

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Синиша Ј. Зубић

**АЛГОРИТМИ ЗА ДИСТАНТНЕ
ЗАШТИТЕ НА БАЗИ ДИГИТАЛНЕ
ФАЗНЕ КОМПАРАЦИЈЕ**

докторска дисертација

Београд, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Siniša J. Zubić

**DISTANCE RELAY ALGORITHMS
BASED ON DIGITAL PHASE
COMPARATOR**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ

Ментор:

Др Миленко Ђурић, редовни професор, Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет

Члан комисије:

Др Иван Шкокљев, редовни професор, Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет

Члан комисије:

Др Драган Тасић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Електронски
факултет

Члан комисије:

Др Никола Рајаковић, редовни професор, Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет

Члан комисије:

Др Зоран Стојановић, доцент, Универзитет у Београду, Електротехнички
факултет

Датум одбране:

ИЗЈАВА ЗАХВАЛНОСТИ

Аутор би желио да се захвали свим колегама који су помогли у току истраживања и писања дисертације.

На првом мјесту колеги Чедомиру Зелковићу на бројним сугестијама и веома корисним дискусијама.

Затим колегама Петру Матићу и Милораду Прњићу на одвојеном времену за пажљиво читање дисертације и савјетима за побољшање презентације.

Аутор дугује посебну захвалност колегама из Електропреноса Бања Лука, Браниславу Копрени, Александру Тици, Марку Бабићу и Александру Шукалу, за податке без којих дисертација не би била потпуна.

Значајну помоћ су пружиле и колеге Станко Јанковић и Десимир Тријић из Електромреже Србија, Бојан Ивановић из Електропривреде Србија и Хрвоје Булат из Оператора пријеносног сустава Загреб, те им се овом приликом најискреније захваљујем.

Посвећено
Марини и Ани

АЛГОРИТМИ ЗА ДИСТАНТНЕ ЗАШТИТЕ НА БАЗИ ДИГИТАЛНЕ ФАЗНЕ КОМПАРАЦИЈЕ

Резиме

У дисертацији су презентовани нови алгоритми дистантних заштита базирани на фазној компарацији у временском домену. Представљени алгоритми су поређени са алгоритмима на бази дискретне Фуријеове трансформације (*DFT*) који се најчешће користе у пракси и представљају класично рјешење у овој области. Основна разлика између наших и класичних рјешења је у томе што не рачунамо фазоре, него сигнале остављамо у временском домену гдје уз мали број рачунских операција одређујемо да ли је квар лоциран унутар подешене зоне реаговања. Основна предност овог приступа је у томе што значајно редукује број рачунских операција које алгоритам извршава у сваком периоду одабирања. Зависно од облика карактеристике реаговања, предложени алгоритми захтијевају између 30 и 70% мање рачунских операција у односу на класично рјешење базирано на *DFT*.

Предложени приступ има двије потенцијално слабе тачке. Прва је да истовремено присуство виших хармоника истог реда у улазним сигнаlima може узроковати грешке у детекцији квара. Детаљном анализом и тестирањем смо показали да је и при условима који су много строжији од реалних услова у мрежи, поменута грешка незнатна, тако да практично нема утицаја на тачност детекције квара. Други потенцијални недостатак предложених алгоритама је неопходност уношења додатних временских кашњења у сигнале како би биле реализоване жељене карактеристике реаговања. То би теоретски требало довести до тога да предложени алгоритми буду у свакој ситуацији спорији од контролних. Тестирања показују да то није тачно и да су неки предложени алгоритми у просјеку чак и бржи од класичних.

Специфичност фазне компарације у временском домену је и у томе што није могуће директно одредити фреквентну карактеристику алгорита, која је значајан показатељ поузданости и сигурности приликом детекције квара. Због тога смо предложили индиректан начин за процјену фреквентне карактеристике и урадили поређење са фреквентном карактеристиком алгорита на бази *DFT*. Показали смо да су фреквентне карактеристике практично идентичне. Алгоритми садрже филтер који значајно редукује опадајућу једносмјерну компоненту, као и прелазне процесе код капацитивно спрегнутих напонских трансформатора.

Алгоритми су тестирани на класичан начин, детерминистичким приступом кроз промјену појединих промјенљивих у симулацији у широком опсегу. Тиме су добијени показатељи брзине, поузданости и сигурности, али није омогућена њихова стварна процјена нити поређење алгорита. То је и главни недостатак овог начина тестирања који је присутан у већини радова. Због тога смо формирали стохастички модел мреже базиран на стварним функцијама расподјеле најважнијих промјенљивих у систему. Густине расподјела промјенљивих су одређене на основу прикупљених података из преносних мрежа Босне и Херцеговине и Србије. На основу више хиљада симулација кварова и реаговања алгоритама дистантних заштита, одређени су поузданост, сигурност и расподјела времена реаговања сваког алгорита. Тиме је омогућено много објективније поређење алгорита. Показало се да у просјеку најбрже реагује и има најбоље опште резултате један од предложених алгорита.

Прикупљени подаци из преносних мрежа, односно формиран стохастички модел за процјену поузданости и сигурности, могу бити корисни и другим ауторима приликом тестирања алгоритама разних типова заштита преносних водова.

Кључне речи: релејна заштита, дистантни релеји, фазна компарација у временском домену

Научна област: Техничке науке - Електротехника

Ужа научна област: Електроенергетски системи

УДК:

DISTANCE RELAY ALGORITHMS BASED ON DIGITAL PHASE COMPARATOR

Abstract

In this doctoral dissertation new distance relay algorithms, based on the time-domain phase comparison principle, are presented. The algorithms are compared to the algorithms based on discrete Fourier transformation (DFT), which are the most commonly used in practice and considered as a classical solution in this area. The main difference between the proposed and the classical solution is that we do not calculate phasors. Instead we use signals in the time-domain, where using a smaller number of mathematical operations we can detect the fault. The main advantage of this approach is a significant reduction of mathematical operation that the algorithm executes in each sampling period. Depending on the shape of the operation characteristic, our algorithms demand 30 to 70% fewer mathematical operations in comparison to a classical solution based on DFT.

The proposed approach potentially has two weak spots. The first one is that simultaneous presence of the same order higher harmonics in input signals can cause an error in fault detection. We showed, through detailed analysis and testing, that even in harder conditions than in a real power system, the error is insignificant, so practically there is no impact on the fault detection. The second problem is the necessity of adding an additional time delay in input signals, in order to get a desired operating characteristic. That should result in the proposed algorithms being slower than the algorithms based on DFT, but tests show that this is not true. Some of our algorithms are, on average, even faster than the classical ones.

A specific property of the time-domain phase comparison is that it is not possible to determine the frequency response, which is a significant indicator of security and dependability. We proposed an indirect way to evaluate the frequency response and compare it with the frequency response of DFT. We proved that the frequency responses are practically identical. The algorithms include a filter which

mitigates decaying DC-offset in the current as well as the capacitive coupled voltage transformer transients.

Algorithms are tested in a classical way, through changing some variables in simulation over a wide range. That provides indicators of speed, dependability and security, but it is not enough for their real assessment nor for comparison of the algorithms. That is the main weakness of this approach, which is common in most papers. For that reason we made a stochastic power system model based on probability density functions of the main variables in a power system. In order to get necessary probability density functions, we were collecting data from transmission systems in Bosnia and Herzegovina, as well as Serbia. We carried out a few thousand fault simulations and determined dependability, security and speed for all tested algorithms. That enables a more objective comparison of the algorithms. The final result is that the highest speed, and the highest mark has one of the proposed algorithms.

The data we collected, and stochastic model for dependability and security assessment, could be useful for other authors to test different kinds of transmission line protection algorithms.

Keywords: relay protection, distance relays, time-domain phase comparator

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power Systems

UDK:

САДРЖАЈ

1.	УВОД	1
1.1	Преглед тренутног стања у области	2
1.2	Мотивација и предмет истраживања	6
1.3	Садржај дисертације по поглављима.....	8
2.	ДИСТАНТНЕ ЗАШТИТЕ НА БАЗИ ФАЗНЕ КОМПАРАЦИЈЕ.....	9
2.1	Принцип рада дистантних заштита.....	9
2.2	Реализација карактеристика реаговања на бази фазне компарације	13
2.2.1	Реализација кружне карактеристике реаговања	15
2.2.2	Реализација карактеристике облика двије полуправе.....	19
2.3	Дистантне заштите на бази естимације фазора	20
3.	АЛГОРИТМИ ДИСТАНТНЕ ЗАШТИТЕ НА БАЗИ ФАЗНЕ КОМПАРАЦИЈЕ У ВРЕМЕНСКОМ ДОМЕНУ	24
3.1	Специфичности обраде сигнала у временском домену	25
3.2	Реализација кружне карактеристике у временском домену.....	27
3.3	Фазни компаратор на бази интеграла тренутне снаге.....	31
3.3.1	Примјер имплементације кружне карактеристике реаговања	33
3.4	Реализација полигоналне карактеристике у временском домену.....	36
3.4.1	Избор коефицијената полигоналне карактеристике	38
4.	КРИТЕРИЈУМИ ПОРЕЂЕЊА АЛГОРИТАМА.....	47
5.	ПОРЕЂЕЊЕ АЛГОРИТАМА ПО КРИТЕРИЈУМУ БРОЈА ОПЕРАЦИЈА ...	53
6.	ФРЕКВЕНТНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ АЛГОРИТАМА.....	58
6.1	Тестирање фреквентних карактеристика предложених алгоритама	61
7.	УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА МРЕЖЕ НА ДЕТЕКЦИЈУ КВАРА	73
7.1	Утицај импедансе мреже	73
7.2	Утицај отпорности лука на мјерену импедансу мреже.....	74
7.3	Утицај двостраног напајања на мјерену отпорност лука	76
7.4	Утицај оптерећења вода на мјерену отпорност лука	77

8.	ДЕТЕРМИНИСТИЧКИ ПРИСТУП ТЕСТИРАЊУ АЛГОРИТАМА.....	80
8.1	Резултати тестирања алгоритама	82
9.	СТОХАСТИЧКИ МОДЕЛ МРЕЖЕ.....	89
9.1	Симулације трополних кратких спојева.....	90
9.2	Подаци добијени из SCADA система	94
9.3	Записа кварова дистантних заштита.....	99
9.4	Расподјеле промјенљивих у случају већег оптерећења мреже	106
10.	СТОХАСТИЧКИ ПРИСТУП ТЕСТИРАЊУ АЛГОРИТАМА	109
10.1	Тестирање алгоритама на моделу мрежа БиХ и Србије	112
10.1.1	Поузданост и сигурност алгоритама	115
10.1.2	Вријеме реаговања алгоритама	117
10.2	Тестирање алгоритама на моделу мреже са повећаним оптерећењем	123
11.	ЗАКЉУЧАК	127
	ЛИТЕРАТУРА	132
	НОМЕНКЛАТУРА.....	137
	Прилог 1	139
	Прилог 2	144
	БИОГРАФИЈА	147

1. УВОД

Електроенергетски систем (ЕЕС) се у најширем смислу састоји од подсистема производње, преноса и дистрибуције електричне енергије. Преносна мрежа повезује често удаљене области гдје се електрична енергија производи са областима у којима је сконцентрисана потрошња. Због тога је свакодневно изложена бројним неповољним утицајима попут атмосферских пражњења, ниским и високим температурама, леду, вјетру и др. Ти утицаји неминовно доводе до појаве кварова који могу изазвати трајна оштећења елемената ЕЕС-а и дуготрајне прекиде напајања. Релејна заштита има задатак да у што краћем времену одвоји елемент са кваром од остатка мреже и тиме минимизује потенцијалну штету. До данас је развијен велики број заштита, али у преносним мрежама високог напона највише се користе дистантне заштите због велике брзине реаговања и селективности и у најсложенијим петљастим мрежама. Дистантне заштите штите вод тако што процјењују удаљеност квара и реагују најбрже на блиске кварове, док на удаљене кварове на сусједним водовима реагују након дуже временске задршке у случају да из неког разлога не одреагују њихове основне заштите.

У технолошком смислу до данас су развијене три генерације заштитних релеја, електромеханички, статички (аналогни) и микропроцесорски (дигитални) релеји. Развој алгоритама за дигиталне заштите почео је много раније него што је ова генерација заштита ушла у комерцијалну употребу. Први комерцијални микропроцесорски релеји су се појавили почетком 80-их година прошлог вијека, а

крајем 90-их улазе у ширу употребу након што је њихова цијена постала довољно ниска уз постигнут висок ниво поузданости и сигурности [1].

Основни предмет истраживања ове дисертације су дистантне заштите електроенергетских водова, односно нови алгоритми дигиталних дистантних заштита. Сваки нови алгоритам се на неки начин тестира и пореди са неким раније прихваћеним методом, како би се показале предности и недостаци предложеног рјешења. За практичну примјену неког алгоритма дистантне заштите најважније су слједеће три особине:

1. Поузданост и сигурност детекције квара;
2. Брзина реаговања;
3. Број рачунских операција за имплементацију алгоритма;

Под поузданошћу детекције квара се подразумијева вјероватноћа реаговања на кварове који се појаве унутар зоне реаговања заштите, док се под сигурношћу подразумијева вјероватноћа нереаговања на кварове изван зоне реаговања заштите [2]. Пошто се дистантне заштите користе у преносним мрежама високог напона неопходно је да имају врло висок ниво поузданости и сигурности, како погрешним реаговањем не би угрозиле стабилност ЕЕС-а. Брзина реаговања је такође врло важна у овим мрежама и она је већа уколико је вријеме протекло између тренутка појаве квара и тренутка када алгоритам пошаље сигнал искључења прекидача краће. Са аспекта практичне примјене ништа мање није важан и број потребних рачунских операција које алгоритам извршава у сваком периоду одабирања сигнала. Постоје алгоритми који упркос добрим осталим особинама не могу ући у практичну употребу због превеликог броја рачунских операција које захтијевају. Једноставност алгоритма је пожељна јер осим што омогућава реализацију заштите на доступном хардверу, смањује и могућност софтверских проблема.

1.1 Преглед тренутног стања у области

Дистантне заштите као критеријум реаговања користе удаљеност квара која се може процијенити на више начина. До данас је развијен велики број алгоритама

дистантних заштита који се према принципу рада могу класификовати у три основне групе [3]:

- Алгоритми базирани на моделу сигнала мјереног на штићеном воду. Сигнал се моделује компонентама основног и неколико виших хармоника, опадајућом једносмјерном компонентом и шумом. Корисна информација најчешће лежи у основном хармонику, па се врши естимација фазора основног хармоника мјерених струја и напона из којих се утврђује да ли је дошло до квара.
- Алгоритми базирани на моделу система. Посматрани дио система се опише диференцијалним једначинама чијим се рјешавањем на основу познатих вриједности мјерених напона и струја одреди локација квара.
- Алгоритми базирани на детекцији путујућих таласа. Кварови на штићеном воду узрокују појаву путујућих таласа које детектује заштита, и на основу њих се одреди локација квара.

Алгоритми на бази модела сигнала имају најширу практичну примјену. За естимацију фазора се користе *DFT (Discrete Fourier Transformation)* [3,4,5,6,7], метод најмањих квадрата (*LES – Least Error Squares*) [3,4,5,8], *DWT (Discrete Wavelet Transformation)* [3,9,10] и др. Ови алгоритми користе покретни прозор података дужине једног периода основног хармоника сигнала (20 ms), па је тиме одређена и брзина детектовања квара која је за највећи број примјена довољно добра. Једна од највећих предности ових алгоритама је добра фреквентна карактеристика јер омогућава елиминацију свих виших хармоника сигнала, а од ње у највећој мјери зависи поузданост и сигурност детекције квара. Из тог разлога ове алгоритме одликује висок ниво поузданости и сигурности уз релативно једноставну имплементацију, јер не захтијевају посебно скуп хардвер у односу на нека друга рјешења. Недостаци су осјетљивост на опадајућу једносмјерну компоненту, која се најчешће елиминише одговарајућим предфилтрима, и осјетљивост на одступање учестаности од претпостављене вриједности.

Алгоритми на бази модела система, односно на бази диференцијалних једначина, имају нешто већу брзину у прелазним режимима након појаве квара у односу на алгоритме из прве групе. Њихов недостатак је и већа осјетљивост на разне

сметње, која је једним дијелом узрокована и апроксимацијама извршеним приликом моделовања мреже. У основи имају лошију фреквентну карактеристику од *DFT* алгоритма па им је и лошија тачност након једног периода од тренутка појаве квара [4,3,11,12,13].

Алгоритми на бази путујућих таласа имају најбржу детекцију квара јер таласи путују брзинама приближно једнаким брзини свјетлости. Алгоритам треба да детектује неколико компоненти таласа које се рефлектују између мјеста квара и других чворова у систему. На основу времена протеклог између одговарајућих компоненти и познате брзине простирања таласа, може се одредити удаљеност квара. Овај метод се развија већ дуже вријеме али још није ушао у комерцијалну примјену. Први разлог је што још није постигнут довољан ниво поузданости и сигурности ових алгоритама због осјетљивости метода на разне шуме, продирање таласа са других водова, немогућност детекције блиских кварова и др. Осим тога, детекција путујућих таласа захтијева веома високу фреквенцију одабирања сигнала, уз веома велики број рачунских операција у сваком периоду одабирања. Из тог разлога би хардвер за реализацију ове врсте заштите био много скупљи у односу на заштите на бази алгоритама из прве двије групе [4,3,14,15,16,17].

Постоји још низ других алгоритама који су усмјерени на побољшање само једног од сегмената процеса детекције квара. Алгоритми на бази неуронских мрежа могу се користити да надомјесте дио сигнала који недостаје у прелазном процесу након zasiћења струјног трансформатора [5]. Алгоритми на бази модификација постојећих рјешења са циљем постизања мање осјетљивости на опадајућу једносмјерну компоненту такође су бројни [18,19,20]. Вријеме детекције квара може бити смањено примјеном прозора података промјенљиве дужине [32].

Као резиме овог поглавља може се констатовати неколико чињеница. Прва је да је алгоритам на бази естимације фазора основног хармоника сигнала примјеном *DFT* прихваћен као референтно рјешење у односу на које се пореде сва друга предложена рјешења и најчешће је примијењен у пракси [1,3]. Његова фреквентна

карактеристика, која елиминише парне и непарне хармонике, представља стандард испод којег би биле угрожене поузданост и сигурност, што није прихватљиво за озбиљну примјену. Осјетљивост на опадајућу једносмјерну компоненту се ублажава примјеном одговарајућих предфилтара, док просјечна брзина реаговања износи око 20 ms.

Друга чињеница је да су веома ријетки радови који се баве процјеном поузданости и сигурности [40-45], иако су то најважније особине за примјену алгоритама неке заштите. У најбољем случају се при неколико одабраних вриједности параметара мреже (попут отпорности лука или локације квара) показује да алгоритам има мање осцилација у излазу, што је показатељ веће поуздности и сигурности, али обимније тестирање при другим вриједностима улазних параметара углавном се не спроводи. Тестирања показују да алгоритми, иако имају боље перформансе за неки опсег улазних параметара, често у неком другом опсегу показују лошије особине, тако да тестирања на малом броју случајева нису довољна за процјену поузданости и сигурности.

Аутори су у већини случајева фокусирани на повећање брзине детекције квара коју илуструју поређењем излазних величина алгоритама. У неким случајевима је за постизање веће брзине реаговања значајно нарушена фреквентна карактеристика алгоритма [27], јер повећање брзине најчешће доводи и до повећања осјетљивости на више хармонике и већих осцилација излазне величине. Проблем је што се тада углавном не провјери колика је вјероватноћа да такав алгоритам лажно реагује, а то је за примјену важније од саме брзине алгоритма.

Што се тиче броја рачунских операција, он такође често остаје у сјенци критеријума брзине детекције квара. То може бити оправдано у случају значајнијег побољшања на пољу брзине, поузданости или сигурности, али ако су ту разлике мале, потребно је скренути пажњу на ову особину јер она постаје пресудна приликом имплементације алгоритма.

1.2 Мотивација и предмет истраживања

Питање поузданости и сигурности заштита постаје све значајније како преносне мреже постају комплексније и са више интерконекција. У таквим мрежама погрешна или неблаговремена реаговања заштита могу да буду један од узрока каскадног испадања водова и распада система као у САД, Канади и Италији 2003. године [21,22] и у Индији 2012. године [23]. Такви догађаји су праћени енормно великим штетама, па се и пред алгоритме релејне заштите постављају све строжији захтјеви. То је један од разлога због којих су радови на проблемима заштите преносних мрежа актуелни у научним публикацијама и представља мотивацију за истраживања презентована у овој докторској дисертацији.

Основни предмет истраживања ове докторске дисертације је развој нових алгоритама дистантних заштита. У радовима [34,35,36,37] је описана једна врста алгоритама дистантних заштита који умјесто *DFT* користе сигнале у временском домену, али су базирани на симулацији рада електромеханичких дистантних релеја, што их чини спорим при детекцији удаљених кварова. Алгоритми које предлажемо су базирани на фазној компарацији сигнала у временском домену, па се не могу директно сврстати ни у једну од три поменуте групе. У суштини су најсличнији алгоритмима из прве групе, у случају да се квар не детектује естимацијом импедансе него посредно, путем фазног поређења посебно формираних нових величина које се добију из естимираних фазора мјерених струја и напона. Наша рјешења не рачунају фазоре, него користе сигнале у временском домену, док приликом фазне компарације детекцију квара врше на основу једносмјерне компоненте [25].

