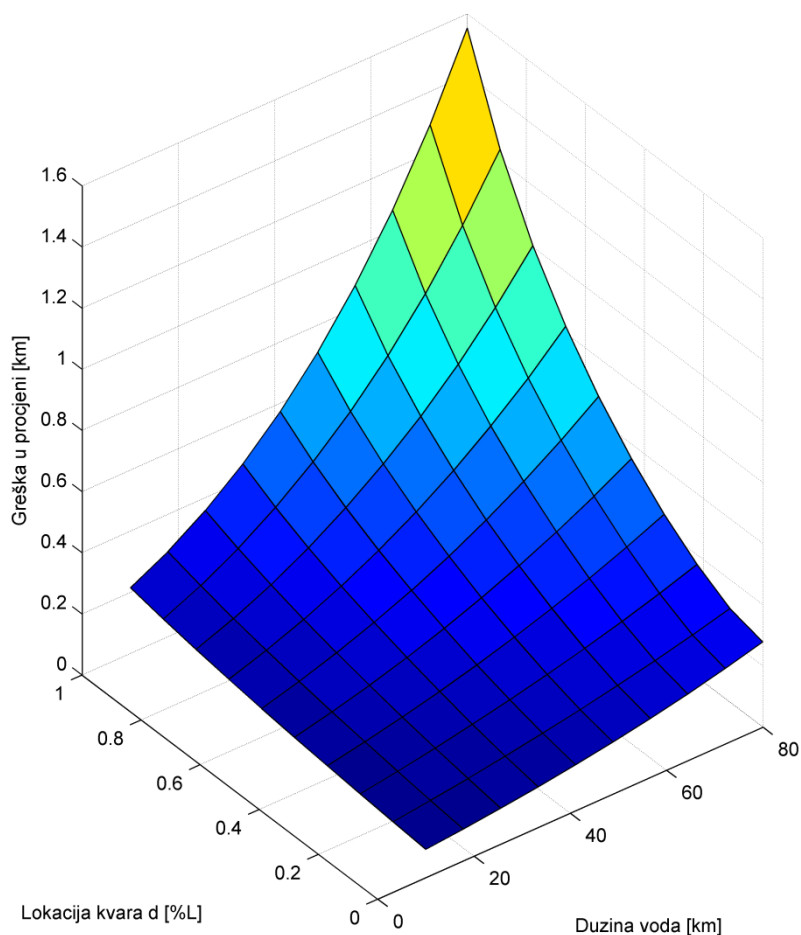
Iz rezultata prikazanih u Tabeli 6.3 vidi se da se greške u procjeni mjesta kvara nalaze u okviru od 1%, što znači da je metod veoma precizan, te da omogućava izuzetno efikasnu procjenu lokacije jednofaznog ili dvofaznog zemljospoja na nadzemnom neopterećenom vodu u toku njegovog uključanja.

6.2.1 Ograničenja u primjeni preporučenog metoda za lokalizaciju nesimetričnog zemljospoja

U uvodnom dijelu šestog poglavlja istaknuto je da je razvijeni metod pogodan za primjenu kod nadzemnih vodova dužine do 80 km.

Naime, iz odrađenih simulacija koje su se odnosile na vodove dužina od 100, 200, 300, 400 i 500 km može se zaključiti da tačnost metoda značajno opada sa porastom dužine voda. Na primjer, za slučaj dvofaznog zemljospoja na vodu dužine 500 km, sa pozicijom kvara $d=0.6l$, maksimalna greška u procjeni lokacije kvara iznosila je oko 12%.

Zavisnost greške u određivanju lokacije kvara (u km) od dužine analiziranog voda, za različite vrijednosti rastojanja tačke kvara od početka voda, prikazana je na slici 6.5.



Slika 6.5 Zavisnost greške u određivanju lokacije kvara od dužine voda

Sa slike 6.5 uočava se da dolazi do velikog porasta greške u određivanju tačke kvara sa porastom dužine analiziranog voda.