Други предмет истраживања су стохастички модели система у циљу процјене поузданости, сигурности и брзине реаговања алгоритама. Из доступне литературе се може уочити да се стохастички приступ користи при рјешавању разних проблема из области релејне заштите, али врло ријетко за процјену поменутих величина. У раду [38] се користи стохастичка природа појединих параметара при појави квара, како би се побољшало доношење одлука, односно селективност релејне заштите. У [39] је предложен метод за побољшање детекције квара у

изолираним мрежама. У [40] је рађена процјена сигурности, али су у симулацији за све промјенљиве коришћене униформне расподеле, што не одговара стварном стању у мрежи. У [41,42,43] су дате методе за побољшање детекције квара код дистантних заштита гдје је дата вјероватноћа погрешног реаговања заштите у функцији отпорности лука, али су коришћене униформне расподеле промјенљивих без података из реалне мреже. У [44] је слична процјена рађена на тестном моделу мреже са 118 чворова, поново без процјене стварних густина расподела појединих промјенљивих у мрежи. Приједлог методологије за процјену поузданости и сигурности дистантних заштита дат је у [45]. Процјена је заснована на бази одређеног броја критичних сценарија, који су доводили до погрешних реаговања заштита, и додатних симулација мреже под околностима за које се сматра да би могле бити критичне. Овај приступ је у основи детерминистички, а тестирана су три комерцијална дистантна релеја и показано је да су забиљежена неселективна искључења водова која би могла узроковати распад система. Изостанак процјене поузданости, сигурности и расподеле времена реаговања дистантних заштита, у свим наведеним радовима, је основни разлог због којег смо направили стохастички модел мреже за тестирање и поређење алгоритама базиран на подацима из преносних мрежа Босне и Херцеговине и Србије. Циљ је да се за процјену поузданости, сигурности и расподеле брзине реаговања сваки алгоритам тестира на више хиљада кварова, односно да се користе Монте Карло симулације. Параметри симулације се не задају произвољно него се мијењају на случајан начин, али тако да густина расподеле сваког од њих одговара стварном стању у мрежи. То значи да је за ову врсту симулација потребно познавати густине расподела свих значајних промјенљивих попут отпорности лука, оптерећења вода, локације квара и др. За процјену тражених функција прикупили смо вишегодишње записе кварова забиљежене комерцијалним дистантним заштитима у мрежама БиХ, Србије и Хрватске, записе вриједности напона и токова снага на 110kV, 220kV и 440kV водовима у сва четири годишња доба, и симулирали смо трополне кратке спојеве у програмским пакетима *PSS (Power System Simulator)* и *PSA (Power System Assistant)*, како бисмо процијенили снаге мрежа на крајевима анализираних водова. Тиме смо добили могућност поређења наших и других коришћених

рјешења на моделу преносних мрежа у нашем региону. За процјену понашања алгоритама у другим преносним мрежама потребно је или доћи до података из тих мрежа или направити процјену густина расподјеле за величине које сматрамо да су другачије у односу на наше мреже. На примјер, расподјела оптерећења водова може да се помјери на страну виших оптерећења, ако се процијени да такво стање влада у некој другој мрежи.

1.3 Садржај дисертације по главама

У другој глави описан је принцип рада дистантних заштита на бази фазне компарације и реализација најчешће коришћених карактеристика реаговања дистантних заштита. Принцип рада предложених алгоритама фазне компарације у временском домену описан је у трећој глави. У четвртој глави су описани најважнији критеријуми поређења алгоритама, док је у петој глави дато поређење свих алгоритама по критеријуму захтијеваног броја рачунских операција. У шестој глави су детаљно анализирани фреквентне карактеристике предложених алгоритама. Седма глава је посвећена анализи утицаја параметара мреже на детекцију квара код дистантних заштита. У осмој глави су сви алгоритми тестирани детерминистичким приступом. Извођење стохастичког модела мреже и резултати симулација дати су у главама девет и десет. На крају су, у закључку, дати резултати свих тестирања и процјена о томе који од алгоритама је постигао најбоље резултате.

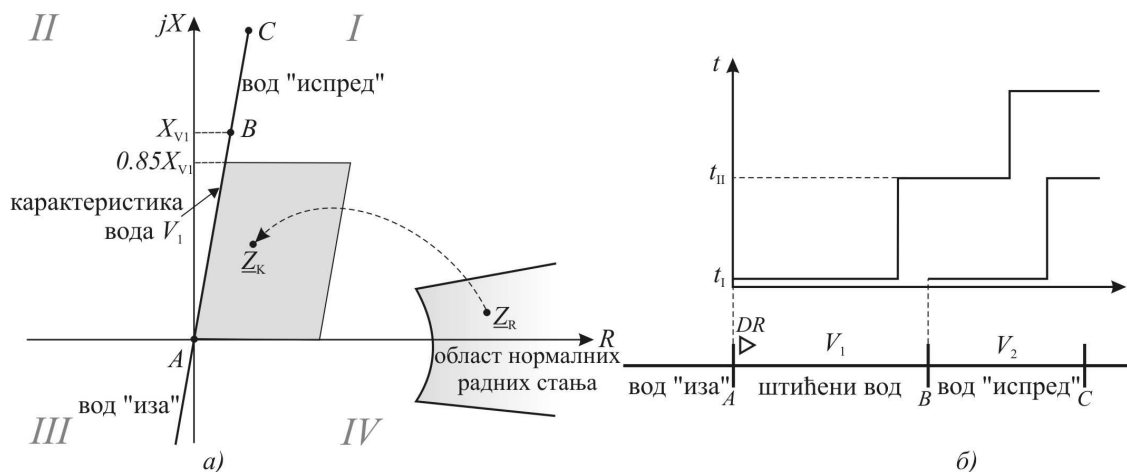
2. ДИСТАНТНЕ ЗАШТИТЕ НА БАЗИ ФАЗНЕ КОМПАРАЦИЈЕ

У овој глави је описан принцип рада дистантних заштита и њихове зоне реаговања. У наставку су детаљно описане карактеристике реаговања реализоване на бази фазне компарације.

2.1 Принцип рада дистантних заштита

Штићени вод је најпогодније приказати у комплексној равни импедансе гдје је карактеристика вода представљена правом линијом чији један крај лежи у координатном почетку, а други крај у тачки која представља погонску (директну) импедансу вода (тачке A и B на слици 2.1а). Посматрана дистантна заштита је инсталисана на почетку вода, односно у тачки A . Задатак дистантне заштите је да у што краћем времену, односно у првој зони реаговања, искључи све кварове који се појаве између почетка вода и тачке на 85% укупне дужине вода. То вријеме је једнако збиру времена реаговања саме заштите и времену потребном да прекидач отвори контакте и прекине струју у колу. Скраћењем досега прве зоне се спрјечава да дистантна заштита неселективно искључи квар на сусједном воду, прије него што одреагује његова заштита (вод V_2 са слике 2.1б). Сигурносна маргина од 15% (код дужих водова може бити и мања) се узима да би се елиминисао утицај грешке мјерних трансформатора, непознавање и промјена стварних вриједности параметара вода и грешке самог алгоритма узроковане бројним факторима о којима ће више ријечи бити у седмој глави. Преосталих 15%

примарно штићеног вода, и дио сусједног вода, штити се у другом степену, односно уз додатно временско кашњење између 150 и 300 ms (t_{II} са слике 2.1б).



Слика 2.1 – а) Област реаговања дистантне заштите б) Вријеме реаговања дистантне заштите у функцији удаљености квара

Удаљеност квара се одређује посредно, рачунањем директне импедансе вода. Да би се из петље квара израчунала директна импеданса вода, потребно је за сваки тип квара користити различите комбинације фазних струја и напона мјерених на мјесту уградње релеја. Зависност напона и струје релеја од врсте квара је представљена у табели 2.1., док се директна импеданса изражава као количник напона релеја \underline{U}_r и струје релеја \underline{I}_r . Удаљеност квара изражена у % једнака је израчунатој директној реактанси израженој у % од укупне реактансе штићеног вода.

Табела 2.1 – Улазне величине релеја за разне врсте кварова

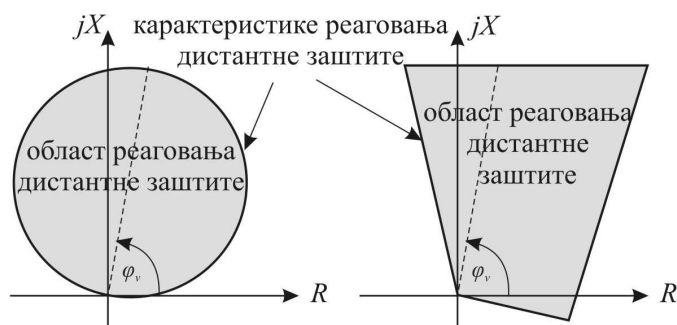
Врста квара	\underline{U}_r	\underline{I}_r
a-g	\underline{U}_a	$\underline{I}_a + k_0 \underline{I}_0$
b-g	\underline{U}_b	$\underline{I}_b + k_0 \underline{I}_0$
c-g	\underline{U}_c	$\underline{I}_c + k_0 \underline{I}_0$
a-b	$\underline{U}_a - \underline{U}_b$	$\underline{I}_a - \underline{I}_b$
b-c	$\underline{U}_b - \underline{U}_c$	$\underline{I}_b - \underline{I}_c$
c-a	$\underline{U}_c - \underline{U}_a$	$\underline{I}_c - \underline{I}_a$

a,b,c-фазе; g-земља; k_0 коефицијент земљоспоја;

У нормалним радним стањима импеданса посматрана са мјеста дистантног релеја (\underline{Z}_R) садржи осим импедансе штићеног вода и импедансу остатка мреже и

потрошње, због чега најчешће лежи далеко од карактеристике штићеног вода у области означеној на слици 2.1а. Када се на воду појави квар, импеданса коју „види“ дистантна заштита се премјешта најчешће у област десно од карактеристике вода (Z_k), осјенчену на слици 2.1а. Основни разлог је тај што су кварови најчешће праћени појавом лука који има природу активне отпорности, али ту су и радно стање вода у тренутку појаве квара, снага мреже на другом крају вода и др. Због тога дистантна заштита треба да реагује на све кварове чија импеданса лежи у широј области око карактеристике вода, уз услов да не реагује даље од подешених 85% дужине вода. Потребно је да се онемогући реаговање и у областима у којима леже импедансе нормалних радних стања као и на воду „иза“ штићеног вода чија карактеристика лежи у трећем квадранту.

Да би се направио компромис између поменутих услова и потребе за што једноставнијом реализацијом саме заштите у пракси се најчешће користе два облика карактеристике реаговања, кружна и полигонална (слика 2.2). Кружна карактеристика је једноставнија за имплементацију, о чему ће више ријечи бити у поглављу 2.2.1, док је предност полигоналне то што боље „покрива“ кварове са луком, тако да у већем проценту детектује кварове унутар дефинисане зоне реаговања.



Слика 2.2 – Карактеристике реаговања дистантне заштите

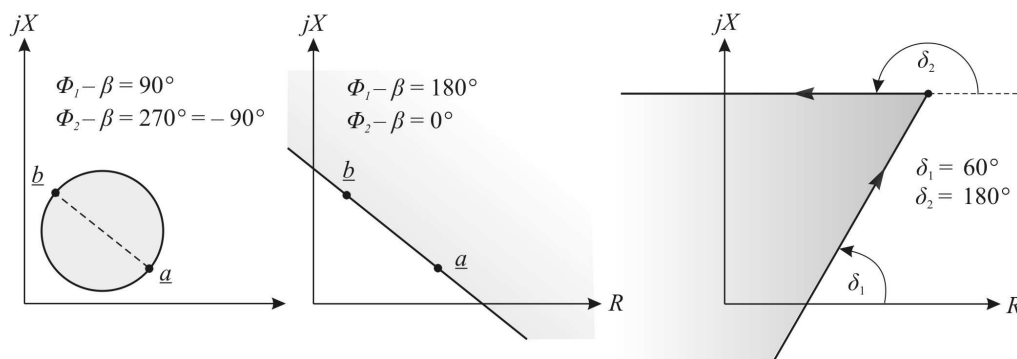
Електромеханички и статички дистантни релеји спадали су у групу најсложенијих и најскупљих заштита (више се не производе али се и даље могу наћи у употреби) јер се састоје од неколико одвојених чланова од којих сваки обавља један дио заштитне функције. Електромеханички релеји индукционог типа имају напонски и струјни намотај, просторно помјерене за 90 степени. Избором конструкционих

константи једноставно се реализују кружна или праволинијска карактеристика реаговања. Комбинацијом праволинијских се добија жељена полигонална карактеристика. Статичке дистантне заштите су реализоване у дискретној техници транзисторима и електронским колима, а најчешће су базиране на принципу амплитудске или фазне компарације. То значи да релеј не рачуна импедансу квара за коју би провјерио да ли лежи у области реаговања заштите, него квар детектује на посредан начин. Тај посредан начин подразумијева да се из напона \underline{U}_r и струје \underline{I}_r (добијених на основу табеле 2.1) формирају помоћни сигнали који се затим пореде по амплитуди или фази. Уколико фазна (или амплитудска) разлика лежи у одређеном опсегу то значи да је квар лоциран у дефинисаној области реаговања, иако није одређена тачна локација импедансе. Овај приступ је коришћен јер је био једноставнији за реализацију у тада доступној техници.

Микропроцесорске заштите имају много шире могућности за имплементацију заштитних функција јер један заштитни терминал, након похрањивања одбирака фазних струја и напона мјерених на воду, може да врши функцију било које заштите помоћу алгорита који дефинише начин на који се обрађују меморисани сигнали. Алгоритми дигиталних заштита на бази модела сигнала врше естимацију фазора основног хармоника сигнала. Након одређивања фазора веома је једноставно да се одреди и импеданса квара, међутим у пракси се и код ових заштита чешће користи принцип фазне компарације. Овај пут разлог је то што је једноставније одредити фазну разлику два помоћна сигнала него за сваку одређену импедансу провјеравати низ услова како би се утврдило да ли лежи у дефинисаној области реаговања која може имати и сложенији облик састављен од низа правих линија и дијелова кружнице. Због тога је као референтни алгоритам за поређење са предложеним рјешењима изабран алгоритам дистантне заштите на бази фазне компарације у фазорском домену, односно на принципу естимације фазора основног хармоника сигнала путем дискретне Фуријеове трансформације (*DFT*).

2.2 Реализација карактеристика реаговања на бази фазне компарације

Фазна компарација омогућава једноставну реализацију три основна облика карактеристике реаговања у комплексној равни импедансе, а то су кружница, права и двије полуправе (слика 2.3). То значи да се кружна карактеристика реаговања једноставно добија примјеном само једног фазног компаратора, док је за реализацију полигоналне карактеристике потребно користити четири фазна компаратора са праволинијском карактеристиком или два фазна компаратора са карактеристиком облика двије полуправе. У неким случајевима је најбоље користити карактеристику реаговања облика двије полуправе у првом квадранту, док се за други и трећи квадрант користи дио кружнице.



Слика 2.3 – Основни облици карактеристике реаговања добијени једном фазном компарацијом

Опште једначине фазне компарације су:

$$\underline{V}_1 = \underline{k}_1 \cdot \underline{U}_r + \underline{k}_2 \cdot \underline{I}_r \quad (2.1)$$

$$\underline{V}_2 = \underline{k}_3 \cdot \underline{U}_r + \underline{k}_4 \cdot \underline{I}_r \quad (2.2)$$

Из улазних сигнала напона \underline{U}_r и струје \underline{I}_r се на основу релација (2.1) и (2.2) добијају сигнали \underline{V}_1 и \underline{V}_2 које је потребно фазно поредити. Коефицијенти $\underline{k}_1 - \underline{k}_4$ морају бити константни и независни од \underline{U}_r и \underline{I}_r . Од њиховог избора зависи облик карактеристике реаговања дистантног релеја. Коефицијенти \underline{k}_1 и \underline{k}_3 су бездимензиони, док коефицијенти \underline{k}_2 и \underline{k}_4 имају димензију импедансе. Ако се гранични углови фазног компаратора означе са Φ_1 и Φ_2 , онда се област реаговања

дистантног релеја може представити скупом тачака комплексне равни у којима важи:

$$\Phi_1 \leq \arg \left\{ \frac{V_I}{V_{II}} \right\} \leq \Phi_2. \quad (2.3)$$

Анализа релација (2.1) и (2.2) у комплексној равни постаје једноставнија ако се умјесто \underline{U}_r и \underline{I}_r посматра импеданса:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_r}{\underline{I}_r}. \quad (2.4)$$

\underline{Z} представља тачку у комплексној равни импедансе у којој важи израз (2.4).

Анализа се даље олакшава увођењем помоћних величина:

$$\underline{a} = -\frac{k_4}{k_3}; \underline{b} = -\frac{k_2}{k_1}; \beta = \arg \left\{ \frac{k_1}{k_3} \right\}. \quad (2.5)$$

Смјеном (2.5) и (2.4) у (2.3) се добија нови израз којим се дефинише област реаговања дистантне заштите:

$$\Phi_1 - \beta \leq \arg \left\{ \frac{\underline{Z} - \underline{b}}{\underline{Z} - \underline{a}} \right\} \leq \Phi_2 - \beta. \quad (2.6)$$

Ради лакшег праћења аргумената количника у комплексној равни импедансе, у изразу (2.6) је потребно и бројилац и именилац поможити са -1 . Након тога се добија погоднији израз којим је одређен скуп тачака \underline{Z} у комплексној равни импедансе које представљају област реаговања дистантног релеја:

$$\Phi_1 - \beta \leq \arg \left\{ \frac{\underline{b} - \underline{Z}}{\underline{a} - \underline{Z}} \right\} \leq \Phi_2 - \beta. \quad (2.7)$$

Област реаговања дистантног релеја је ограничена са двије криве у комплексној равни импедансе које се називају карактеристике реаговања. Карактеристике реаговања се састоје од тачака у комплексној равни у којима су задовољене следеће једначине:

$$\arg \left\{ \frac{\underline{b} - \underline{Z}}{\underline{a} - \underline{Z}} \right\} = \Phi_1 - \beta, \quad (2.8)$$

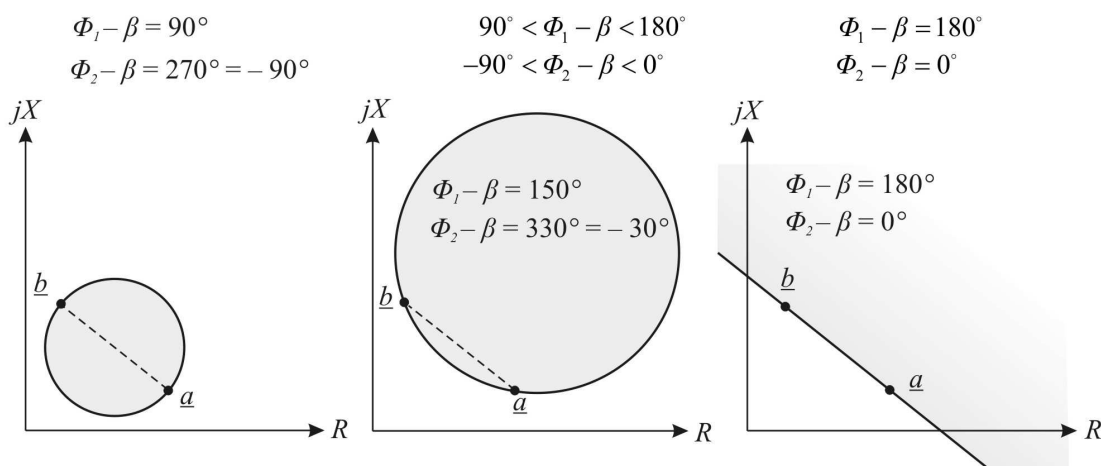
$$\arg \left\{ \frac{\underline{b} - \underline{Z}}{\underline{a} - \underline{Z}} \right\} = \Phi_2 - \beta. \quad (2.9)$$

2.2.1 Реализација кружне карактеристике реаговања

Карактеристика реаговања дистантног релеја има облик кружнице у комплексној равни ако је задовољен следећи услов:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 180^\circ. \quad (2.10)$$

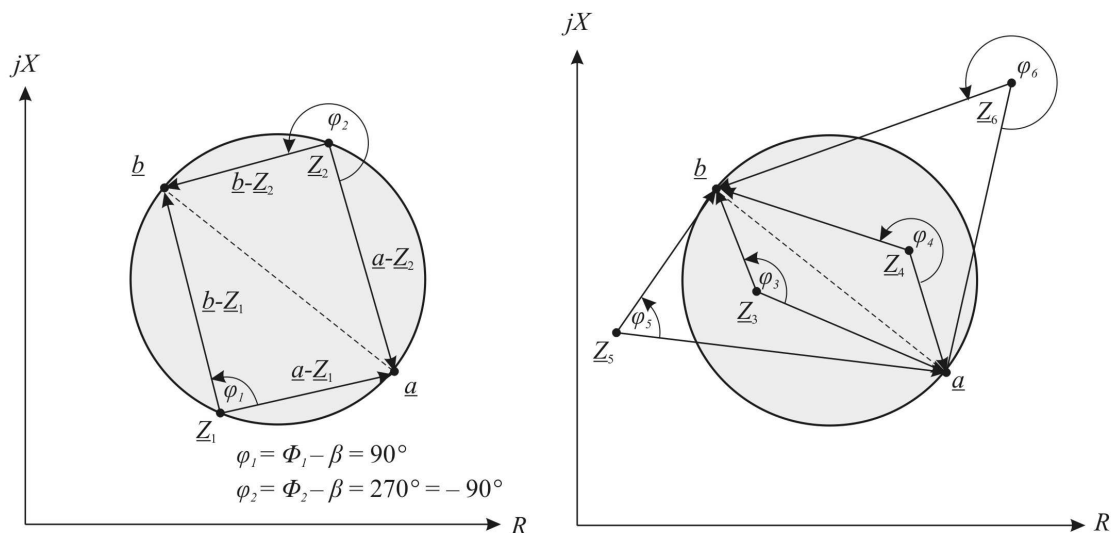
У зависности од односа углова Φ_1 , Φ_2 и β , уз испуњење услова (2.10), могу се појавити три карактеристична облика карактеристике реаговања приказана на слици 2.4. Свака од једначина приказаних на слици представља по један кружни лук између тачака \underline{a} и \underline{b} . Промјеном углова мијења се и однос кружних лукова тако да се кружна карактеристика у граничном случају трансформише у праву код које област реаговања представља читаву полураван (кружницу бесконачног пречника). На слици 2.5 је илустровано да ће за све тачке унутар области реаговања бити испуњен услов (2.7) на примјеру кружнице са слике 2.4а.