Razlog za ovako veliku grešku je postojanje člana $v_k l$ u jednačinama (6.1) i (6.4), koje se koriste za proračunavanje vrijednosti d . U navedenim jednačinama, član $v_k l$ se nalazi u argumentu trigonometrijskih funkcija. To znači da u slučaju veoma dugih nadzemnih vodova (sa velikim vrijednostima l), čak i veoma male greške u procjeni frekvencije imaju za posledicu značajno narušavanje tačnosti metoda, pa je navedeni metod preporučljivo koristiti u slučaju nadzemnih vodova dužine do 80 km.

ZAKLJUČAK

Elektroenergetski sektor je pretrpio krupne promjene u posljednjim decenijama. Tehnički razlozi, odnosno intenzivan razvoj tehnologije i ekonomski razlozi, posmatrani kroz stalnu težnju da cijena isporučene električne energije bude što niža, rezultirali su deregulacijom elektroenergetskog sektora, pojavom tržišta električne energije i značajnim promjenama u strukturi potrošnje električne energije. Zahtjevi elektrodistributivnog konzuma postaju sve složeniji, a obezbjeđenje elementarnog napajanja potrošača nije dovoljno za njihovo nesmetano funkcionisanje. Savremenim (smart) uređajima, baziranim na komponentama energetske elektronike, je potrebno stabilno i visokokvalitetno napajanje, koje podrazumijeva adekvatan talasni oblik napona i održavanje parametara napona i učestanosti na definisanom nivou. Drugim riječima, kvalitet električne energije dobija na važnosti, a savremena elektroenergetika postaje tijesno povezana sa informacionim tehnologijama, energetskom elektronikom, digitalnom obradom signala i drugim naučnim oblastima.

Brojni su uzročnici i brojne su manifestacije poremećaja napona napajanja. Tako, na primjer, jednovremeni rad veće grupe nelinearnih potrošača rezultiraće pojavom viših harmonika, što dovodi do pojave naponskog (mrežnog) zaprljanja, komutacione aktivnosti u sistemu, kao što je npr. uključenje voda, imaće za posljedicu pojavu prenapona, rad velikih nelinearnih potrošača, kakve su elektrolučne peći, dovodi do problema sa flikerima, i sl. Osnovna intencija je da naponski poremećaj bude što prije detektovan i lokalizovan, kako bi se pravovremeno preduzele korektivne aktivnosti u sistemu i uspostavile željene naponske prilike. Ova doktorska disertacija i dobijeni rezultati predstavlja korak u tom pravcu.

Upoznavanje sa dosadašnjim istraživanjima brojnih autora u okviru navedene problematike i proisteklim zaključcima, činilo je osnovu za sagledavanje mogućnosti za dalja proučavanja i eventualnu nadogradnju postojećih saznanja.

Prvi proklamovani zadatak doktorske disertacije, a ujedno i njen prvi važan doprinos, je bio odabir adekvatne metode digitalne obrade signala za analizu signala

napona, imajući na umu nedostatke najčešće korištenog metoda, Furijeove transformacije. Analizom simuliranih, karakterističnih naponskih poremećaja i realnih, mjerenih naponskih signala, konstatovana je potpuna adekvatnost empirijskog metoda dekompozicije signala (EMD metoda) i visoka pouzdanost rezultata koji se dobijaju upotrebom ove metode. Dakle, EMD metoda je veoma praktična i tačna za klasifikaciju naponskih poremećaja.

Težeći ispitivanju primjenjivosti EMD metoda u detekciji i lokalizaciji asimetričnih zemljospoja koji egzistiraju u momentu uključenja nadzemnog elektroenergetskog voda (slučaj je analiziran kao posebno interesantan sa aspekta visokih vrijednosti prenapona koje mogu nastati), razvijeni su matematički modeli uključenja nadzemnog elektroenergetskog voda u normalnom radnom režimu i režimima postojanja asimetričnih zemljospoja. Dobijeni matematički modeli predstavljaju drugi važan doprinos doktorske disertacije.