Слика 2.4 – Карактеристични облици кружне карактеристике реаговања

На слици 2.5 се може уочити да све тачке из комплексне равни за које вриједи $\Phi_1 - \beta = 90^\circ$ леже на истом луку који чини половину карактеристике реаговања. Примјер је тачка \underline{Z}_1 код које угао између тетива $\underline{b} - \underline{Z}_1$ и $\underline{a} - \underline{Z}_1$ износи 90° . Другу половину карактеристике чини лук на којем лежи тачка \underline{Z}_2 . Тај лук чине све тачке из комплексне равни у којима вриједи услов $\Phi_2 - \beta = 270^\circ = -90^\circ$. Са слике 2.5 се може уочити да угао између тетива $\underline{b} - \underline{Z}_2$ и $\underline{a} - \underline{Z}_2$, означен са φ_2 , износи 270° . На слици је показано и да све тачке из осјенчене области унутар кружнице припадају

области реаговања дистантне заштите јер испуњавају услов (2.7). У случају импеданси \underline{Z}_3 и \underline{Z}_4 одговарајући углови φ_3 и φ_4 леже у опсегу $90^\circ < \varphi < 270^\circ$, док у случају импеданси \underline{Z}_5 и \underline{Z}_6 углови φ_5 и φ_6 не леже у поменутом опсегу.



Слика 2.5 – Илустрација области реаговања код кружне карактеристике

Локација кружне карактеристике у комплексној равни је условљена карактеристиком вода, досегом заштите и условима да карактеристика не залази у трећи квадрант или у област нормалних радних стања. Са слике 2.4 је јасно да се једна те иста кружна карактеристика може добити за разне вриједности коефицијената \underline{a} и \underline{b} . То значи да коефицијенти $\underline{k}_1 - \underline{k}_4$ нису једнозначно одређени што нам оставља могућност да њиховим избором утичемо на особине самог алгоритма. Једна од погодности која може бити остварена је да се једна од тачака \underline{a} или \underline{b} лоцира у координатни почетак. Ми бирамо $\underline{b} = 0$, што значи да је $\underline{k}_2 = 0$, а то смањује потребан број рачунских операција приликом реализације карактеристике. Уз избор $\beta = 0$ углови Φ_1 и Φ_2 постају гранични углови фазне компарације у изразу (2.7). Да би карактеристика била кружна, мора бити испуњен услов (2.10), а за граничне углове фазног компаратора бирамо $\Phi_1 = 90^\circ$ и $\Phi_2 = -90^\circ$ јер те граничне углове има и фазни компаратор у временском домену који ће бити коришћен у алгоритмима. Тачне вриједности осталих коефицијената биће одређене у глави 3 тако да се добије оптимална карактеристика. Нове једначине фазне компарације сада имају облик:

$$\underline{V}_1 = \underline{k}_1 \cdot \underline{U}_r, \quad (2.11)$$

$$\underline{V}_2 = \underline{k}_3 \cdot \underline{U}_r + \underline{k}_4 \cdot \underline{I}_r, \quad (2.12)$$

и дефинишу кружну карактеристику са слике 2.6а. Ако фазну разлику сигнала \underline{V}_1 и \underline{V}_2 означимо са $\alpha = \arg(\underline{V}_1) - \arg(\underline{V}_2)$, онда за све кварове који леже унутар и на самој кружници важи:

$$|\alpha| \geq 90^\circ, \quad (2.13)$$

док за све кварове изван кружнице важи:

$$|\alpha| < 90^\circ. \quad (2.14)$$

Угао пречника кружнице означен је са φ и неопходно је да буде мањи од угла вода ($\varphi < \varphi_L$) како би заштита што боље покривала и кварове са отпорношћу лука. Да би карактеристика увијек покривала задану дужину вода ($0.85 \cdot X_{V1}$) пречник кружнице d зависи од углова φ_L и φ :

$$d = \frac{|\underline{Z}_p|}{\cos(\varphi_L - \varphi)} = \frac{|\underline{Z}_p|}{\cos(\Delta\varphi)}, \quad (2.15)$$

Основни недостатак карактеристике дефинисане изразима (2.11) и (2.12) је у томе што приликом блиских кварова напон релеја постаје близак нули, па није могуће одредити фазну разлику, а тиме ни присуство квара. Пошто преко 70% кварова спада у групу једнополних кратких спојева, овај проблем се једноставно рјешава тако што се у изразу (2.11) умјесто напона релеја \underline{U}_r користи напон здравих фаза означен са \underline{U}_{pol} . Једначине фазне компарације постају:

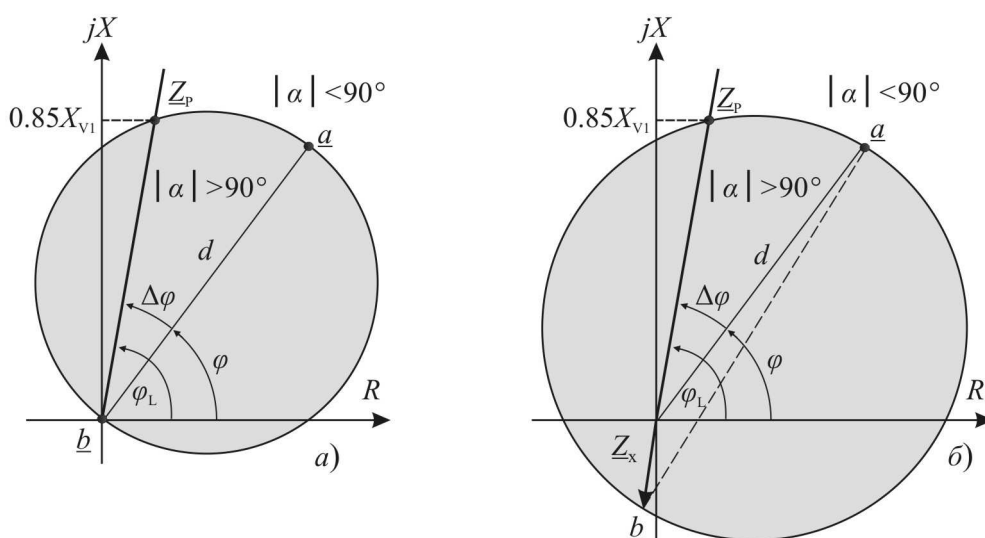
$$\underline{V}_1 = \underline{k}_1 \cdot \underline{U}_{pol}, \quad (2.16)$$

$$\underline{V}_2 = \underline{k}_3 \cdot \underline{U}_r + \underline{k}_4 \cdot \underline{I}_r, \quad (2.17)$$

док је начин формирања сигнала из мјерених фазних струја и напона дат у табели 2.2. Потребно је напоменути да се коефицијенти у колони напона \underline{U}_{pol} бирају тако да напон \underline{U}_{pol} има исти фазни став као напон \underline{U}_r што је неопходно за коректну фазну компарацију. Карактеристика реаговања добијена на овај начин је представљена на слици 2.6б.

Осим што је ријешен проблем неосјетљивости на блиске кратке спојеве, са слике 2.6б се може уочити да ова карактеристика реаговања боље покрива дијелове равни са већом отпорношћу лука, због чега се чешће користи у пракси од

карактеристике са слике 2.6а. У случају блиског трополног кратког споја губе се сви фазни напони па тада ниједна од описаних карактеристика не може детектовати квар, али тај проблем се код дигиталних заштита једноставно рјешава тако што се вриједности напона из неколико периода чувају у меморији и у периоду након појаве квара се користе као референтна величина за фазно поређење.



Слика 2.6 – Кружне карактеристике реаговања дистантне заштите
 а) Поларизација напонем релеја \underline{U}_r б) Поларизација напонима здравих фаза \underline{U}_{pol}

Табела 2.2 – Улазне величине релеја за разне врсте кварова

Vrsta kvara	\underline{U}_r	\underline{I}_r	\underline{U}_{pol}
a-g	\underline{U}_a	$\underline{I}_a + k_0 \underline{I}_0$	$k_{bc}(\underline{U}_b - \underline{U}_c)$
b-g	\underline{U}_b	$\underline{I}_b + k_0 \underline{I}_0$	$k_{ca}(\underline{U}_c - \underline{U}_a)$
c-g	\underline{U}_c	$\underline{I}_c + k_0 \underline{I}_0$	$k_{ab}(\underline{U}_a - \underline{U}_b)$
a-b	$\underline{U}_a - \underline{U}_b$	$\underline{I}_a - \underline{I}_b$	$k_c \underline{U}_c$
b-c	$\underline{U}_b - \underline{U}_c$	$\underline{I}_b - \underline{I}_c$	$k_a \underline{U}_a$
c-a	$\underline{U}_c - \underline{U}_a$	$\underline{I}_c - \underline{I}_a$	$k_b \underline{U}_b$

На први поглед се чини да карактеристика са слике 2.6б није усмјерена јер дијелом лежи и у трећем квадранту па би се могло догодити да заштита реагује и на квар на воду „иза“ штићеног. То се ипак не може десити јер приказани облик карактеристике важи само за кварове у смјеру дистантне заштите, док у случају квара „иза“ релеја карактеристика са слике 2.6б се трансформише у кружницу

мањег пречника која потпуно лежи у првом квадранту тако да нема опасности од погрешног реаговања [24]. Релацијама (2.16) и (2.17), односно сликом 2.6б, дефинисана је кружна карактеристика реаговања која је имплементирана у фазорском и временском домену и тестирана у наставку дисертације.

2.2.2 Реализација карактеристике облика двије полуправе

Премјештањем тачке \underline{a} у бесконачност, могуће је добити карактеристику облика двије полуправе приказану на слици 2.7. У том случају коефицијент $\underline{k}_3 = 0$, па се сигнали за фазно поређење формирају на сљедећи начин:

$$\underline{V}_1 = \underline{k}_1 \cdot \underline{U}_r + \underline{k}_2 \cdot \underline{I}_r, \quad (2.18)$$

$$\underline{V}_2 = \underline{k}_4 \cdot \underline{I}_r. \quad (2.19)$$

Област реаговања је дефинисана изразом:

$$\Phi_1 \leq \arg \left\{ \frac{\underline{k}_1 \cdot \underline{U}_r + \underline{k}_2 \cdot \underline{I}_r}{\underline{k}_4 \cdot \underline{I}_r} \right\} \leq \Phi_2. \quad (2.20)$$

Увођењем смјена:

$$\underline{b} = -\frac{\underline{k}_2}{\underline{k}_1}, \beta_p = \arg \left\{ \frac{\underline{k}_1}{\underline{k}_4} \right\}, \quad (2.21)$$

добија се:

$$\Phi_1 - \beta_p \leq \arg \{ \underline{Z} - \underline{b} \} \leq \Phi_2 - \beta_p. \quad (2.22)$$

Да би нека тачка из комплексне равни импедансе лежала на једној полуправој, мора бити задовољена релација:

$$\arg \{ \underline{Z} - \underline{b} \} = \Phi_1 - \beta_p = \delta_2, \quad (2.23)$$

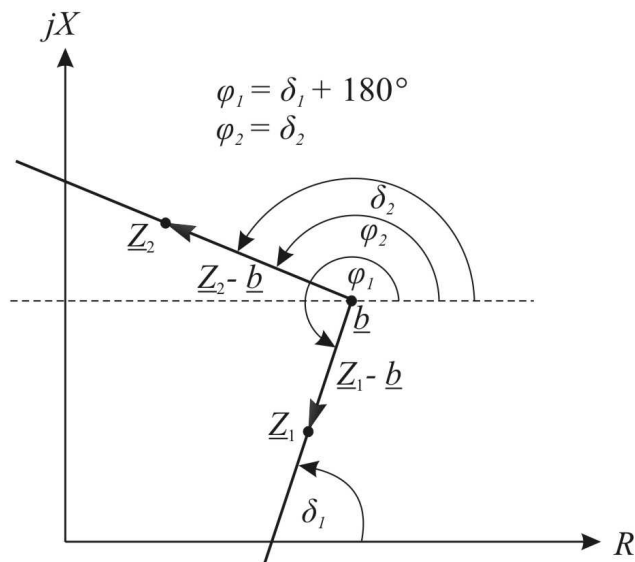
што је приказано на слици 2.7 у случају импедансе \underline{Z}_1 . Може се уочити да вектор $\underline{Z}_1 - \underline{b}$ са реалном осом заклапа угао φ_1 који је једнак $\delta_1 + 180^\circ$. Тачка \underline{Z}_2 која лежи на другој полуправој испуњава услов:

$$\arg \{ \underline{Z} - \underline{b} \} = \Phi_2 - \beta_p = \delta_1 + 180^\circ. \quad (2.24)$$

Условом 2.22 је одређено да област реаговања буде са лијеве стране карактеристике реаговања, односно припада јој координатни почетак.

Комбинацијом претходно изведене карактеристике са двије полуправе, и једне кружне карактеристике добијена је полигонална (тачније речено дјелимично

полигонална) карактеристика која је имплементирана у фазорском и временском домену и детаљно тестирана у дисертацији.



Слика 2.7 – Илустрација карактеристике реаговања облика двије полуправе

2.3 Дистантне заштите на бази естимације фазора

У уводу је речено да се у пракси највише користе алгоритми базирани на моделу сигнала мјереног на штићеном воду, односно алгоритми који врше естимацију фазора основног хармоника сигнала путем дискретне Фуријеове трансформације. Ми користимо један такав алгоритам са кружном, и један са полигоналном карактеристиком, као класична рјешења у односу на које поредимо наша рјешења. Једначине фазне компарације ових алгоритама представљене су релацијама (2.16), (2.17) и (2.18), (2.19). Блок дијаграм дистантног релеја са кружном карактеристиком реаговања представљен је на слици 2.8.

Основа алгоритама је дискретна Фуријеова трансформација која омогућава издвајање косинусне (реалне) и синусне (имагинарне) компоненте фазора основног хармоника сигнала X на основу израза:

$$X_{\text{RE}}(n) = \frac{\sqrt{2}}{m} \sum_{l=0}^{m-1} x(n-l) \cdot \cos(\omega_1 \cdot l \cdot T_{od}), \quad (2.25)$$

$$X_{\text{IM}}(n) = \frac{\sqrt{2}}{m} \sum_{l=0}^{m-1} x(n-l) \cdot \sin(\omega_1 \cdot l \cdot T_{od}). \quad (2.26)$$

Приликом естимације се у сваком тренутку користи m посљедњих одбирака сигнала $x(n)$, при чему m представља број одбирака по једном периоду основног хармоника сигнала. Регистар који садржи m посљедњих одбирака сигнала називамо прозор података. Учестаност основног хармоника сигнала је ω_1 , док T_{od} представља период одабирања сигнала $T_{od} = 2\pi / (\omega_1 \cdot m)$. За потребе релејне заштите може се користити и рекурзивна метода по којој није потребно сваки пут рачунати умношке свих одбирака и коефицијената у изразима (2.25) и (2.26).

Одбирке сигнала треба чувати у регистрима дужине $m+1$, тако да у сваком тренутку буде сачуван и одбирак који је управо „изашао“ из прозора података након што је нови одбирак учитан. Разлика сума у (2.25) и (2.26) у два сусједна периода одабирања је у томе што је из новог прозора података изашао најстарији, а „ушао“ најновији одбирак сигнала. То значи да се нова сума $X_{\text{RE}}(n)$ добија када се старој суми $X_{\text{RE}}(n-1)$ одузме производ одбирка који је изашао из прозора података $x(n-m)$ и коефицијента који га је множио, а дода се производ истог тог коефицијента и новог одбирка $x(n)$. Тиме се значајно смањује потребан број рачунских операција у сваком периоду одабирања. Нови изрази за реалну и имагинарну компоненту фазора су:

$$X_{\text{RE}}(n) = X_{\text{RE}}(n-1) + \cos(\omega_1 \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (x(n) - x(n-m)), \quad (2.27)$$

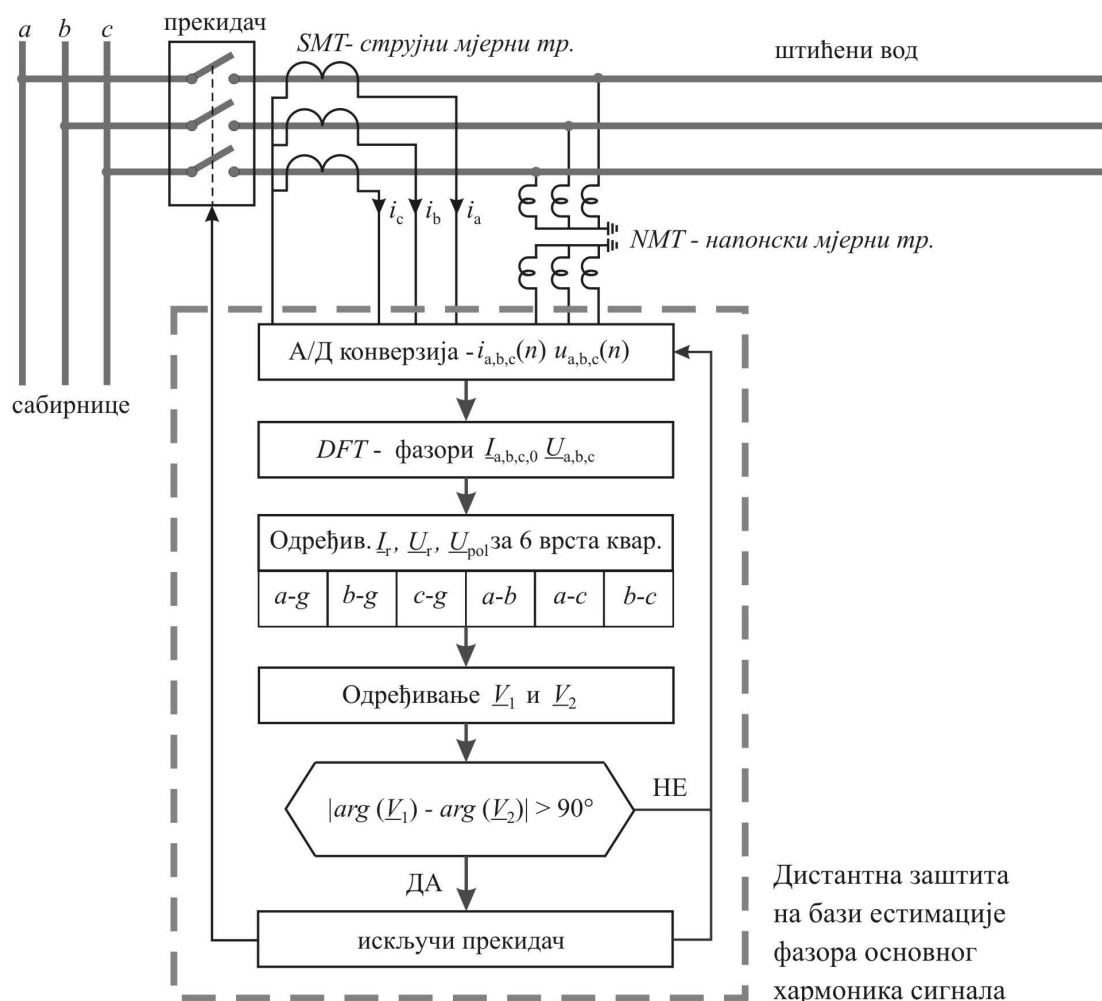
$$X_{\text{IM}}(n) = X_{\text{IM}}(n-1) + \sin(\omega_1 \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (x(n) - x(n-m)). \quad (2.28)$$

На овај начин се губи информација о фазном ставу сигнала, који због ротације коефицијената остаје константан, али фазне разлике сигнала остају тачне због чега је могуће примјењивати овај алгоритам у релејној заштити. Након одређивања X_{RE} и X_{IM} , ефективна вриједност и фазни став основног хармоника се добијају из:

$$X(n) = \sqrt{X_{\text{RE}}^2(n) + X_{\text{IM}}^2(n)}, \quad \varphi_k(n) = \arg(X_{\text{RE}}(n) + jX_{\text{IM}}(n)). \quad (2.29)$$

Овај поступак се понавља након узимања сваког новог одбирка фазних струја и напона са вода. Дужином прозора података је доминантно одређена брзина алгоритма, што у овом случају значи да вријеме потребно да алгоритам са

сигурношћу детектује квар износи око 20 ms. Фреквентне карактеристике ових алгоритама су анализирани у шестој глави.



Први корак у реализацији алгоритама у фазорском домену је да се изврши естимација фазора основног хармоника свих улазних струја и напона мјерених на штићеном воду. Затим се на основу табеле 2.2 одреде фазори напона \underline{U}_r , \underline{U}_{pol} и струје \underline{I}_r . Избором да се детекција квара умјесто рачунањем импедансе врши фазном компарацијом долазимо до тога да је потребно одредити фазоре помоћних сигнала \underline{V}_1 и \underline{V}_2 дефинисане изразима (2.16), (2.17) или (2.18), (2.19). Посљедњи корак је да се нађе фазна разлика сигнала \underline{V}_1 и \underline{V}_2 и провјере услови реаговања заштите. Уколико је изабрана кружна карактеристика реаговања, обавља се само једна фазна компарација, док се за реализацију полигоналне карактеристике

морају извршити двије фазне компарације како би се добила затворена област која не лежи у трећем квадранту. Детаљне анализе и поређење брзине, поузданости, сигурности и потребног броја рачунских операција за реализацију ових референтних алгоритама дате су у дијеловима посвећеним тестирању алгоритама.

3. АЛГОРИТМИ ДИСТАНТНЕ ЗАШТИТЕ НА БАЗИ ФАЗНЕ КОМПАРАЦИЈЕ У ВРЕМЕНСКОМ ДОМЕНУ

У овој глави је дат детаљан опис свих алгоритама дистантних заштита које смо развили у току израде дисертације. У првом поглављу су описане специфичности обраде сигнала у временском домену. У другом поглављу је дата реализација кружне карактеристике реаговања на бази фазне компарације у временском домену. Затим је описан фазни компаратор који се користи у свим предложеним алгоритмима, док је на крају описана реализација полигоналних карактеристика реаговања у временском домену.

Основна идеја на којој почивају алгоритми које смо развили је да се сигнали обрађују и фазно пореде у временском домену. У претходној глави је описана реализација кружне и полигоналне карактеристике реаговања у фазорском домену. Из израза (2.27) и (2.28) се може уочити потребан број математичких операција које треба извршити да би се добили фазори основног хармоника сигнала. Томе се додају операције одређивања напона и струје релеја, затим помоћних сигнала и њихово фазно поређење. Поставља се питање да ли је могуће постићи исте или боље перформансе алгоритма уз мање оптерећење процесора? Главни циљ задржавања сигнала у временском домену је да се избјегне релативно велики број рачунских операција потребан за рачунање фазора. Детаљно поређење потребног броја рачунских операција и других особина алгоритама дато је у петој глави.

3.1 Специфичности обраде сигнала у временском домену

У претходној глави је показано да се жељена карактеристика реаговања може добити за различите вриједности комплексних коефицијената $\underline{k}_1 - \underline{k}_4$ (релације (2.1) и (2.2)), што пружа могућност за утицај на перформансе самог алгорита. Циљ је да видимо како бирати коефицијенте да би алгоритми у временском домену имали што боље карактеристике. Прва препорука је да, ако је могуће, треба усвојити да неки од коефицијената буду нула јер се тиме смањује потребан број рачунских операција. За коефицијенте различите од нуле треба анализирати утицај њиховог модула и аргумента на особине алгорита.

Сви сигнали у релацијама (2.16), (2.17), (2.18) и (2.19) су означени комплексним бројевима јер представљају фазоре њихових основних хармоника, па је карактеристика реаговања приказана у комплексној равни импедансе. Овај приступ је најинтуитивнији и посебно погодан ако се врши естимација фазора сигнала. У случају да желимо задржати таласне облике сигнала, погодније је да се представе у временском домену у виду њихових одбирака. Одбирци су нефилтрирани и осим основног хармоника садрже и све остале „нежељене“ компоненте сигнала. Остаје питање како у временском домену представити коефицијенте $\underline{k}_1 - \underline{k}_4$ који су такође комплексни бројеви, а нису фазори неког сигнала. Узмимо за примјер једначину:

$$\underline{V} = \underline{k} \cdot \underline{S} = k \cdot e^{i\varphi} \cdot \underline{S}, \quad (3.1)$$

гдје \underline{S} представља фазор сигнала чији одбирци су нам познати, \underline{k} представља комплексни коефицијент, док \underline{V} представља фазор неког новог сигнала који желимо добити. Модул комплексног коефицијента (k) представља број којим треба помножити одбирке сигнала $s(t)$, па се намеће закључак да је пожељно бирати коефицијенте гдје је $k = 1$ како би се избјегла потреба за операцијом множења. Аргумент коефицијента φ представља фазни помјерај који треба унијети у оригинални сигнал, односно сигнал треба помјерити у времену за одговарајућу вриједност:

$$T = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (3.2)$$

Уз фреквенцију $f = 50 \text{ Hz}$, $-\pi \leq \varphi \leq \pi$, добија се: $-10 \text{ ms} \leq T \leq 10 \text{ ms}$. Једначина (3.1) у временском домену има облик:

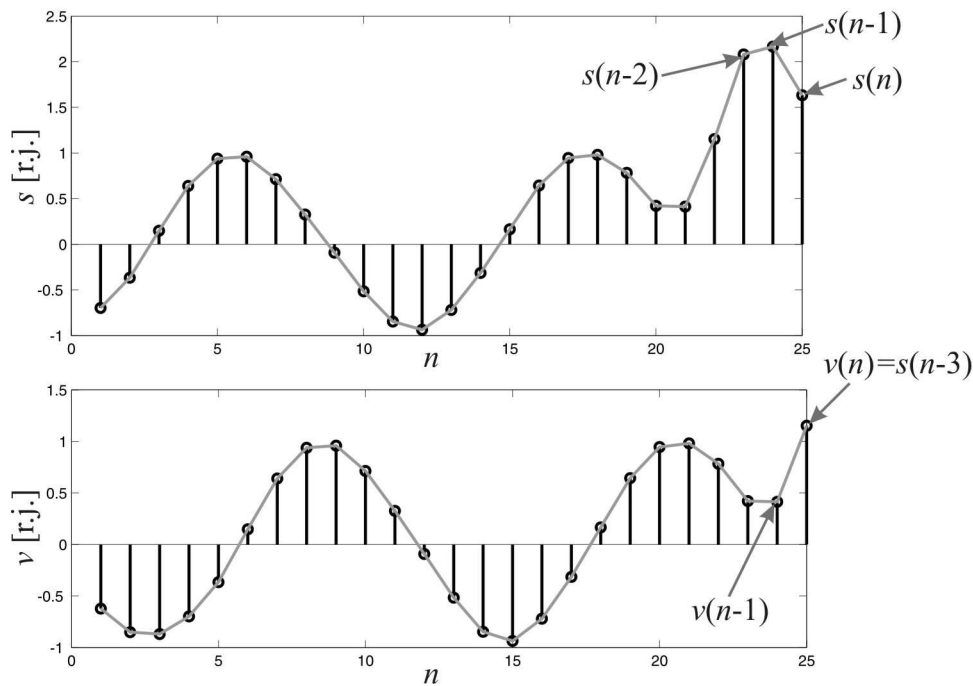
$$v(t) = k \cdot s(t+T). \quad (3.3)$$

Пошто радимо са дискретизованим сигналимa, умјесто времена t имамо ознаку тренутног одбирка n , а умјесто тачног временског помјераја T , користимо најближу дискретизовану вриједност N , тако да је $N \cdot T_{\text{od}} \approx T$. Јасно је да ће грешка због дискретизације бити мања за веће фреквенције одабирања, односно за мање вриједности периода одабирања T_{od} . Једначина (3.3) коначно добија облик:

$$v(n) = k \cdot s(n+N). \quad (3.4)$$

Посматрајмо шта са аспекта обраде сигнала у реалном времену значе позитивни и негативни углови φ . За позитивну вриједност φ добијамо да сигнал $v(n)$ има вриједност $s(n+N)$ помножену неком константом. Пошто се ознака n односи на одбирак сигнала који је последњи добијен у процесу АД конверзије, онда се под $s(n+N)$ подразумијева одбирак сигнала који тек треба да се појави након N периода одабирања, што представља неки тренутак у будућности. Закључак је да једначине треба писати у таквом облику да аргументи свих комплексних коефицијената буду негативни како би их било могуће практично имплементирати.

Посматрајмо сада шта са аспекта брзине детекције квара значе негативне вриједности угла φ . Узмимо за примјер $\varphi = -\pi/2$ и нека сигнал $s(n)$ представља струју фазе на којој се десио кратак спој. То значи да се у тренутку узимања одбирка n , у сигналу $v(n)$ не појављује актуелни одбирак сигнала струје $s(n)$, него стари одбирак $s(n-N)$ који је добијен прије приближно 5 ms . Када се деси квар, прва информација о том догађају се у сигналу $v(n)$ појављује са закашњењем од 5 ms (кашњење сигнала илустровано на слици 3.1). То ће сигурно довести до тога да квар буде детектован са закашњењем, што је велики проблем уколико је циљ да се добије брза заштита. Закључак је да је у циљу добијања што бржих заштита (у смислу брзине детекције квара) потребно настојати да аргументи комплексних коефицијената буду што мањи по модулу.



Слика 3.1 – Утицај аргумента комплексног коефицијента на брзину детекције квара

На крају треба посматрати таласне облике фазних струја и напона у периоду око тренутка појаве квара на фази a . Може се уочити да у тренутку појаве квара код сигнала струје постоји значајна промјена и амплитуде и фазног става (слика 3.2). Код сигнала напона фазни став остаје практично исти, док амплитуда опада обрнуто сразмјерно удаљености квара. Закључак је да се информација о појави квара доминантно налази у сигналу струје, што значи да ако у комплексним коефицијентима мора бити оних са аргументима различитим од нуле, онда треба бирати да они буду у коефицијентима који множе напон.

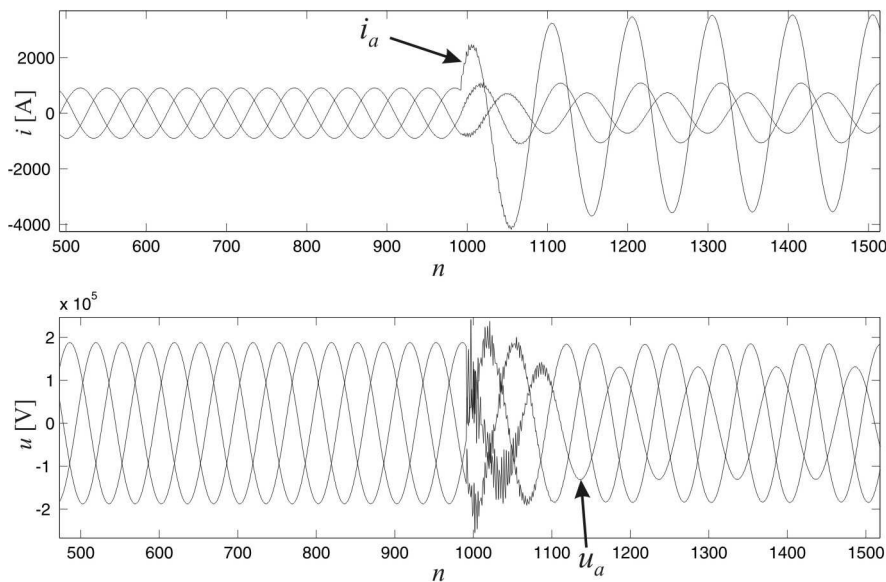
3.2 Реализација кружне карактеристике у временском домену

Вратимо се на изразе којима је дефинисана изабрана кружна карактеристика реаговања (изрази (2.16) и (2.17)) и посматрајмо како их реализовати у временском домену уважавајући закључке из претходног поглавља. У изразима

(2.16) и (2.17) је већ уважено да је тачка $\underline{b} = 0$, што значи да је $\underline{k}_2 = 0$. Тиме је према слици 2.6b и изразу (2.15) одређена и тачка $\underline{a} = d \cdot e^{i\varphi}$. Нама на основу израза (2.5) остаје слобода избора појединачних коефицијената \underline{k}_3 и \underline{k}_4 . Пошто нам је највиши приоритет да због минималног кашњења аргумент коефицијента уз струју буде нула, бирамо $\underline{k}_4 = d$. Тиме је одређена и вриједност $\underline{k}_3 = -e^{-i\varphi}$. Пошто желимо да гранични углови фазног компаратора буду $\pm 90^\circ$, на основу израза (2.7) усвајамо да је $\beta = 0$, односно из израза (2.5) се добија да је $\underline{k}_1 = \underline{k}_3 = -e^{-i\varphi}$. Релације којима је дефинисана кружна карактеристика реаговања добијају коначни облик:

$$\underline{V}_1 = -e^{-j\varphi} \underline{U}_{\text{pol}}, \quad (3.5)$$

$$\underline{V}_2 = -e^{-j\varphi} \underline{U}_r + d \cdot \underline{I}_r. \quad (3.6)$$



Слика 3.2 – Таласни облици струја и напона након појаве једнополног кратког споја фазе a

Ако претпоставимо да фазном помјерају φ одговара временско кашњење од N одбирака, онда релације у временском домену имају облик:

$$v_1(n) = -u_{\text{pol}}(n-N), \quad (3.7)$$

$$v_2(n) = -u_r(n-N) + d \cdot i_r(n). \quad (3.8)$$

Из израза (3.7) и (3.8) се може уочити да се одбирци сигнала струје узимају без кашњења, док кашњења одбирака напонских сигнала одговарају углу око $\pi/4$. Множење струјног сигнала се могло избјећи, али би се множење појавило код оба напонска сигнала па је ово рјешење боље у смислу потребног броја множења. Оваквим избором коефицијената умањени су потенцијални недостаци имплементације алгоритма у временском домену за кружну карактеристику реаговања.

Примијетимо да је угао карактеристике φ са слике 2.6 одређен бројем одбирака N . То значи да се поменути угао може подешавати само у дискретним корацима чија вриједност зависи од фреквенције одабирања сигнала. У табели 3.1 је дат корак подешавања угла $\Delta\varphi$ за различит број одбирака по периоду основног хармоника сигнала m . Пошто угао карактеристике реаговања не мора имати fino подешавање ово практично не може да се сматра значајним недостатком имплементације карактеристике у временском домену.

Табела 3.1 – Утицај броја одбирака на корак подешавања угла карактеристике реаговања за $f = 50 \text{ Hz}$

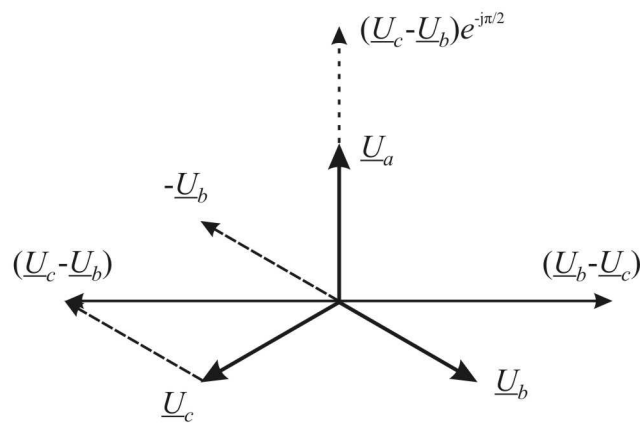
m	20	32	64	128
$\Delta\varphi$ [°]	18	11.25	5.625	2.812

Остаје још да се прокоментарише имплементација комплексних коефицијената из табеле 2.2 . Код формирања напона поларизације помоћу напона фаза које нису погођене кваром, потребно је извршити и фазно помјерање како би замјенски напон $\underline{U}_{\text{pol}}$ био у фази са одговарајућим напоном релеја \underline{U}_r . На слици 3.3 је илустрован примјер једнополног кратког споја фазе a . Може се уочити да фазор напона ($\underline{U}_b - \underline{U}_c$) касни за напоном \underline{U}_a , па му треба додати фазни помјерај од $\pi/2$. Пошто у временском домену не можемо давати позитивне фазне помјераје, остају двије могућности. Прва је да се изврши фазно кашњење од $3\pi/2$, што значи да ће свака промјена бити детектована након приближно 15 ms. Друга могућност је да се одбирци напона узимају са негативним предзнаком што представља фазни помјерај $-\pi$, а при томе се свака промјена напона детектује тренутно. Другим ријечима користимо напон ($\underline{U}_c - \underline{U}_b$). На тај фазни помјерај додајемо још кашњење

од $\pi/2$ (односно кашњење које у одбирцима износи $m/4$) чиме напон $(\underline{U}_c - \underline{U}_b)$ доводимо у фазу са напонам \underline{U}_a . То практично значи да за одбирке поларизационог напона у случају једнополног кратког споја фазе a добијамо:

$$u_{\text{pol}}(n) = u_c(n-m/4) - u_b(n-m/4). \quad (3.9)$$

Можемо извршити и скалирање коефицијентом $1/\sqrt{3}$, али за тим нема потребе јер је код поларизационог напона значајан само фазни став, а не и амплитуда. На истом принципу се одреде и остале поларизационе величине дате у табели 2.2.



Слика 3.3 – Формирање поларизационих напона у временском домену

У колони I_r табеле 2.2 појављује се коефицијент земљоспоја \underline{k}_0 . Вриједност овог коефицијента се одређује из директне и нулте импедансе штићеног вода и износи:

$$\underline{k}_0 = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_d}{3 \cdot \underline{Z}_d}. \quad (3.10)$$

У анализама се често користи апроксимација да је $\underline{Z}_0 = 3 \underline{Z}_d$, односно $k_0 = 2/3$. Ми смо такође усвојили да овај коефицијент буде реалан број користећи формулу:

$$k_0 = \left| \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_d}{3 \cdot \underline{Z}_d} \right|. \quad (3.11)$$

Након свега наведеног, формирање напона и струја релеја из одбирака фазних напона и струја, мјерених на штићеном воду, дато је у табели 3.2. Овим је описан комплетан поступак како од одбирака фазних струја и напона доћи до помоћних сигнала $v_1(n)$ и $v_2(n)$. Као посљедњи корак до детекције квара остаје да се испита да ли фазна разлика сигнала $v_1(n)$ и $v_2(n)$, означена углом α , задовољава

неједначину $|\alpha| > 90^\circ$. У наредном поглављу је описан фазни компаратор који користимо за испитивање поменутог услова.

Табела 3.2 – Улазне величине релеја за разне врсте кварова

Врста квара	$u_r(n)$	$i_r(n)$	$u_{pol}(n)$
<i>a-g</i>	$u_a(n)$	$i_a(n) + k_0 i_0(n)$	$u_c(n-m/4) - u_b(n-m/4)$
<i>b-g</i>	$u_b(n)$	$i_b(n) + k_0 i_0(n)$	$u_a(n-m/4) - u_c(n-m/4)$
<i>c-g</i>	$u_c(n)$	$i_c(n) + k_0 i_0(n)$	$u_b(n-m/4) - u_a(n-m/4)$
<i>a-b</i>	$u_a(n) - u_b(n)$	$i_a(n) - i_b(n)$	$u_c(n-m/4)$
<i>b-c</i>	$u_b(n) - u_c(n)$	$i_b(n) - i_c(n)$	$u_a(n-m/4)$
<i>c-a</i>	$u_c(n) - u_a(n)$	$i_c(n) - i_a(n)$	$u_b(n-m/4)$

3.3 Фазни компаратор на бази интеграла тренутне снаге

За одређивање фазне разлике сигнала v_1 и v_2 користимо чињеницу да смјер активне снаге пружа информацију о томе да ли фазна разлика напона и струје, означена са α , лежи у опсегу $|\alpha| > 90^\circ$ или у опсегу $|\alpha| < 90^\circ$. У нашем случају умјесто напона и струје користимо помоћне сигнале v_1 и v_2 , тако да одређивање активне снаге на овим сигналимa нема физичко значење. Смјер активне снаге, односно њен знак, одређујемо тако што интегралимо тренутну снагу, $p = v_1 \cdot v_2$, на периоду основног хармоника сигнала :

$$P = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p(\tau) \cdot d\tau = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t v_1(\tau) \cdot v_2(\tau) \cdot d\tau. \quad (3.12)$$

Пошто користимо дискретизоване сигнале, интеграл се претвара у суму:

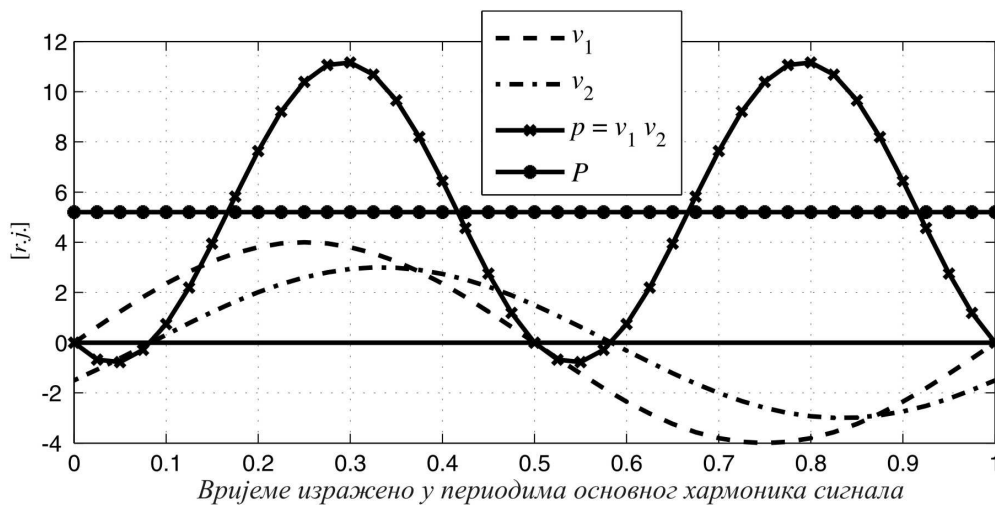
$$P(n) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} v_1(n-k) \cdot v_2(n-k). \quad (3.13)$$

Претходна једначина може да се изрази и у рекурзивној форми пошто ће у два заустопна узимања одбирака разлика у сумама P бити само у томе што ће умножак најстаријих одбирака $v_1(n-m+1) \cdot v_2(n-m+1)$ изаћи из прозора података, а у суму ће ући умножак најновијих одбирака $v_{1n}(n) \cdot v_{2n}(n)$:

$$P(n) = P(n-1) - v_1(n-m) \cdot v_2(n-m) + v_1(n) \cdot v_2(n). \quad (3.14)$$

На овај начин се смањује потребан број рачунских операција које извршава процесор, а не губи се на тачности.