Koristeći pomenute matematičke modele i primjenjujući EMD metodu, razvijeni su: klasifikacioni metod za određivanje režima rada neopterećenog nadzemnog voda prilikom uključenja i metod za lokalizaciju asimetričnog zemljospoja pri uključenju istog tipa voda.

Prvi razvijeni metod utvrđuje da li u momentu uključenja nadzemnog voda egzistira jednofazni ili dvofazni zemljospoj ili se uključenje sprovodi bez prisustva kvara. Metod se bazira na dobijenom zaključku da nulta komponenta napona na kraju voda ima različite karakteristike u različitim radnim režimima. U poređenju sa sličnim metodama, predloženi metod ima sledeće prednosti:

1. Metod ima krajnje jednostavnu formu. Njegova primjena se temelji na snimljenom talasnom obliku napona (korišćenjem postojećih uređaja u okviru sistema zaštite u trafostanicama) i sprovođenju elementarnih matematičkih operacija. Ne postoji potreba za upotrebom metoda digitalne obrade signala, metoda vještačke inteligencije ili specijalno obučenom personalu.

2. Vrijeme odziva metoda je 0.02s, što je značajno bolje nego vrijeme reagovanja tipičnih releja koji se uobičajno nalaze u trafostanicama. Njihovo vrijeme potrebno za sprovođenje prekidačkih akcija iznosi od 0.5s do 3s.

3. Metod je pogodan za različite tipove uzemljenja i podjednako se može primjenjivati u slučajevima kvarova sa visokom i niskom impedansom.

4. Metod je ekonomičan i ne zahtijeva angažovanje nikakve dodatne mjerne opreme u trafostanicama, što utiče na redukciju troškova u sistemu.

Drugi metod predložen doktorskom disertacijom, a koji se tiče estimacije lokacije asimetričnih zemljospojeva u momentu uključenja nadzemnog voda, prevazilazi određene nedostatke široko-rasprostranjenih metoda putujućih talasa i metoda mjerenja impedanse pri lociranju kvarova. Metod je baziran na poznavanju osnovnih parametara sistema i primjeni EMD metoda u estimaciji dominantne učestanosti u harmonijskom spektru snimljenog naponskog signala. Metod je jednostavan za upotrebu i posebno primjenjiv za vodove dužine do 80 km.

Ova dva metoda čine ujedno i najveći doprinos doktorske disertacije.

LITERATURA

- [1] F. Jurado, M. Valverde, “Applications of signal processing tools in a power systems course”, *International Journal of Electrical Engineering Education* ,Vol. 41, no. 1, pp. 28-42, Jan. 2004.
- [2] R. Flores, “Signal processing tools for power quality event classification”, Lic. Eng. thesis, School Elect. Eng, Chalmers Univ. Technol, Göteborg, Sweden, 2003.
- [3] S. J. Huang, C. T. Hsieh and C. L. Huang, “Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 1, pp. 235–243, Jan. 1999.
- [4] O. Rioul and M. Vetterli, “Wavelets and signal processing”, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 14–38, Oct. 1991.
- [5] T. B. Littler and D. J. Morrow, “Wavelets for the analysis and compression of power system disturbances”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 2, pp. 358–364, Apr. 1999.
- [6] R. L. Allen, and D. Mills., “Signal analysis: time, frequency, scale, and structure”, Wiley-IEEE Press, New York, 2004.
- [7] R. G. Stockwell, L.Mansinha and R. P. Lowe, “Localization of the complex spectrum: the S-transform”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 44, No.4, pp. 998-1001, Apr.1996.
- [8] D. P. Radunović, “Talasići (Wavelets) ”, Akademska misao, Beograd, 2005.
- [9] Lj. Stankovic, M. Dakovic, T. Thayaparan, “Time-Frequency Signal Analysis with Applications”, Artech House, Boston, USA, 2013.
- [10] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, “The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert-Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis”, *Proc. Royal Socciety*, 1998.
- [11] M. K. Saini, K. Dhamija, “Application of Hilbert-Huang Transform in the Field of Power Quality Events Analysis”, *Int. Conf. on Advances in Signal Processing and Communication*, pp.118-124, Mumbai, Aug. 2013.
- [12] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, “Kvalitet elektri;ne energije”, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, jun 2007.
- [13] D. Saxena, S.N. Singh and K.S. Verma, “Wavelet based denoising of power quality events for characterization”, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 119-132, 2011.