Претпоставимо да сигнали $v_1(n)$ и $v_2(n)$ имају само компоненту основног хармоника фреквенције 50 Hz. Њихов производ се састоји из двије компоненте. Прва компонента има фреквенцију 100 Hz, док је друга компонента једносмјерна, одговара активној снази и зависи од фазне разлике сигнала. Интегралом тренутне снаге се одређује ова једносмјерна компонента, чији знак носи информацију о фазној разлици сигнала. На слици 3.4 су приказани сигнали $v_1(n)$ и $v_2(n)$ чија фазна разлика износи $\alpha = 30^\circ$. Њихов производ осцилује фреквенцијом 100 Hz око средње вриједности P , чија позитивна вриједност указује на то да фазна разлика сигнала лежи у опсегу $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$. Интеграл тренутне снаге представља фазни компаратор чији су гранични углови $\pm 90^\circ$ [31,30,25].

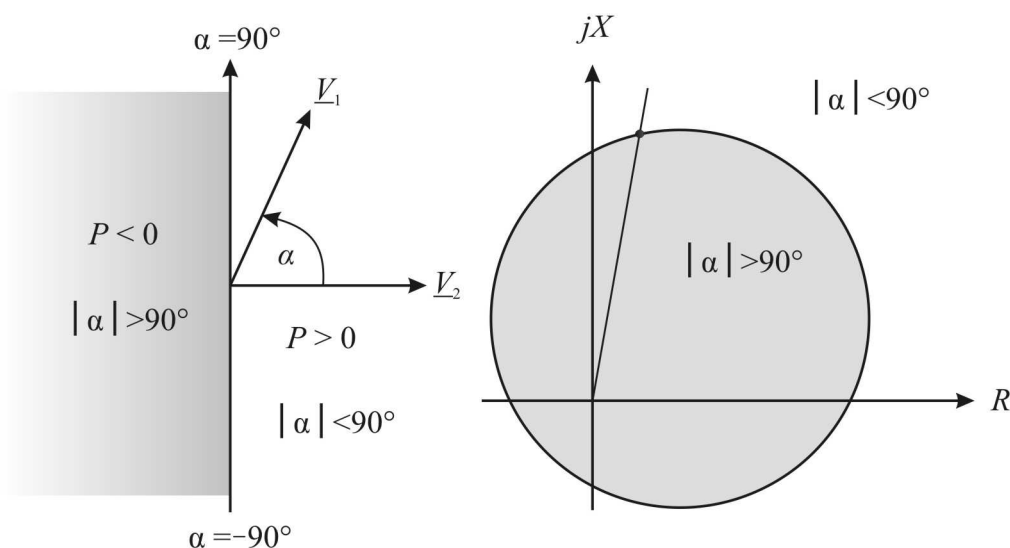


Слика 3.4 – Фазни компаратор на бази интеграла тренутне снаге

Ако сигнал $v_2(n)$ прогласимо референтним онда десна полураван са слике 3.5 представља област у којој је активна снага позитивна, односно $|\alpha| < 90^\circ$, а то у комплексној равни импедансе представља област изван карактеристике реаговања. У лијевој полуравани са слике 3.5 активна снага је негативна, $|\alpha| > 90^\circ$, што одговара области унутар карактеристике реаговања. Из овога слиједи да

дистантна заштита детектује квар када интеграл тренутне снаге сигнала $v_1(n)$ и $v_2(n)$, P , постане негативан.

Фреквенција тренутне снаге је 100 Hz што наводи на закључак да се интеграл може тражити и на периоду 10 ms како би кашњење алгоритма било мање, али у том случају алгоритам би био осјетљив на присуство парних хармоника у сигналу. У случају zasiћења струјног трансформатора грешке алгоритма би биле недопустиво велике, па смо задржали интервал дужине пуног периода основног хармоника за интервал интеграције. Детаљна анализа фреквентних карактеристика интеграла тренутне снага дата је у шестој глави.



Слика 3.5 – Детекција квара на бази интеграла тренутне снаге

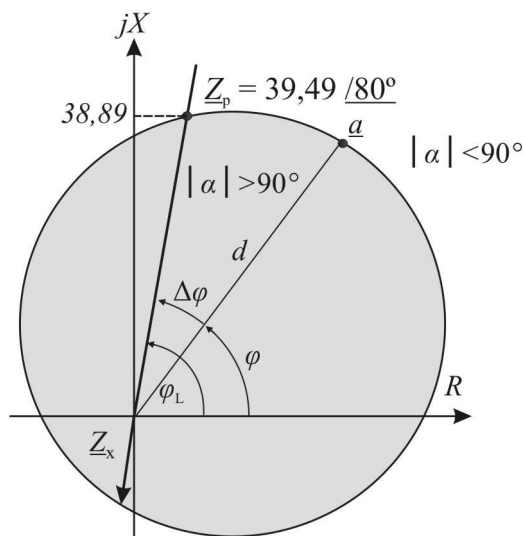
3.3.1 Примјер имплементације кружне карактеристике реаговања

Пошто је описана и посљедња карика детекције квара у временском домену, у наставку наводимо начин избора карактеристике реаговања и њену имплементацију у реалном времену када су познати параметри штићеног вода и фреквенција одабирања. На слици 3.6 је приказана импеданса вода коју треба штитити, $Z_p = 39.49 / 80^\circ \Omega$, коефицијент земљоспоја $k_0 = 0.6$ и број одбирака по периоду основног хармоника сигнала $m = 64$, што одговара фреквенцији одабирања 3200 Hz. Једини параметар који бирамо је угао φ чиме се одређује

досег карактеристике по R оси. Потребно је нагласити да тачан положај карактеристике у комплексној равни зависи и од параметара мреже који су промјенљиви, а утичу на њен привидни помјерај у област трећег квадранта. То значи да нама није познато колики ће заиста бити досег карактеристике по R оси, за разлику од полигоналне карактеристике гдје је то познато. Као што смо навели у табели 3.1, угао φ се може бирати у дискретним корацима од $\Delta\varphi = 5.625^\circ$, па је у табели 3.3 наведено неколико вриједности угла φ и одговарајућих кашњења у одбирцима N . За овај примјер бирамо угао $\varphi = 50.625^\circ$ коме одговара $N = 9$. Параметар d се рачуна на основу израза (2.15). Пошто је задато $\varphi_L = 80^\circ$, слиједи $\Delta\varphi = 90 - 50.625 = 37.375^\circ$, па се добија $d = 39.49 / \cos(\Delta\varphi) = 49.69$.

Табела 3.3 – Зависност кашњења N од угла φ при $m = 64$

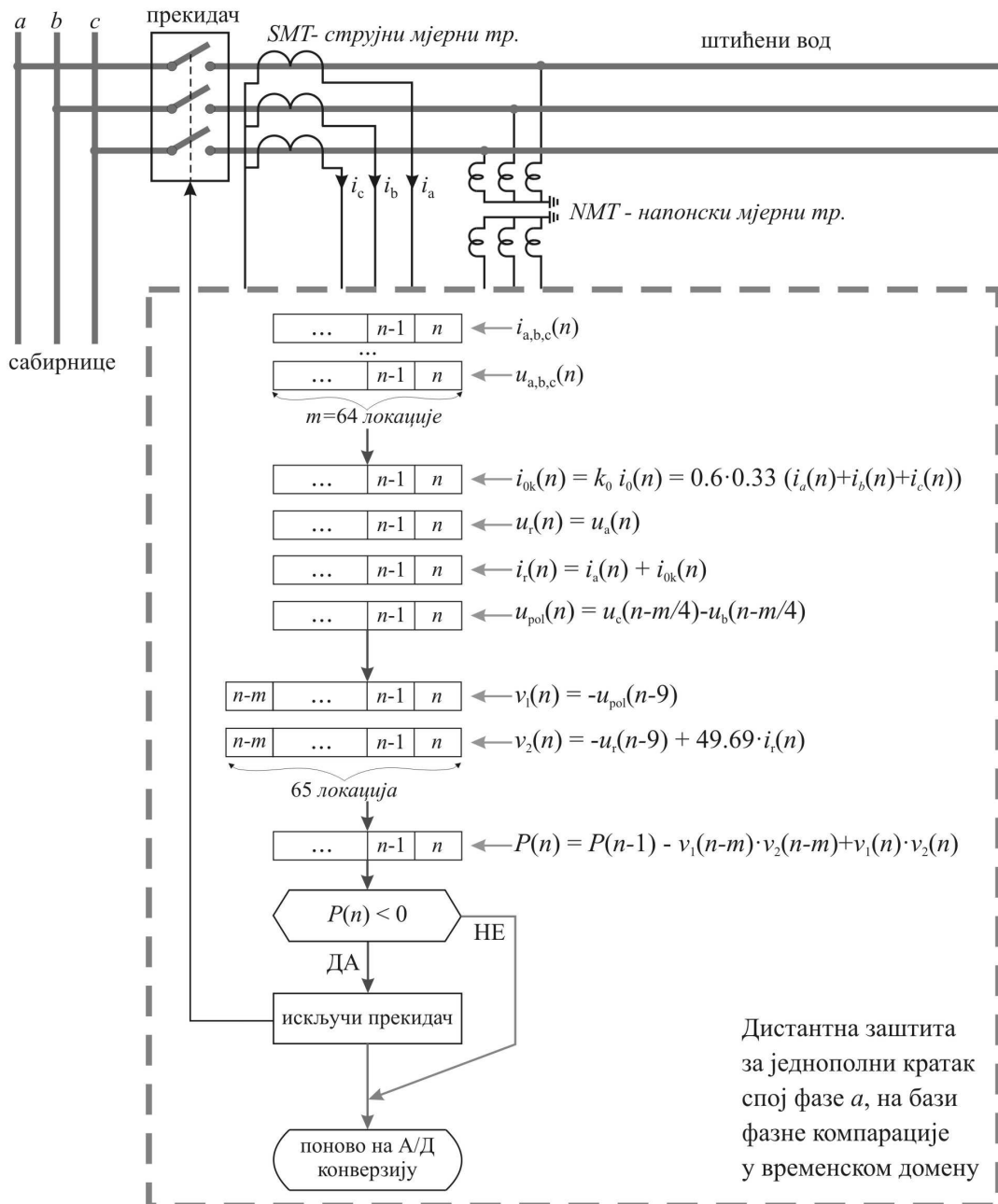
φ [°]	39.375	45.00	50.625	56.25	61.875	67.50	73.125	78.75
N	7	8	9	10	11	12	13	14



Слика 3.6 – Кружна карактеристика реаговања са задатим параметрима

Након претходних корака подешена је жељена карактеристика реаговања чији параметри се похрањују у меморију. На слици 3.7 је приказан блок дијаграм реализације добијене карактеристике за случај једнополниг кратког споја фазе a . На исти начин се реализује карактеристика и за преосталих 5 врста кварова. У првом кораку се фазне струје и напони, мјерени на воду, након одабирања чувају у регистрима тако да су у сваком тренутку доступна бар 64 посљедња одбирка. Након одабирања рачунају се вриједности сигнала $i_{0k}(n)$, $u_r(n)$, $u_{pol}(n)$ и $i_r(n)$. Свака

од ових израчунатих вриједности се такође чува у регистрима тако да су доступне и њихове старије вриједности. У трећем кораку се рачунају $v_1(n)$ и $v_2(n)$, а на крају се на основу њихових вриједности рачуна интеграл тренутне снаге чији негативан знак указује да је квар детектован. Поступак се понавља у сваком периоду одабирања, а поређење потребног броја рачунских операција овог и алгоритма на бази DFT са слике 2.8 дато је у глави 5.

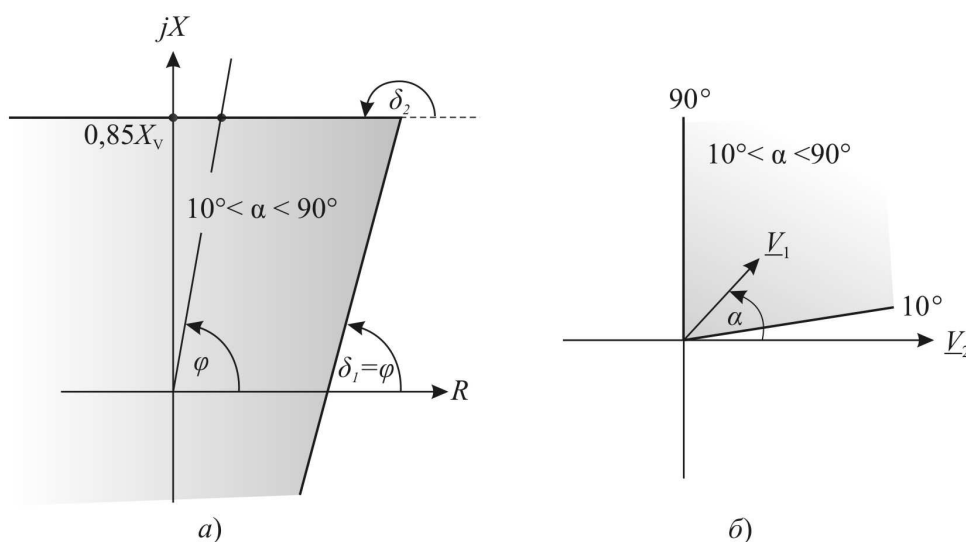


Слика 3.7 – Реализација кружне карактеристике реаговања за једнополни кратак спој фазе a

3.4 Реализација полигоналне карактеристике у временском домену

Реализација полигоналне карактеристике реаговања у временском домену је сложенија него реализација кружне карактеристике. Разлог за то је што карактеристику облика двије полуправе није могуће реализовати помоћу фазног компаратора са граничним угловима $\pm 90^\circ$, који имамо на располагању. Због тога се на почетку овог поглавља прво бавимо начином рјешавања овог проблема, а затим и избором оптималне полигоналне карактеристике.

Узмимо за примјер карактеристику облика двије полуправе приказану на слици 3.8а. Пошто се у пракси често за угао δ_1 усваја вриједност блиска углу штићеног вода [1], изабрали смо $\delta_1 = 80^\circ$. За други угао усвајамо вриједност $\delta_2 = 180^\circ$. Релација (2.21) нам омогућава да бирамо угао β_p па смо у овом случају усвојили вриједност $\beta_p = -170^\circ$. У наставку ће бити више ријечи о оптималном избору овог угла, док у овом примјеру за илустрацију узимамо наведену вриједност. На основу релација (2.23) и (2.24) добијамо углове $\Phi_1 = 10^\circ$ и $\Phi_2 = 90^\circ$. За реализацију карактеристике са слике 3.8а потребно је да фазна разлика између сигнала $v_1(n)$ и $v_2(n)$ лежи у опсегу $10^\circ < \alpha < 90^\circ$, што је илустровано на слици 3.8б. То значи да је потребно имати фазни компаратор са граничним угловима 10° и 90° .

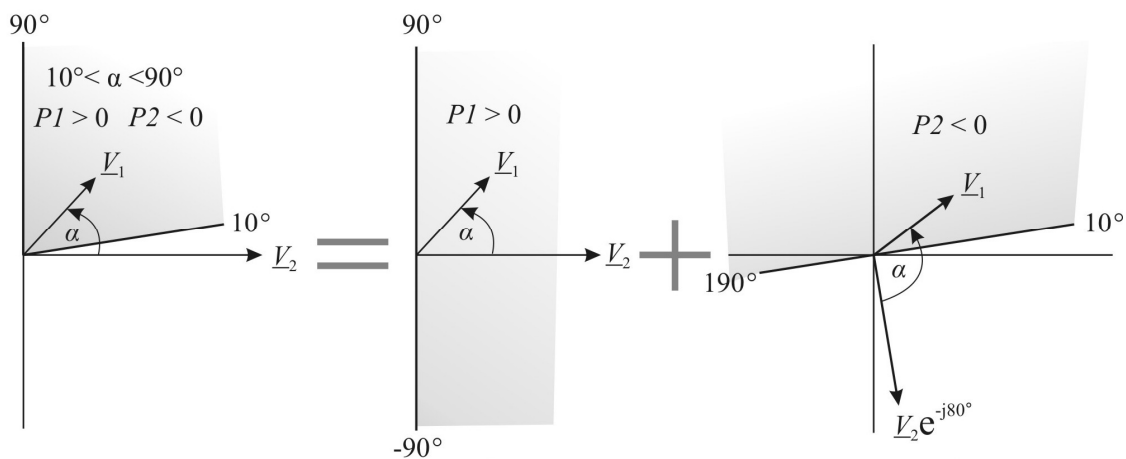


Слика 3.8 – а) Карактеристика облика двије полуправе б) Гранични углови за реализацију карактеристике облика двије полуправе

За реализацију фазног компаратора граничних углова 10° и 90° , помоћу фазног компаратора на бази интеграла тренутне снаге чији су гранични углови $\pm 90^\circ$, ми користимо приступ илустрован на слици 3.9. Да би се покрила предвиђена област (осјенчена област на 3.9а), потребно је извршити двије фазне компарације. Првом фазном компарацијом, уз услов $P1 > 0$, покрива се област између -90° и 90° (осјенчена област на 3.9б). Остаје још да се искључи област између -90° и 10° . То се може постићи тако што се сигнал $v_2(n)$ закасни за 80° , односно за угао δ_1 . Кашњење се реализује узимањем старијих одбирака сигнала како је то описано у поглављу 3.1 ($v_2(n-N)$). Затим се врши фазна компарација сигнала $v_2(n-N)$ и сигнала $v_1(n)$, али сада уз услов $P2 < 0$ како би био покривен опсег углова између 10° и 190° (осјенчена област на 3.9в). Уколико су оба наведена услова испуњена, импеданса квара лежи у осјенченој области са слике 3.8а. Претварање аргумената комплексних коефицијената и углова ротације сигнала $v_1(n)$ и $v_2(n)$ у број одбирака N врши се на основу следеће релације:

$$N = \frac{\theta}{2 \cdot \pi} m, \quad (3.15)$$

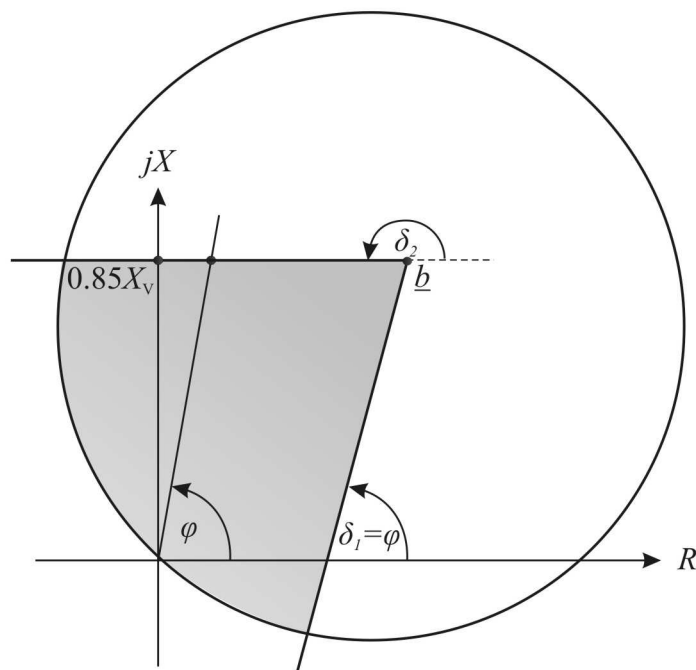
при чему се десна страна релације заокружује на најближи цијели број.



Слика 3.9 – Реализација фазног компаратора са граничним угловима 10° и 90°

Закључак је да је за реализацију карактеристике облика двије полуправе потребно извршити двије фазне компарације на бази интеграла тренутне снаге, док се кружна карактеристика реализује само једном фазном компарацијом. Због тога

смо изабрали да карактеристика реаговања у другом и четвртном квадранту буде реализована кружном умјесто претходно изведеном карактеристиком. Коначни облик полигоналне карактеристике коју користимо и тестирамо дат је на слици 3.10. Код ње је квар детектован ако су истовремено испуњена три услова реаговања, један услов кружне и два услова карактеристике облика двије полуправе.