- [14] R. Likhitha, A.Manjunath, E.Prathibha, “Development of Mathematical Models for Various PQ Signals and Its Validation for Power Quality Analysis”, International Journal of Engineering Research and Development, Volume 1, Issue 3, pp.37-44, June 2012.
- [15] R. Subhamita and N. Sudipta, “Classification of Power Quality Disturbances using Features of Signals”, International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 2, Issue 11, pp. 1-9, Nov. 2012.
- [16] C.Yao Lee, Yi-Xing Shen, “Optimal Feature Selection for Power-Quality Disturbances Classification”, IEEE Trans. Power Del, Vol. 26, No. 4, pp. 2342 - 2351 June 2011.
- [17] IEEE Standard 1159
- [18] Z. Klaić, S. Nikolovski, “Kvaliteta električne energije – mjerenje prema normi EN 50160”, Hrvatski komitet međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sisteme, 6. savjetovanje, pp. 135-143, Cavtat, novembar 2013
- [19] J.P. Bickford, N. Mullineux and J.R.Reed, “Computation of power system transients”, IEE Monograph, 1976.
- [20] A. Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, Wiley Interscience, New York, 1991.
- [21] M. Bollen, E. Styvaktakis and I. Yu-Hua Gu, “Categorization and Analysis of Power System Transients”, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 3, pp. 2298-2305, July 2005.
- [22] S. Vujosević, S. Mujović, “Analysis of switching overvoltages originated by one or more loaded transmission lines energization”, I savjetovanje CG KO CIGRE, Miločer, maj 2009.
- [23] A. I. Ibrahim and H. W. Dommel, “A Knowledge Base for Switching Surge Transients”, Intr. Conf. on Power Systems Transients, Montreal, Canada, 2005, paper 50
- [24] Lj. M. Popović, “Algorithm for single phase-to-ground fault digital distance relay”, IET Gener. Transm. Distrib, Vol. 6, no. 3, pp. 226–232, 2012.
- [25] L. Meng, X. Song, “Application of signal processing and analysis in detecting single line-to-ground (SLG) fault location in high-impedance grounded distribution network”, IET Gener. Transm. Distrib Vol. 10 no. 2, pp. 382–339, 2016.
- [26] E. A. Silva, F. A. Moreira, M.C. Tavares, “Energization simulations of a half-wavelength transmission line when subject to three-phase faults-Application to a field test situation”, Electric Power Syst. Res., Vol. 138, pp. 58–65, Sept. 2016.
- [27] J. Bird, “Electrical Circuit Theory and Technology”, Newnes, 2010.

- [28] M. Davila, J. L. Naredo, P. Moreno, A. Ramirez, "Practical Implementation of a Transmission Line Model for Transient Analysis Considering Corona and Skin Effects", IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003, Bologna, Italy
- [29] S. Skuletic, S. Vujosevic, "Analysis of switching overvoltages originated by line energizing in simple and complex systems", 36th UPEC 2001 Conf., September 2001, Swansea, UK, Paper No. 413.
- [30] S. Skuletic, S. Vujosevic, "Possibilities for an analysis of switching overvoltages due to three-phase faults tripping with a discrete method", 35th UPEC 2000 Conf., Sept. 2000, Belfast, N.Irl., P. No. 2.
- [31] H. Soloot, A. Gholami, E. Agheb, A. Ghorbandaeipour, P. Mokhtari: "Investigation of Transmission Line Overvoltages and their Deduction Approach", World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering Vol:3, No:5, 2009., pp.1070-1079
- [32] A. I. Ramirez, A. Semlyen, R. Iravani, "Modeling Nonuniform Transmission Lines for Time Domain Simulation of Electromagnetic Transients", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol. 18, No.3, July 2003, pp. 968-974.
- [33] B. Gustavsen, J. Mahseredjian: "Simulation of Internal Overvoltages on Transmission Lines by an Extended Method of Characteristics Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, Issue 3, July 2007, pp.1736-1742
- [34] M. H. J. Bollen, I. Yu-Hua Gu, "On the Analysis of Voltage and Current Transients in Three-Phase Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, NO. 2, pp.1194-1201, April 2007
- [35] S. Vujosevic, S. Skuletic, "Energization of an unloaded three-phase transmission line with consideration of frequency dependent parameters, corona effects and dissipations of circuit breaker switching moments", 40th UPEC 2005 Conference, Cork, UK, September 2005, paper No.95.
- [36] Y. H. Gu, M. H. J. Bollen, "Time-Frequency and Time-scale Domain Analysis of Voltage Disturbances", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.wave 14, No. 4, October 2000, pp. 1279-1284.
- [37] M.Basu, B.Basu:"Application of wavelet transform for power quality disturbance analysis", Dublin Institute of Technology, pp.269-273, 2004.
- [38] M. H. J. Bollen, Y. H. Gu: " Signal Processing of Power Quality Disturbances", IEEE Press series on power engineering, Willey, 2008
- [39] M.Kostov, B.Gegov, M.Atanasovski, M.Petkovski: "Short Time Fourier Transform for Power Disturbances Analysis", L Int. Sc. Conf. on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, 24-26 June, Sofia, 2016, pp. 178-181

- [40] F. Jurado, J. R. Saenz: "Comparison between discrete STFT and wavelets for the analysis of power quality events", *Electric Power Systems Research* 62, 2002, pp.183-190
- [41] M. Gaouda, M. M. A. Salama: "Monitoring Nonstationary Signals", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.24, No.3, 2009, pp. 1367-1376
- [42] Z. Lu, J. S. Smith, Q. H. Wu, J. Fitch, "Empirical Mode Decomposition For Power Quality Monitoring", 2005 IEEE/PES Conference, 2005, Dalian, pp. 1-5
- [43] S. Vujosevic, J. Radovic, M. Dakovic, "EMD And STFT Signal Processing Methods Used for the Analysis of the Energisation of an Unloaded Three-Phase Transmission Line", 44th UPEC 2009 Conference, 2009, Glasgow, Scotland
- [44] M. Ortis, S. Valero, A. Gabaldon, "Transient Power and Quality Events Analysed Using Hilbert Transforms", *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 6, 2012 pp 230-239
- [45] S. Vujošević, S. Mujović: "Application of EMD and STFT Methods in Analysis of Energization of an Unloaded Overhead Line Under Different Operating Conditions", *The International Symposium on Power Quality*, Teslić, maj 2017.
- [46] M. Manjula, S. Sarma: Comparison of Empirical Mode Decomposition and Wavelet Based Classification of Power Quality Events, 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering, *Energy Procedia* 14, 2012. pp.1156 – 1162
- [47] G. Rilling, P. Flandrin: "One or Two Frequencies? The Empirical Mode Decomposition Answers", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 56, No. 1, January 2008, pp. 85-9
- [48] S. Vujošević, S. Mujović, M. Daković: "Analysis of Real Overvoltage Disturbances by Using Nonstationary Signal Processing Techniques", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 15 (3), August 2015, pp. 23 – 32
- [49] N. Sudipta and M. Priyanjali, "Wavelet based feature extraction for classification of Power Quality Disturbances", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 374-379, 13th to 15th April, 2011.
- [50] M. Uyar, S. Yildirim, M. Gencoglu, "An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals", *Electric Power Syst. Res.*, Vol.78, pp. 1747-1755, 2008.
- [51] S. N. Ananthan, R. Padmanabhan, R. Meyur, *et al*, "Real-time fault analysis of transmission lines using wavelet multi-resolution analysis based frequency-domain approach", *IET Sci. Meas. Technol.*, Vol. 10, no.7, pp. 693–703, 2016.
- [52] D. Guillen, M.R.A. Paternina, A. Zamora, *et al*, "Detection and classification of faults in transmission lines using the maximum wavelet singular value and