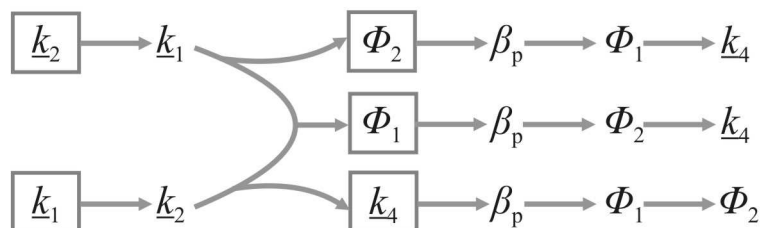


Слика 3.10 – Полигонална карактеристика реаговања

3.4.1 Избор коефицијената полигоналне карактеристике

Питање оптималног избора коефицијената полигоналне карактеристике је много сложеније него што је то случај код кружне карактеристике. Под избором коефицијената подразумевамо избор за карактеристику састављену од двије полуправе са слике 3.10, јер је избор коефицијената кружне карактеристике већ обављен. Коефицијенте треба изабрати тако да се оствари максимална брзина детекције квара, уз што је могуће мање рачунских операција. Неопходно је извршити двије фазне компарације при чему је у барем једној од њих потребно уносити кашњење у сигнал $v_1(n)$ или $v_2(n)$. Отежавајућа околност је у томе што минимизација кашњења по ротацији сигнала $v_1(n)$ или $v_2(n)$ доноси повећање

кашњења код неког од комплексних коефицијената који множе струју $i_r(n)$ и напон $u_r(n)$. На први поглед није могуће уочити да ли ће се смањењем кашњења по једном критеријуму укупно кашњење смањити или повећати због погоршања по неком другом критеријуму. Због тога смо одлучили да анализирамо на који начин зависе једна од друге свих 6 промјенљивих којима су дефинисане карактеристике реаговања и да одредимо путање избора њихових вриједности. У свакој путањи је могуће бирати вриједности за двије величине, док се вриједности преостале четири изводе из претходно изабраних. Између свих могућности, од којих се многе свде на исто рјешење, изабрали смо 6 основних путања избора коефицијената представљених на слици 3.11. Прву групу чине коефицијенти \underline{k}_1 и \underline{k}_2 , при чему избор једног од њих одређује уједно и вриједност другог на основу израза (2.21), јер је тачка \underline{b} одређена параметрима штићеног вода. У другом кораку бирамо вриједност једне од слједеће три величине, Φ_1 , Φ_2 , \underline{k}_4 , након чега остале могу да се изведу из израза (2.21), (2.23) и (2.24). Уоквирене величине сами бирамо док су остале изведене, а једина величина која није задавана независно је угао β_p јер он нема физичког значаја при избору карактеристике. У наставку дајемо параметре свих 6 карактеристика добијених по приказаним путањама, а од њих бирамо три које ће бити имплементиране и детаљно тестиране. Приликом избора уоквирених параметара користимо критеријуме минимизације кашњења и броја рачунских операција алгорита, без обзира на то како се то одражава на остале параметре. Ради што лакшег поређења добијених резултата, за примјер користимо карактеристику чији је положај описан са: $\delta_1 = 80^\circ$, $\delta_2 = 180^\circ$, $\underline{b} = 55 / 45^\circ$, а за број одбирака по периоду основног хармоника сигнала усвајамо $m = 64$.



Слика 3.11 – Избор коефицијената полигоналних карактеристика

Пућања 1

Бирамо:

$\underline{k}_2 = 1$ - због минималног кашњења струје и минималног броја множења;
 $\Phi_2 = 90^\circ$ - како би бар један угао фазне компарације одговарао граничним угловима примијењеног фазног компаратора ($\pm 90^\circ$), чиме је број потребних ротација сигнала $v(n)$ сведен на један.

Остали параметри:

$\underline{k}_1 = -\underline{k}_2 / \underline{b} = 0.0182 \angle -225^\circ$ - примијетимо да би аргумент овог коефицијента узроковао велико кашњење напона. Због тога смо овај број изразили на други начин: $\underline{k}_1 = -0.0182 \angle -45^\circ$. За остале параметре имамо:

$$\beta_p = \Phi_2 - \delta_1 - 180^\circ = -170^\circ, \quad \Phi_1 = \beta_p + \delta_2 = 10^\circ, \quad \arg\{\underline{k}_4\} = \arg\{\underline{k}_1\} - \beta_p = -55^\circ.$$

Пошто је одређен само аргумент коефицијента \underline{k}_4 , усвајамо $|\underline{k}_4| = 1$.

Илустрација реализације ове карактеристике реаговања је дата на слици 3.9, гдје се може уочити да је у другој фазној компарацији потребно ротирати сигнал $v_2(n)$ за угао -80° . Да би се једначине изразиле у временском домену, потребно је фазне помјераје \underline{k}_1 , \underline{k}_4 и ротацију сигнала $v_2(n)$ представити у облику броја одбирака којима уносимо кашњења у сигнал. За кашњење коефицијента \underline{k}_1 добијамо $N_1 = 45^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 8$, за \underline{k}_4 добијамо $N_4 = 55^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 9.78$, па усвајамо вриједност 10 и за ротацију $v_2(n)$ имамо $N_{v_2} = 80^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 14.22$, па усвајамо вриједност 14. Коначно за прву фазну компарацију у временском домену имамо изразе:

$$v_1(n) = -0,0182 \cdot u_r(n-8) + i_r(n), \quad (3.16)$$

$$v_2(n) = i_r(n-10). \quad (3.17)$$

Уколико вриједи $P1 > 0$ (израз (3.14)), испуњен је први услов реаговања и ради се друга фазна компарација сигнала:

$$v_1(n) = -0,0182 \cdot u_r(n-8) + i_r(n), \quad (3.18)$$

$$v_2^*(n) = v_2(n-14) = i_r(n-24). \quad (3.19)$$

Уколико је након друге фазне компарације добијено $P2 < 0$, квар је детектован у дефинисаној области реаговања и генерише се сигнал искључења прекидача на штићеном воду.

Пућања 2

Бирамо:

$$\underline{k}_2 = 1; \quad \Phi_1 = -90^\circ;$$

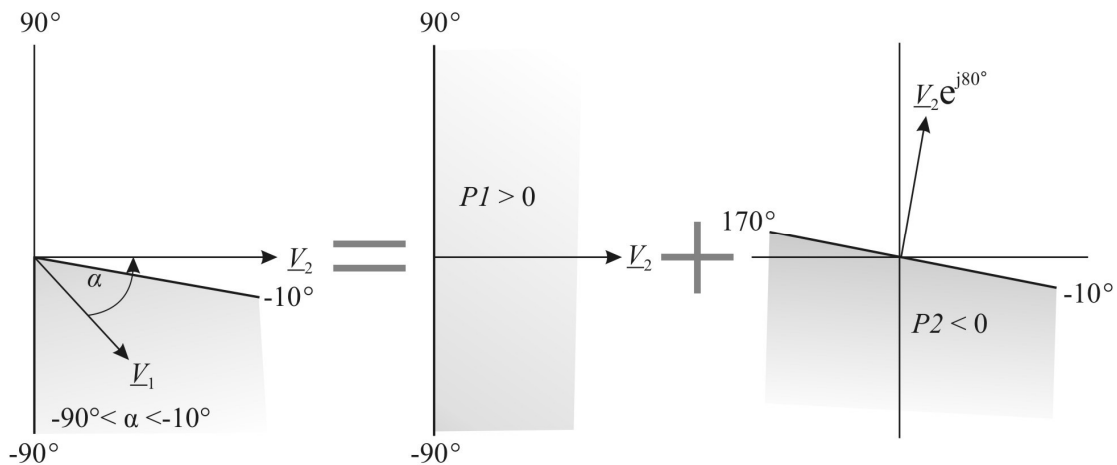
Остали параметри:

$$\underline{k}_1 = -\underline{k}_2 / \underline{b} = 0.0182 / -225^\circ = -0.0182 / -45^\circ;$$

$$\beta_p = \Phi_1 - \delta_2 = 90^\circ; \quad \Phi_2 = \beta_p + \delta_1 + 180^\circ = -10^\circ; \quad \arg\{\underline{k}_4\} = \arg\{\underline{k}_1\} - \beta_p = -135^\circ;$$

$$|\underline{k}_4| = 1;$$

Примијетимо да струја у сигналу $v_2(n)$ у старту касни 135° , док у сигналу $v_1(n)$ не касни. Због тога је другу фазну компарацију боље извршити тако да се сигнал $v_1(n)$ закасни за 80° , умјесто да се $v_2(n)$ закасни за додатних 100° . Илустрација реализације ове карактеристике реаговања је дата на слици 3.12. Кашњење сигнала $v_1(n)$ има исти ефекат као да је сигнал $v_2(n)$ добио позитиван фазни помак од 80° , што је приказано на слици 3.12 уз услов $P2 < 0$.



Слика 3.12 – Реализација полигоналне карактеристике по пућању 2

За кашњење коефицијента \underline{k}_1 добијамо $N_1 = 45^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 8$, за \underline{k}_4 добијамо $N_4 = 135^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 24$. Код ротације $v_1(n)$ имамо $N_{v1} = 80^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 14.22$ па усвајамо вриједност 14. Једначине прве фазне компарације у временском домену су:

$$v_1(n) = -0,0182 \cdot u_r(n-8) + i_r(n), \quad (3.20)$$

$$v_2(n) = i_r(n-24). \quad (3.21)$$

Једначине друге фазне компарације у временском домену су:

$$v_1^*(n) = v_1(n-14) = -0,0182 \cdot u_r(n-22) + i_r(n-14), \quad (3.22)$$

$$v_2(n) = i_r(n-24). \quad (3.23)$$

Пућања 3

Бирамо:

$$\underline{k}_2 = 1; \quad \underline{k}_4 = 1;$$

Остали параметри:

$$\underline{k}_1 = -\underline{k}_2 / \underline{b} = 0.0182 / -225^\circ = -0.0182 / -45^\circ.$$

$$\beta_p = \arg\{\underline{k}_1\} - \arg\{\underline{k}_4\} = -225^\circ; \quad \Phi_1 = \beta_p + \delta_2 = -45^\circ; \quad \Phi_2 = \beta_p + \delta_1 + 180^\circ = 35^\circ;$$

Илустрација реализације ове карактеристике реаговања је дата на слици 3.13. У првој фазној компарацији сигнал $v_2(n)$ касни 55° , док у другој сигнал $v_1(n)$ касни 45° , што је на слици 3.13 илустровано предњачењем сигнала $v_2(n)$ за 45° .

За кашњење коефицијента \underline{k}_1 добијамо $N_1 = 45^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 8$, код ротације $v_2(n)$ имамо $N_{v_2} = 55^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 9.78$ па усвајамо вриједност 10, код ротације $v_1(n)$ имамо $N_{v_1} = 45^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 8$. Једначине прве фазне компарације у временском домену су:

$$v_1(n) = -0,0182 \cdot u_r(n-8) + i_r(n), \quad (3.24)$$

$$v_2^*(n) = v_2(n-10) = i_r(n-10). \quad (3.25)$$

Једначине друге фазне компарације у временском домену су:

$$v_1^*(n) = v_1(n-8) = -0,0182 \cdot u_r(n-16) + i_r(n-8), \quad (3.26)$$

$$v_2(n) = i_r(n). \quad (3.27)$$

Пућања 4

Бирамо:

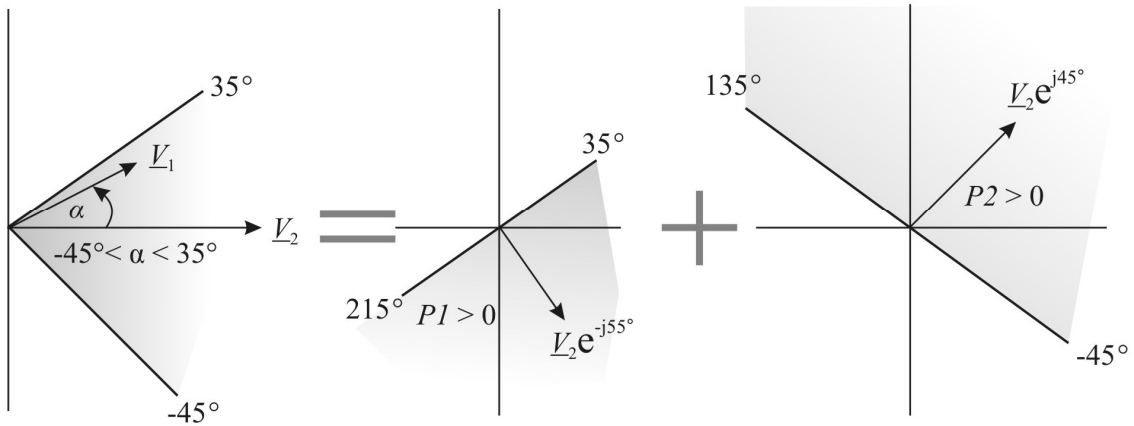
$$\underline{k}_1 = 1 / -180^\circ; \quad \underline{k}_4 = 1;$$

Остали параметри:

$$\underline{k}_2 = -\underline{k}_1 \cdot \underline{b} = 55 / 45^\circ = -55 / -135^\circ.$$

$$\beta_p = \arg\{\underline{k}_1\} - \arg\{\underline{k}_4\} = -180^\circ; \quad \Phi_1 = \beta_p + \delta_2 = 0^\circ; \quad \Phi_2 = \beta_p + \delta_1 + 180^\circ = 80^\circ;$$

Илустрација реализације ове карактеристике реаговања је дата на слици 3.14. У првој фазној компарацији сигнал $v_2(n)$ касни 10° , док у другој сигнал $v_2(n)$ касни 90° .

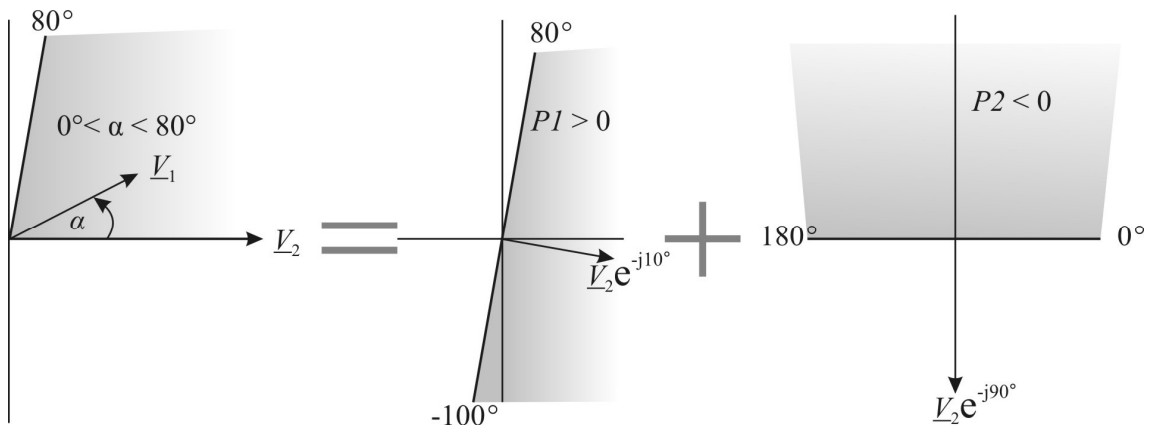


Слика 3.13 – Реализација полигоналне карактеристике по путањи 3

За кашњење коефицијента k_2 добијамо $N_2 = 135^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 24$. Код прве ротације $v_2(n)$ имамо $N_{v_{2a}} = 10^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 1.78$ па усвајамо вриједност 2. Код друге ротације $v_2(n)$ имамо $N_{v_{2b}} = 90^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 16$. Једначине прве фазне компарације у временском домену су:

$$v_1(n) = -u_r(n) - 55 \cdot i_r(n - 24), \quad (3.28)$$

$$v_2^*(n) = v_2(n - 2) = i_r(n - 2). \quad (3.29)$$



Слика 3.14 – Реализација полигоналне карактеристике по путањи 4

Једначине друге фазне компарације у временском домену су:

$$v_1(n) = -u_r(n) - 55 \cdot i_r(n-24), \quad (3.30)$$

$$v_2^*(n) = v_2(n-16) = i_r(n-16). \quad (3.31)$$

Пућања 5

Бирамо:

$$\underline{k}_1 = 1/-180^\circ; \quad \Phi_1 = 10^\circ;$$

Остали параметри:

$$\underline{k}_2 = -\underline{k}_1 \cdot \underline{b} = 55 / 45^\circ = -55 / -135^\circ; \quad \beta_p = \Phi_1 - \delta_2 = 170^\circ;$$

$$\Phi_2 = \beta_p + \delta_1 + 180^\circ = 90^\circ; \quad \arg\{\underline{k}_4\} = \arg\{\underline{k}_1\} - \beta_p = -10^\circ;$$

$$\underline{k}_4 = 1/-10^\circ;$$

Може се уочити да су гранични углови фазног компаратора у овом случају исти као у случају путање 1, па је илустрација реализације ове карактеристике приказана на слици 3.9. Разлика у односу на путању 1 је у коефицијентима.

За кашњење коефицијента \underline{k}_2 добијамо $N_2 = 135^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 24$, док код коефицијента \underline{k}_4 добијамо $N_4 = 10^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 1.78$ па усвајамо 2. Код друге фазне компарације имамо ротацију $v_2(n)$, $N_{v_2} = 80^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 14.22$, усвајамо 14.

Једначине прве фазне компарације у временском домену су:

$$v_1(n) = -u_r(n) - 55 \cdot i_r(n-24), \quad (3.32)$$

$$v_2(n) = i_r(n-2). \quad (3.33)$$

Једначине друге фазне компарације у временском домену су:

$$v_1(n) = -u_r(n) - 55 \cdot i_r(n-24), \quad (3.34)$$

$$v_2^*(n) = v_2(n-14) = i_r(n-16). \quad (3.35)$$

Пућања 6

Бирамо:

$$\underline{k}_1 = 1; \quad \Phi_2 = -90^\circ;$$

Остали параметри:

$$\underline{k}_2 = -\underline{k}_1 \cdot \underline{b} = -55 / 45^\circ = 55 / -135^\circ; \quad \beta_p = \Phi_2 - \delta_1 - 180^\circ = -350^\circ;$$

$$\arg\{\underline{k}_4\} = \arg\{\underline{k}_1\} - \beta_p = -10^\circ; \quad \Phi_1 = \beta_p + \delta_2 = -170^\circ;$$

Илустрација реализације ове карактеристике реаговања је дата на слици 3.15. У првој фазној компарацији сигнал $v_2(n)$ не касни, док у другој сигнал $v_2(n)$ касни 80° .

За кашњење коефицијента k_2 добијамо $N_2 = 135^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 24$, док код коефицијента k_4 добијамо $N_4 = 10^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 1.78$ па усвајамо 2. Код друге фазне компарације имамо ротацију $v_2(n)$, $N_{v_2} = 80^\circ \cdot 64 / (360^\circ) = 14.22$, усвајамо 14.

Једначине прве фазне компарације у временском домену су:

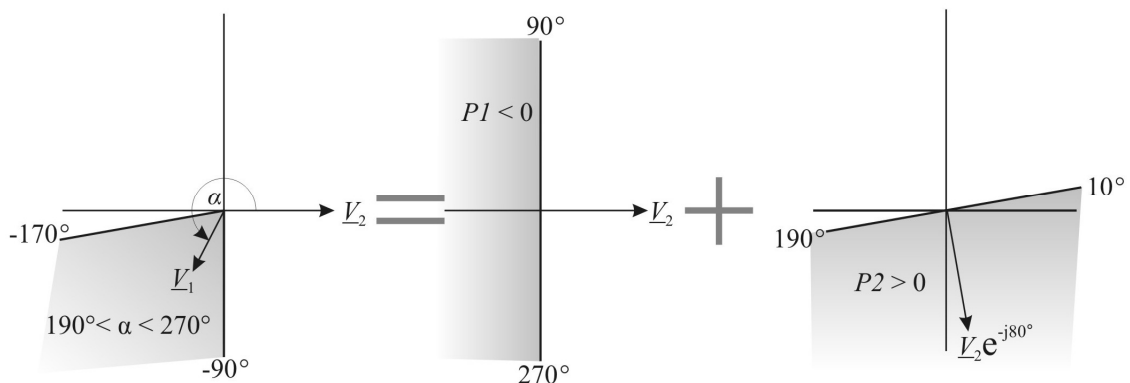
$$v_1(n) = u_r(n) + 55 \cdot i_r(n - 24), \quad (3.36)$$

$$v_2(n) = i_r(n - 2). \quad (3.37)$$

Једначине друге фазне компарације у временском домену су:

$$v_1(n) = u_r(n) + 55 \cdot i_r(n - 24), \quad (3.38)$$

$$v_2^*(n) = v_2(n - 14) = i_r(n - 16). \quad (3.39)$$



Слика 3.15 – Реализација полигоналне карактеристике по путањи б

За процјену укупног кашњења свих б алгоритама треба видјети колико је максимално кашњење струје $i_r(n)$ и напона $u_r(n)$ када се осим коефицијената у обзир узме и ротација сигнала $v_1(n)$ и $v_2(n)$. Преглед максималних кашњења за свих б путања избора коефицијената дат је у табели 3.4. У случају кашњења од 180° у табели стоји вриједност 0° , јер се тај фазни помак може остварити множењем сигнала са -1 .