- Euclidean norm", *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 9, no.15, pp. 2294-2302, 2015.
- [53] Perez, F.E., Orduna, E., Guidi, G.: "Adaptive wavelets applied to fault classification on transmission lines", *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2011, 5, pp. 694-702
- [54] M. Caciotta, S. Giarnetti, F. Leccese, Z. Leonowicz: "Detection of short transients and interruptions using the Hilbert transform", XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, pp. 913-916, Lisbon, September 6-11, 2009.
- [55] LI Bin, Shu Hongchun: "Research on Fault Line Detecting Based on Empirical Mode Decomposition (EMD) in Resonant Grounded Systems", Power and Energy Engineering Conference, pp.1-5, Wuhan, 2009.
- [56] C. Drummond, D. Sutanto, "Classification of power quality disturbances using the iterative Hilbert Huang transform", 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010, pp. 1-7. Wollongong, 2010.
- [57] R.Shilpa, P. S. Puttaswamy: "Detection and Classification of Short Transients and Interruption using Hilbert Transform", *Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 15 Issue 4, USA, 2015.
- [58] D. Mittal, O. P. Mahela, R. Jain: "Classification of Power Quality Disturbances in Electric Power System: A Review", *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering* Vol. 3, Issue 5 (Nov. - Dec. 2012.), pp, 06-14
- [59] Q. Wang, T. Wang J. Sheng X. Zhang, G. Shi G: "The Power Quality Disturbance Detection and Classification Method Based on EMD", *IEE PES ASIA 2012*, pp.1-3
- [60] S. Shukla, S. Mishra, B. Singh: "Empirical-Mode Decomposition With Hilbert Transform for Power-Quality Assessment", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, NO. 4, October 2009., pp. 2159-2165
- [61] T. Jayasree, D. Sam Harrison, T. Sree Rangaraja: "Automated Classification of Power Quality Disturbances using Hilbert Huang Transform and RBF Networks" *International Journal of Soft Computing and Engineering*, Vol.1, Issue-5, November 2011., pp.217-223
- [62] T. Yalcin, O. Ozgonenel, U. Kurt: "Multi - Class Power Quality Disturbances Classification by Using Ensemble Empirical Mode Decomposition Based SVM", *ELECO 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 1-4 December, Bursa, pp.122-127
- [63] M Manjula, R. S. Sarma: "Assessment of Power Quality Events by Empirical Mode Decomposition based Neural Network", *Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol II*, July 4 - 6, 2012., London