Табела 3.4 – Преглед максималних кашњења за 6 начина избора коефицијената

	Пућања1	Пућања2	Пућања3	Пућања4	Пућања5	Пућања6
макс. кашњ. i_T	135°	135°	55°	135°	135°	135°
макс. кашњ. u_T	45°	125°	90°	0°	0°	0°

Из табеле табеле 3.4 може се закључити да најмање укупно кашњење струјног сигнала имамо када за коефицијенте који множе струју бирамо јединичне вриједности које не уносе кашњење. То значи да је са аспекта имплементације алгоритма најбољи избор коефицијената дат путањом 3. Те вриједности смо усвојили за наш први алгоритам полигоналне карактеристике који је тестиран. Пућања 2 даје најлошији резултат због највећег кашњења напона, па њу не усвајамо за тестни примјер. Као други примјер за тестирање усвајамо путању 1 гдје очекујемо лошији резултат од претходно изабраног. Избор оптималне вриједности k_1 доводи у сва три сценарија до кашњења струје од 135°. У четвртом случају се захтијевају двије ротације сигнала $v_2(n)$, а у петом и шестом само једна ротација. Због тога за последњи алгоритам за тестирање бирамо онај дат путањом 5.

4. КРИТЕРИЈУМИ ПОРЕЂЕЊА АЛГОРИТАМА

Свака релејна заштита, односно заштитна функција, има неке своје специфичности које отежавају правилну детекцију квара и од којих зависи начин на који ће бити тестирана. Диференцијалне заштите трансформатора морају бити сигурне у току прелазног процеса укључења трансформатора и приликом засићења струјних трансформатора, дистантне заштите приликом осциловања снаге, прекострујне приликом великих вриједности опадајуће једносмјерне компоненте и сл. Ипак, независно од врсте сметњи којима је изложена нека заштита, може се издвојити неколико генералних критеријума које свака од њих мора да испуни у одређеној мјери. У уводу је наглашена улога релејне заштите у хаваријским стањима у мрежи када је угрожена стабилност система. У тим ситуацијима нереаговање, или непотребно реаговање заштите, може узроковати енормне штете код потрошача и у цијелом систему. Због тога се код релејне заштите мрежа високог и врло високог напона као најважније особине намећу поузданост и сигурност детекције квара.

У раду [2] поузданост детекције квара је дефинисана као:

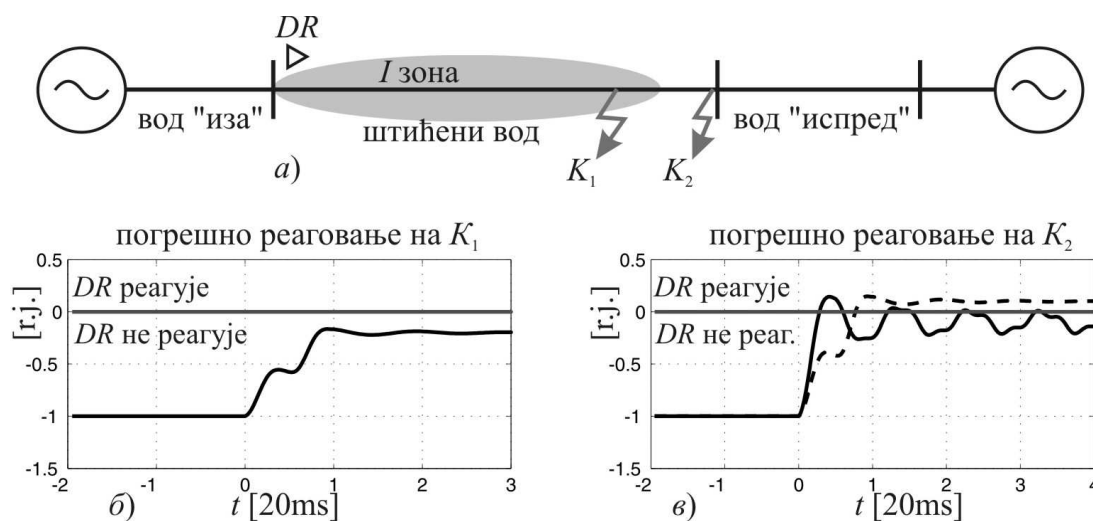
$$Pouzdanost = \left[1 - \left(\frac{\text{broj nereagovanja na kvarove u I zoni}}{\text{broj kvarova u I zoni}} \right) \right] \cdot 100\% . \quad (4.1)$$

Другим ријечима броји се број погрешних реаговања на кварове у првој зони који су на слици 4.1а означени са K_1 . Узроке погрешног реаговања ове врсте, односно

нераговања на квар у зони заштите (слика 4.1б), анализирали смо у глави 7. У истом раду [2] сигурност је дефинисана као:

$$Sigurnost = \left[1 - \left(\frac{\text{број реаговања на кварове изван штићене зоне}}{\text{број кварова изван штићене зоне}} \right) \right] \cdot 100\% . \quad (4.2)$$

Заштита је мање сигурна уколико у већем броју случајева одреагује на кварове који се десе изван њене зоне заштите (квар означен са K_2 на слици 4.1а). Овдје можемо поменути два потенцијална узрока грешке. У првом случају алгоритам из неког разлога квар K_2 препознаје као квар у својој зони заштите (црткана линија на слици 4.1в). У другом случају алгоритам након неког времена правилно препознаје да је квар лоциран изван зоне реаговања, али усљед сметњи у сигнаlima постоје осцилације због којих сигнал у неким тренуцима прелази у зону реаговања заштите (пуна линија на слици 4.1в). Уколико сигурносне задршке нису довољно дуге, ове осцилације изазивају погрешно реаговање заштите.



Слика 4.1 – а) Кварови у и изван зоне реаговања дистанте заштите б) Погрешно реаговање унутар штићене зоне в) Погрешно реаговање изван штићене зоне

У сваком случају, као најважнији критеријум, од релејне заштите се захтијева висок ниво поузданости и сигурности без обзира на врсту заштите. Поставља се питање од чега зависе поузданост и сигурност заштите? Што се тиче особина које треба да посједује алгоритам релејне заштите, доминантан утицај на поменуте особине има фреквентна карактеристика алгоритма. Од ње зависи осјетљивост алгоритма на разне врсте сметњи у сигнаlima који узрокују осцилације са слике

4.1в и лажно реаговање заштите. Фреквентне карактеристике алгоритама су анализиране у глави 6. Што се тиче фактора на које не можемо утицати, то су параметри мреже попут импеданси извора на крајевима вода, отпорност лука, токови снага на штићеном воду и сл. Ови фактори могу узроковати да квар ван зоне буде на мјесту релеја виђен као квар у зони и обрнуто, а анализирани су у глави 7. Ову врсту сметње је тешко елиминисати и увијек постоји нека вјероватноћа да ће квар бити погрешно детектован.

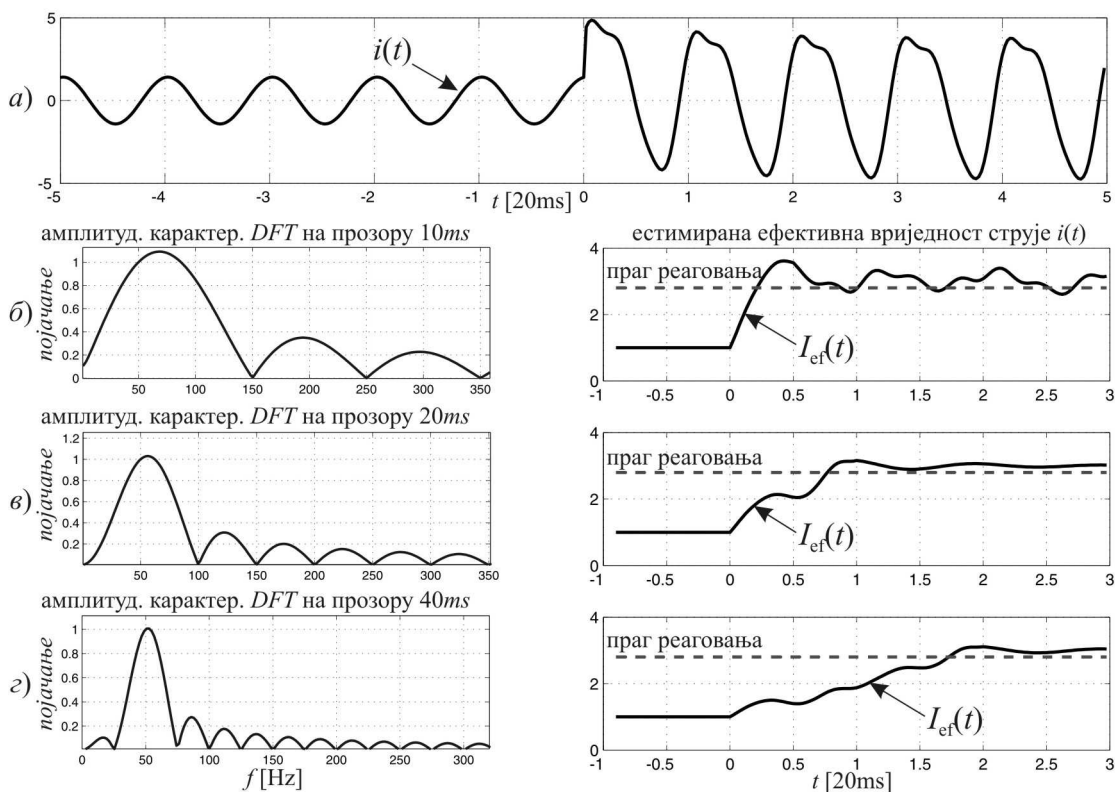
Како процијенити поузданост и сигурност неког алгорита дистантне заштите? За алгоритме који су већ имплементирани у комерцијалним заштитима идеално је ако након више година експлоатације на неком ширем подручју постоји што већи број записа кварова који су сачувани и прикупљени ради анализе. Међутим, то није гаранција да ће анализом бити утврђено право стање јер из меморисаних одбирака струја и напона није увијек могуће утврдити све околности и тачну локацију квара на воду. У сваком случају до оваквих анализа је тешко доћи и мало нам могу помоћи приликом презентовања нових алгоритама. Због тога на располагању имамо рачунарске симулације гдје је на моделу мреже могуће задавати произвољан број кварова и мијењати параметре од интереса. Испоставља се да је и оваквих анализа веома мало и да аутори углавном не дају процјену поузданости и сигурности предложених алгоритама [40-45]. Основни разлог за то је што ова процјена захтијева познавање густине расподјеле параметара у мрежи како би се могао извршити велики број симулација и доћи до тражених бројних вриједности. Пошто је до ових података тешко доћи, а произвољан избор бројних вриједности не даје валидне процјене, аутори углавном презентују фреквентне карактеристике алгоритама и на тај начин укажу на ниво поузданости и сигурности без њихове стварне процјене. У циљу што валидније процјене наведених особина, ми смо прикупљали податке из мрежа Босне и Херцеговине и Србије и у осмој глави презентовали моделе за тестирање алгоритама на бази Монте Карло симулација.

У високонапонским преносним мрежама се из разлога очувања стабилности система захтијева и велика брзина реаговања на кварове. Постизање веће брзине

реаговања је углавном у супротности са очувањем поузданости и сигурности. У неким радовима аутори постижу побољшање брзине реаговања уз нарушавање фреквентних карактеристика алгоритма [27], при чему не пружају увид о нивоу поузданости и сигурности предложеног рјешења. На слици 4.2 су илустровани односи фреквентних карактеристика и брзине реаговања три алгоритма (вријеме изражено у периодима основног хармоника сигнала). Као примјер су приказане естимације ефективне вриједности заданог сигнала $i(t)$ (слика 4.2а) који у тренутку квара осим опадајуће једносмјерне компоненте има по 10% другог и трећег хармоника. Сва три алгоритма су базирана на дискретној Фуријеовој трансформацији, с тим што имају различите дужине прозора података. У првом случају дужина прозора је половина периода основног хармоника сигнала (слика 4.2б), што даје највећу брзину реаговања, али фреквентна карактеристика показује да парни хармоници нису елиминисани и узрокују осцилацију сигнала I_{ef} , што може довести до погрешног реаговања заштите. Иако су вриједности парних хармоника у мрежи најчешће занемариве, они се јављају приликом засићења струјних трансформатора што ове алгоритме чини неподесним за практичну примјену у мрежама гдје се захтијева висок ниво поузданости и сигурности. Други алгоритам има прозор дужине једног периода T_{oh} , елиминише све више хармонике и вријеме детекције квара је приближно 20 ms (слика 4.2в). Код трећег алгоритма прозор је проширен на $2T_{oh}$, што доводи до још боље фреквентне карактеристике која елиминише и неке међухармонике, али када погледамо естимирану ефективну вриједност уочавамо да је кашњење детекције квара око 2 пута веће (слика 4.2г). То је превелика цијена за одзив код кога је ниво осцилација приближно исти као код претходног алгоритма. Закључак је да је оптимална дужина прозора од једног периода основног хармоника сигнала, што представља уједно и очекивано кашњење детекције квара.

Код процјене брзине реаговања аутори најчешће приказују неколико карактеристичних кварова гдје се види колико је скраћено вријеме детекције квара у односу на алгоритам базиран на DFT [9,10]. Избор параметара приликом тих тестирања је произвољан, па резултат не даје општу слику брзине реаговања нити њену расподјелу за неке реалне услове у мрежи. Због тога смо искористили

модел мреже представљен у осмој глави како бисмо одредили расподелу брзина реаговања свих тестираних алгоритама и упоредили њихове просјечне брзине реаговања добијене из великог броја симулација кварова.



Слика 4.2 – а) Тестни сигнал струје; Фреквентна карактеристика и естимирана ефективна вриједност струје Фуријеовог филтра када је дужина прозора података једнака б) половини периода основног хармоника сигнала $T_{oh}/2$ в) T_{oh} г) $2T_{oh}$

Као посљедњи значајан критеријум поређења алгоритама наводимо број рачунских операција који се извршава у сваком периоду одабирања. У почетку су алгоритми били врло једноставни како би могли бити имплементирани на терминалима са веома slabим процесорима и са мало меморијских капацитета. Једноставност је за цијену имала врло лоше фреквентне карактеристике алгоритама. Развојем рачунара постало је могуће имплементирати алгоритме на бази *DFT* који се и данас најчешће користе у пракси због добрих фреквентних карактеристика. Постоје и алгоритми који се развијају деценијама (као што су алгоритми на бази путујућих таласа), али које још није могуће имплементирати

због превеликих захтјева у погледу броја рачунских операција и веће осјетљивости на сметње [3, 4,14,15,16,17]. Због тога је за практичну имплементацију алгоритама пожељно имати што мање хардверске захтјеве уз очување високог нивоа поузданости и сигурности детекције квара. У петој глави смо дали поређење наших и алгоритама на бази *DFT* по критеријуму потребног броја рачунских операција.

5. ПОРЕЂЕЊЕ АЛГОРИТАМА ПО КРИТЕРИЈУМУ БРОЈА ОПЕРАЦИЈА

Након извођења кружне и полигоналне карактеристике у временском домену, одлучили смо да детаљно тестирамо 6 алгоритама. Прва два алгорита су са кружном карактеристиком реаговања, један базиран на DFT који представља класично рјешење (ознака MNO_{DFT}), чије излазе поредимо са нашим алгоритмом у временском домену (MNO). Затим тестирамо један алгоритам са полигоналном карактеристиком базиран на DFT ($POLI_{DFT}$) и претходно изабрана три алгорита у временском домену са полигоналном карактеристиком ($POLI1$, $POLI2$, $POLI3$). У овој глави алгоритме поредимо по критеријуму броја рачунских операција.

На слици 5.1 приказана је кружна карактеристика реаговања и њена имплементација у временском домену (изрази са слике 3.7) и путем DFT (релације 3.5 и 3.6). Слика показује само реализацију заштите од једнополног кратког споја фазе a , док је за осталих 5 врста кварова потребно додати одговарајуће изразе. На основу табеле 3.2 може се уочити да ће за сваки тип квара укупан број рачунских операција бити исти, па број операција у изразима испод ознаке квара треба помножити са 6. На примјеру конкретне карактеристике реаговања можемо упоредити потребан број рачунских операција у сваком од наведених приступа. Знакове \pm збрајамо заједно и називамо *укупан број сабирања*, док знакове множења и дијелења (које се јавља врло ријетко) заједно називамо *укупним бројем множења*. У табели 5.1 су приказани резултати када се саберу рачунске операције за комплетну заштиту која покрива свих 6 врста кварова.

Табела 5.1 – Поређење потребног броја рачунских операција приликом реализације комплетне заштите вода кружном карактеристиком реаговања

Предложени алгоритам у временском домену (МНО)		Алгоритам у фазорском домену (МНО _{DFT})	
укупан број множења	укупан број сабирања	укупан број множења	укупан број сабирања
19	44	86	106
укупна број операција: 63		укупна број операција: 192	

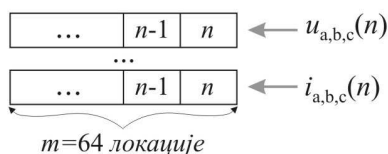
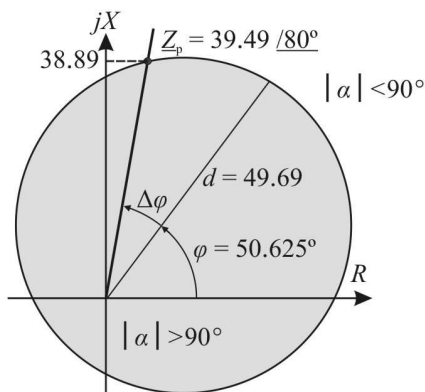
У табели 5.1 није наведено да је у фазорском домену потребно 12 пута реализовати и функцију *аркустангенс*. У случају да се вриједност ове функције рачуна, то захтијева одређен број сабирања и множења, зависно од жељене тачности. Други начин је да се у меморију похране вриједности функције у одређеном броју тачака па да се усваја приближна вриједност. У сваком случају то је додатни недостатак класичног рјешења у односу на предложено. Из табеле 5.1 се може уочити да наш приступ у реализацији кружне карактеристике реаговања захтијева 67% мање рачунских операција (и мање меморије за реализацију функције *аркустангенс*) него класичан приступ базиран на Фуријеовој трансформацији.

На слици 5.2 приказана је полигонална карактеристика реаговања и њена имплементација у временском домену. Као примјер изабрана је полигонална карактеристика *POL11* добијена усвајањем коефицијената у путањи 3 у глави 3. Друге двије имплементације полигоналне карактеристике нису наведене јер је захтијевани број рачунских операција приближно исти као у случају *POL11*. Иста карактеристика је реализована и на бази *DFT* како би била поређена са нашим рјешењем. Кружни дио карактеристике је реализован као у претходном примјеру, с том разликом што се користи кружница много већег полупречника и што се умјесто поларизационог u_{pol} користи напон релеја u_r , па карактеристика и визуелно пролази кроз координатни почетак. Пошто се ова карактеристика користи само у другом и четвртном квадранту, коришћењем u_r не губи се ништа, а елиминише се потреба за рачунањем и меморисањем поларизационог напона u_{pol} .

У случају блиских трополних кратких спојева информација о смјеру квара може бити добијена из меморисаних одбирака напона релеја. Из табеле 5.2 се може уочити да након збрајања потребног броја операција за свих 6 врста кварова на воду, наш приступ у реализацији полигоналне карактеристике реаговања захтијева 29% мање рачунских операција него класичан приступ базиран на Фуријеовој трансформацији. На то треба додати и мање меморијских захтјева због реализације функције *аркустангенс* која се код алгоритма на бази *DFT* рачуна 24 пута.