- [64] Y. Yang, C. Miao, J. Deng: "Research on the Mechanism of Masking Signals Technique to Improve Empirical Mode Decomposition", *Journal of Information & Computational Science* 9: 12 (2012.) pp.3509–3516
- [65] O. P. Mahela, A. G. Shaik, N. Gupta: "A critical review of detection and classification of power quality events", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 2015., pp.495-505
- [66] I. Uglešić, B. Filipović-Grčić, S.Bojić: "Transients Caused by Uncontrolled and Controlled Switching of Circuit Breakers", *The International Symposium on High-Voltage Technique "Höfler's Days"*, 7–8 November 2013., Portoroz, Slovenia
- [67] Sudhir Kumar Singh: "Study of Switching Transients on EHV AC Transmission Line", *International Journal of Science and Research*, Vol. 5 Issue 5, May 2016.
- [68] C. Machado *et al.*: "Energization of a Half-Wavelength Transmission Line -Pre-Operational Transients Studies ", *Energy and Power Engineering*, 2013., vol,5, pp.1456-1462
- [69] M. Manjula, S. Mishra, S.Sharma: "Empirical Mode Decomposition based Probabilistic Neural Network for Faults Classification", *International Conference on Power and Energy Systems*, Chennai, 2011.
- [70] . Guo, C. Li, Y. Li, S. Gao: "Research on the Power System Fault Classification Based on HHT and SVM Using Wide-area Information", *Energy and Power Engineering*, 2013., Vol.5, pp.138-142
- [71] M. Simab, K. Alvehag, L. Soder, *et al.*: "Designing reward and penalty scheme in performance based regulation for electric distribution companies", *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2012., 6, (9), pp. 893-901
- [72] IEEE Std C37.114-2004: "IEEE Guide for Determination Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines", pp. 1-36, 2005
- [73] Saha, M., Izykowski, J., Rosolowski, E.: "Fault location on Power Networks" Springer-Verlag, 2010
- [74] Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, Y. *et al.*: "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 1982, PAS-101, pp. 2892–2898
- [75] Mora-Florez, J., Melendez, J., Carrillo-Caicedo, G.: "Comparison of Impedance Based Fault Location Methods for Power Dstribution Systems", *Electr Power Syst Res*, 2008, 78, (4), pp. 657–667
- [76] Lotfifard, S., Kezunovic, M., Mousavi, M.: "A Systematic Approach for Ranking Distribution Systems Fault Location Algorithms and Eliminating False Estimates", *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2013, 28, pp. 285–293

- [77] Hashim, M., Ping, H., Ramachandaramurthy, V.: "Impedance-Based Fault Location Techniques for Transmission Lines". Proc. IEEE Region TENCON, Singapore, November 2009, pp. 1-6
- [78] Gale, P., Crossley, P., Xu, B. *et al.* : "Fault Location Based on Traveling Waves". Proc. 5th Int. Conf. Develop. Power Syst. Protection, York, UK, April 1993, pp. 54-59
- [79] Thomas, D., Carvalho, R., Pereir, E.: "Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves". Proc. IEEE Power Tech. Conf., Bologna, Italy, Jun 2003, pp. 468-472
- [80] Kezunovic, M., Mrkic, J., Perunicic, B.: "An Accurate Fault Location Algorithm Using Synhronised Sampling", Electr Power Syst Res, 1994, 29, pp. 657–667
- [81] Sauhats, A., Danilova, M.: "Fault Location Algorithms for Super High Voltage Power Transmission Lines". Proc. IEEE Power Tech. Conf., Bologna, Italy, Jun 2003, pp. 1-6
- [82] Ngu, E., Ramar, K.: "A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines", Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2011, 2, pp. 1767–1775
- [83] Huang, Q., Zhen, W., Pong, P.: "A Novel Approach for Fault Location of Overhead Transmission Lines with Noncontact Magnetic-Field Measurement", IEEE Trans. Power Deliv., 2012, 27, pp. 1186–1195
- [84] Zhang, Z., Di Rienzo, L.: "Optimization of magnetic sensor arrays for current measurement based on swarm intelligence and D-optimality", Int. J. Comput. Math. Elect. Electron. Eng., 2009, 28, pp. 1179–1190
- [85] Antona, G., Di Rienzo, L., Ottoboni, R. *et al.*: "Processing magnetic sensor array data for AC current measurement in multiconductor systems", IEEE Trans. Instrum. Meas., 2001, 50, pp. 1289–1295
- [86] Kezunovic, M.: "Smart fault location for smart grids", IEEE Trans. Smart Grid, 2011, 33, pp. 11–22
- [87] Chen, K., Huang, C., He, J.: "Fault Detection, Classification and Location for Transmission lines and Distribution Systems: A Review on the Methods", High Volt., 2016, 1, pp. 25-33
- [88] Li, Y., Meng, X., Song, X.: "Application of signal processing and analysis *in* detecting single *line*-to-ground (SLG) *fault* location *in* high-impedance grounded distribution network", IET Gener. Transm. Distrib., 2016, 10, (2), pp. 382-389
- [89] Shaik, A.G., Pulipaka, R.R.V.: "A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines", Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2015, **64**, pp. 35–40
- [90] Zhang Liguao, Han Xu, Jia Jian, Gao Tianye, Ma Yongshen: "Power Systems Faults Location with Traveling Wave Based on Hilbert-Huang Transform", 2009

- International Conference on Energy and Environment Technology, Guilin, pp.197-200
- [91] Ananthan, S.N., Padmanabhan, R., Meyur, R., *et al.*: "Real-time fault analysis of transmission lines using wavelet multi-resolution analysis based frequency-domain approach", IET Sci. Meas. Technol., 2016, 10, (7), pp. 693–703
 - [92] Silva, K.M., Souza, B.A., Brito, N.S.D.: "Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN", IEEE Trans. Power Deliv., 2006, 21, (4), pp. 2058–2063
 - [93] Martinez, D.C., Rodriguez, M.V., Ramirez, C.A.P., *et al.*: "Novel Down-sampling Empirical Mode Decomposition Approach for Power Quality Analysis", IEEE Trans. Indus Electr., 2016, 63, (4), pp. 2369–2378
 - [94] Alves Da Silva, A.P., Lima, A.C.S., Souza, S.M.: "Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks", Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2012, 43, pp. 720–727
 - [95] Perera, N., Rajapakse, A.D.: "Recognition of Fault Transients Using a Probabilistic Neural-Network Classifier", IEEE Trans. Power Deliv., 2011, 26, (1), pp. 410–419
 - [96] Hooshmand, R., Enshaee, A.: "Detection and classification of single and combined power quality disturbances using fuzzy systems oriented by particle swarm optimization algorithm", Electr Power Syst Res, 2010, 80, (12), pp. 1552–1561

IZJAVA O AUTORSTVU

Potpisani: Snežana Vujošević

Broj indeksa: 3/2013

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**Analiza naponskih poremećaja, detekcija, klasifikacija i lokalizacija zemljospojeva
kod nadzemnih elektroenergetskih vodova primjenom EMD metode**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedila autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

Potpis doktoranda

U Podgorici, novembar 2017.

Snežana Vujošević

IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA

Ime i prezime autora: Snežana Vujošević

Broj indeksa/upisa: 3/2013

Studijski program: Doktorske studije elektrotehnike

Naslov rada: **Analiza naponskih poremećaja, detekcija, klasifikacija i lokalizacija
zemljospoja kod nadzemnih elektroenergetskih vodova
primjenom EMD metode**

Mentor: Prof. dr Saša Mujović

Potpisani: Snežana Vujošević

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, odnosno zvanja doktora umjetnosti, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naziv disertacije i datum odbrane rada.

Potpis doktoranda

U Podgorici, novembar 2017.

Snežana Vujošević

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**Analiza naponskih poremećaja, detekcija, klasifikacija i lokalizacija
zemljospoja kod nadzemnih elektroenergetskih vodova
primjenom EMD metode**

koja je moje autorsko djelo.

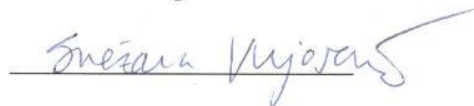
Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

U Podgorici, novembar 2017.

Potpis doktoranda



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerade.
5. Autorstvo - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
6. Autorstvo - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.