Табела 5.2 – Поређење потребног броја рачунских операција приликом реализације комплетне заштите вода кружном карактеристиком реаговања

Предложени алгоритам у временском домену		Алгоритам у фазорском домену	
укупан број множења	укупан број сабирања	укупан број множења	укупан број сабирања
55	86	86	112
<i>укупна број операција: 141</i>		<i>укупна број операција: 198</i>	



Реализација у временском домену
МНО

$$i_{ok}(n) = k_0 \cdot i_0(n) = 0.6 \cdot 0.33 \cdot (i_a(n) + i_b(n) + i_c(n))$$

квар фазе a ($a-g$)

$$u_r(n) = u_a(n)$$

$$i_r(n) = i_a(n) + i_{ok}(n)$$

$$u_{pol}(n) = u_c(n-m/4) - u_b(n-m/4)$$

$$v_1(n) = -u_{pol}(n-9)$$

$$v_2(n) = -u_r(n-9) + 49.69 \cdot i_r(n)$$

$$P(n) = P(n-1) - v_1(n-m) \cdot v_2(n-m) + v_1(n) \cdot v_2(n)$$

$$P(n) < 0$$

Реализација у фазорском домену
МНО_{DFT}

$$U_{aRE}(n) = U_{aRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_a(n) - u_a(n-m))$$

$$U_{aIM}(n) = U_{aIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_a(n) - u_a(n-m))$$

$$U_{bRE}(n) = U_{bRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_b(n) - u_b(n-m))$$

$$U_{bIM}(n) = U_{bIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_b(n) - u_b(n-m))$$

$$U_{cRE}(n) = U_{cRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_c(n) - u_c(n-m))$$

$$U_{cIM}(n) = U_{cIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_c(n) - u_c(n-m))$$

$$I_{aRE}(n) = I_{aRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_a(n) - i_a(n-m))$$

$$I_{aIM}(n) = I_{aIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_a(n) - i_a(n-m))$$

$$I_{bRE}(n) = I_{bRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_b(n) - i_b(n-m))$$

$$I_{bIM}(n) = I_{bIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_b(n) - i_b(n-m))$$

$$I_{cRE}(n) = I_{cRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_c(n) - i_c(n-m))$$

$$I_{cIM}(n) = I_{cIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_c(n) - i_c(n-m))$$

$$I_{okRE}(n) = 0.6 \cdot 0.33 \cdot (I_{aRE}(n) + I_{bRE}(n) + I_{cRE}(n))$$

$$I_{okIM}(n) = 0.6 \cdot 0.33 \cdot (I_{aIM}(n) + I_{bIM}(n) + I_{cIM}(n))$$

квар фазе a ($a-g$)

$$U_{rRE}(n) = U_{aRE}(n) \quad U_{rIM}(n) = U_{aIM}(n)$$

$$I_{rRE}(n) = I_{aRE}(n) + I_{okRE}(n)$$

$$I_{rIM}(n) = I_{aIM}(n) + I_{okIM}(n)$$

$$U_{polRE}(n) = U_{cIM}(n) - U_{bIM}(n)$$

$$U_{polIM}(n) = U_{bRE}(n) - U_{cRE}(n)$$

$$V_{1RE}(n) = -\sin(\varphi) \cdot U_{polIM}(n) - \cos(\varphi) \cdot U_{polRE}(n)$$

$$V_{1IM}(n) = \sin(\varphi) \cdot U_{polRE}(n) - \cos(\varphi) \cdot U_{polIM}(n)$$

$$V_{2RE}(n) = -\sin(\varphi) \cdot U_{rIM}(n) - \cos(\varphi) \cdot U_{rRE}(n) + 49.69 \cdot I_{rRE}(n)$$

$$V_{2IM}(n) = \sin(\varphi) \cdot U_{rRE}(n) - \cos(\varphi) \cdot U_{rIM}(n) + 49.69 \cdot I_{rIM}(n)$$

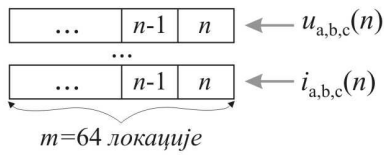
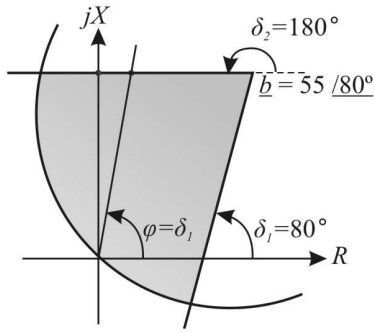
$$\alpha_{v1}(n) = \arctg(V_{1IM}(n) / V_{1RE}(n))$$

$$\alpha_{v2}(n) = \arctg(V_{2IM}(n) / V_{2RE}(n))$$

$$\alpha(n) = \alpha_{v1}(n) - \alpha_{v2}(n)$$

$$-90^\circ < \alpha(n) < 90^\circ$$

Слика 5.1 – Реализација кружне (МНО) карактеристике реаговања у временском и фазорском домену



Реализација у временском домену
POLII

$$i_{ok}(n) = k_0 i_0(n) = 0.6 \cdot 0.33 \cdot (i_a(n) + i_b(n) + i_c(n))$$

квар фазе *a* (*a-g*)

$$u_r(n) = u_a(n)$$

$$i_r(n) = i_a(n) + i_{ok}(n)$$

$$v_1(n) = -0.0182 \cdot u_i(n-8) + i_i(n)$$

$$v_2(n) = i_i(n-10)$$

$$P1(n) = P1(n-1) - v_1(n-m) \cdot v_2(n-m) + v_1(n) \cdot v_2(n)$$

$$v_1(n) = -0.0182 \cdot u_i(n-16) + i_i(n-8)$$

$$v_2(n) = i_i(n)$$

$$P2(n) = P2(n-1) - v_1(n-m) \cdot v_2(n-m) + v_1(n) \cdot v_2(n)$$

квар фазе *a* (*a-g*) - кружна карактеристика

$$v_1(n) = -u_r(n-9)$$

$$v_2(n) = -u_r(n-9) + 100 \cdot i_r(n)$$

$$P3(n) = P3(n-1) - v_1(n-m) \cdot v_2(n-m) + v_1(n) \cdot v_2(n)$$

$$P1(n) > 0 \quad P2(n) > 0 \quad P3(n) < 0$$

Реализација у фазорском домену
POLIDFT

$$U_{aRE}(n) = U_{aRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_a(n) - u_a(n-m))$$

$$U_{aIM}(n) = U_{aIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_a(n) - u_a(n-m))$$

$$U_{bRE}(n) = U_{bRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_b(n) - u_b(n-m))$$

$$U_{bIM}(n) = U_{bIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_b(n) - u_b(n-m))$$

$$U_{cRE}(n) = U_{cRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_c(n) - u_c(n-m))$$

$$U_{cIM}(n) = U_{cIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (u_c(n) - u_c(n-m))$$

$$I_{aRE}(n) = I_{aRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_a(n) - i_a(n-m))$$

$$I_{aIM}(n) = I_{aIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_a(n) - i_a(n-m))$$

$$I_{bRE}(n) = I_{bRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_b(n) - i_b(n-m))$$

$$I_{bIM}(n) = I_{bIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_b(n) - i_b(n-m))$$

$$I_{cRE}(n) = I_{cRE}(n-1) + \cos(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_c(n) - i_c(n-m))$$

$$I_{cIM}(n) = I_{cIM}(n-1) + \sin(\omega_i \cdot n \cdot T_{od}) \cdot (i_c(n) - i_c(n-m))$$

$$I_{0kRE}(n) = 0.6 \cdot 0.33 \cdot (I_{aRE}(n) + I_{bRE}(n) + I_{cRE}(n))$$

$$I_{0kIM}(n) = 0.6 \cdot 0.33 \cdot (I_{aIM}(n) + I_{bIM}(n) + I_{cIM}(n))$$

квар фазе *a* (*a-g*)

$$U_{rRE}(n) = U_{aRE}(n) \quad U_{rIM}(n) = U_{aIM}(n)$$

$$I_{rRE}(n) = I_{aRE}(n) + I_{0kRE}(n)$$

$$I_{rIM}(n) = I_{aIM}(n) + I_{0kIM}(n)$$

$$V_{1RE}(n) = -0.0129 \cdot (U_{rRE}(n) + U_{rIM}(n)) + I_{rRE}(n)$$

$$V_{1IM}(n) = 0.0129 \cdot (U_{rRE}(n) - U_{rIM}(n)) + I_{rIM}(n)$$

$$V_{2RE}(n) = I_{rRE}(n)$$

$$V_{2IM}(n) = I_{rIM}(n)$$

$$\varphi_{v1}(n) = \arctg(V_{1IM}(n) / V_{1RE}(n))$$

$$\varphi_{v2}(n) = \arctg(V_{2IM}(n) / V_{2RE}(n))$$

$$\varphi_1(n) = \varphi_{v1}(n) - \varphi_{v2}(n)$$

квар фазе *a* (*a-g*) - кружна карактеристика

$$V_{1RE}(n) = -\sin(\varphi) \cdot U_{rIM}(n) - \cos(\varphi) \cdot U_{rRE}(n)$$

$$V_{1IM}(n) = \sin(\varphi) \cdot U_{rRE}(n) - \cos(\varphi) \cdot U_{rIM}(n)$$

$$V_{2RE}(n) = V_{1RE}(n) + 49.69 \cdot I_{rRE}(n)$$

$$V_{2IM}(n) = V_{1IM}(n) + 49.69 \cdot I_{rIM}(n)$$

$$\varphi_{v1}(n) = \arctg(V_{1IM}(n) / V_{1RE}(n))$$

$$\varphi_{v2}(n) = \arctg(V_{2IM}(n) / V_{2RE}(n))$$

$$\varphi_2(n) = \varphi_{v1}(n) - \varphi_{v2}(n)$$

$$-45^\circ < \varphi_1(n) < 35^\circ \quad -90^\circ < \varphi_2(n) < 90^\circ$$

Слика 5.2 – Реализација полигоналне карактеристике реаговања у временском и фазорском домену

6. ФРЕКВЕНТНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ АЛГОРИТАМА

Већина заштита детекцију квара базира на информацији која лежи у основном хармонику сигнала, док таласни облици мјерених сигнала садрже и друге компоненте које уносе грешку и могу узроковати погрешно реаговање заштите.

Од нежељених компоненти најзначајније су:

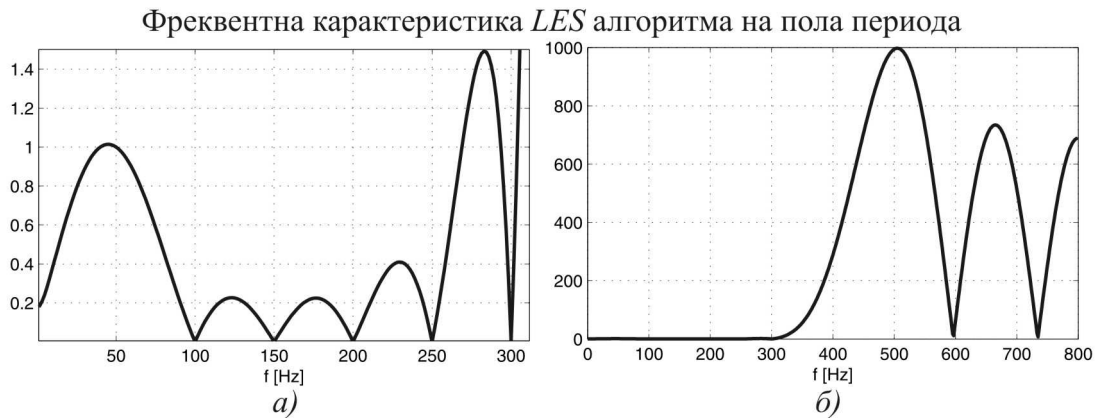
- опадајућа једносмјерна компонента,
- непарни хармоници,
- парни хармоници, најчешће због засићења струјних трансформатора,
- присуство капацитивно спрегнутих напонских трансформатора и
- високофреквентне компоненте у прелазним режимима након појаве квара.

Фреквентне карактеристике алгорита су један од најзначајнијих показатеља поузданости и сигурности детекције квара јер указују у којој мјери алгоритам потискује нежељене компоненте сигнала. Кроз њих се може уочити не само способност алгорита да исправно реагује у присуству виших хармоника, него и његово понашање у прелазним процесима након тренутка појаве квара. Пожељно је да излаз алгорита монотонно конвергира ка новој вриједности, јер у супротном детекција квара није поуздана па се морају уводити додатна кашњења прије одлуке о реаговању заштите. Идеална фреквентна карактеристика би била када би све фреквенције различите од номиналне фреквенције система биле потпуно потиснуте, односно када би њихово појачање било нула, али би детекција квара била неприхватљиво спора. Компромис брзине и робусности је да алгоритам буде

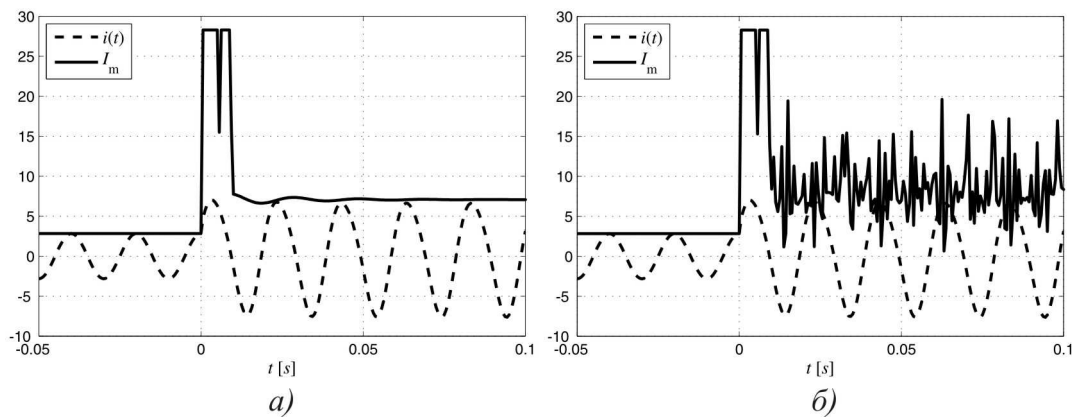
у некој мјери осјетљив на све фреквентне компоненте, осим на више хармонике сигнала. Пошто сигнали ријетко садрже међухармонике, овакво рјешење представља задовољавајући компромис. Примјер три различите фреквентне карактеристике дискретне Фуријеове трансформације са различитим дужинама прозора података приказан је на слици 4.2. Компромис фреквентне карактеристике и брзине реаговања је постигнут у случају алгоритма са прозором података дужине једног периода основног хармоника сигнала T_{oh} . Уколико је алгоритам осјетљив на неку од нежељених компоненти, и она се појави у сигналу, то доводи до грешке у процјени вриједности основног хармоника, најчешће у виду осцилаторне компоненте која може узроковати непотребна искључења штићеног елемента, а тиме угрозити и стабилност система (естимирана ефективна вриједност струје код алгоритма са прозором $T_{oh}/2$ на слици 4.2).

Теоријски је могуће остварити брз алгоритам на прозору података дужине $T_{oh}/2$ чија фреквентна карактеристика потпуно елиминише и парне хармонике. Алгоритам на бази методе најмањих квадрата (*LES – Least Error Squares*) омогућава да се у моделу сигнала изабере произвољни хармоници и да се естимира жељени [3,4,5,8]. У нашем случају треба естимирати основни, а довољно је елиминисати првих 6 виших хармоника јер се сматра да су хармоници вишег реда довољно потиснути улазним Батервортовим филтром [3]. Уз предфилтар опадајуће *DC* компоненте такав алгоритам би био довољно поуздан и брз, а по брзини би био бољи од свих данашњих примијењених рјешења. У раду [27] се једно овакво рјешење и предлаже као веома брз начин естимације фазора основног хармоника. Ипак, са аспекта практичне примјене постоји непремостива препрека за овај приступ. Ако се посматра фреквентна карактеристика овог алгоритма на спектру ширем од првих 6 хармоника за које је предвиђен, може се уочити да појачање хармоника реда вишег од 6 постаје енормно велико (слика 6.1). Другим ријечима, алгоритам је осјетљив и на најмање вриједности шума, које се неизбежно појављују у свакој практичној апликацији без обзира на квалитет Батервортовог филтра. Тестирање тог алгоритма вјештачки генерисаним сигналима, који садрже само фреквентне компоненте предвиђене моделом сигнала (слика 6.2а), даје задовољавајуће резултате. Међутим, када се тестирање

врши сигналима добијеним из симулације кварова у моделима реалне мреже, покаже се потпуна непримјењивост алгоритма усљед енормног броја лажних реаговања. На слици 6.2б је показано да чак и шум нивоа 0.3% уноси неприхватљиво велике грешке у естимирану вриједност амплитуде сигнала. Коначни закључак је да се за практичну примјену неког алгоритма у области релејне заштите захтијева не само да елиминише све више хармонике до 6-тог, него и да фреквентна карактеристика има све мања појачања са порастом фреквенције, као што то има *DFT* (слика 6.7). У случају анализираних *LES* алгоритма већ је на слици 6.1 уочљиво да појачање међухармоника почиње да расте при фреквенцијама већим од 150 Hz.



Слика 6.1 – Фреквентна карактеристика алгоритма на бази методе најмањих квадрата а) приказ до 6-тог хармоника б) приказ до 16-тог хармоника



Слика 6.2 – Естимација амплитуде сигнала а) сигнал не садржи шум, б) сигнал садржи шум

6.1 Тестирање фреквентних карактеристика предложених алгоритама

За процјену фреквентних карактеристика система формиран је тестни модел који осим самих алгоритама, представљених у претходним главама дисертације, садржи и моделе предфилтра прије А/Д конверзије и филтра опадајуће једносмјерне компоненте. Блок дијаграм комплетног система за тестирање фреквентних карактеристика предложеног алгорита са кружном карактеристиком и референтног алгорита на бази *DFT* приказан је на слици 6.3. Фреквентне карактеристике алгоритама са полигоналном карактеристиком се добијају на исти начин па их није потребно посебно анализирати.

Алгоритми су тестирани улазним сигнаlima којима се произвољно може задавати садржај виших хармоника, субхармоника и интерхармоника. Улазни сигнали прије обраде пролазе кроз аналогни нископропусни филтар чија је улога да онемогући високофреквентним компонентама да уносе грешку након поступка одабирања (филтар означен са F1 на слици 6.3). У симулацији се користи Батерворттов филтар другог реда са фреквенцијом пропусног опсега од 93.6 Hz, фреквенцијом непропусног опсега од 380 Hz и слабљењем непропусног опсега од 28 dB.

Опадајућа једносмјерна компонента је више или мање присутна у струји квара, што узрокује осцилације у естимираним фазорима и фазним разликама сигнала. Једносмјерна компонента може бити присутна и у напонским сигнаlima усљед прелазних процеса код капацитивних напонских трансформатора [33] (*Capacitive Coupled Voltage Transformer-CCVT*). Да би се утицај ових прелазних појава што више редуковао, алгоритми користе једноставан предфилтар једносмјерне компоненте на свим напонским и струјним улазним сигнаlima. Предфилтар уноси занемариво временско кашњење од само једног периода одабирања сигнала, а детаљно је описан у [26] гдје је назван *CharmDF*.



Слика 6.3 – Блок дијаграм алгоритама базираних на фазној компарацији у временском и фазорском домену

Филтар $F2$ је базиран на релацији:

$$s_f(k) = s(k) - s(k-1), \quad (6.1)$$

гдје:

$s(k)$ представља k -ти одбирок сигнала у тренутку t ,

$s(k-1)$ представља $(k-1)$ -и одбирок сигнала у тренутку $(t - T_{od})$,

T_{od} представља период одабирања ($T_{od} = T_{oh}/m$),

T_{oh} представља период основног хармоника сигнала,

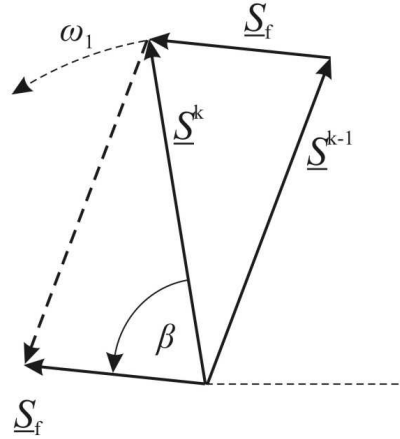
$s_f(k)$ представља k -ти одбирок филтрираног сигнала.

Осим значајног смањења опадајуће једносмјерне компоненте, уз минимално додатно кашњење, $CharmDF$ уноси и позитиван фазни помјерај β у сигнал s_f који се мора узети у обзир и илустрован је на слици 6.4. Фазни помјерај β зависи од броја одбирака m , што је приказано у табели 6.1. Однос између сигнала прије и након филтрирања може бити приказан преко њихових фазора \underline{s} и \underline{s}_f :

$$K_1 \cdot \underline{s}_f = e^{j\beta} \cdot \underline{s}, \quad (6.2)$$

гдје се модули фазора односе као [26]:

$$K_1 = \frac{1}{2 \cdot \sin(\pi / m)} = \frac{|S|}{|S_f|}, \quad (6.3)$$



Слика 6.4 – Фазори сигнала прије и после филтрирања

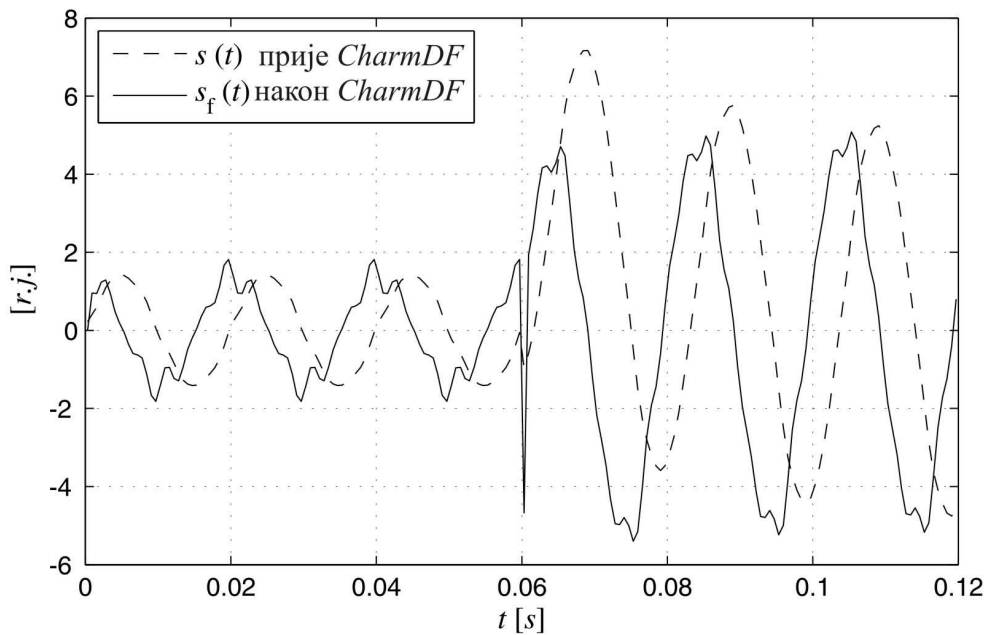
Главни недостатак примјене *CharmDF* као предфилтра је у томе што узрокује појачање свих компоненти чија је фреквенција виша од фреквенције основног хармоника, што се може уочити и на слици 6.5 гдје је присуство виших хармоника у филтрираном сигналу очигледно више. На слици 6.6 приказане су фреквентне карактеристике *CharmDF* (F2) и Батервортовог филтра (F1). Потребно је нагласити да *CharmDF* боље елиминише опадајуће *DC* компоненте са већом временском константом, односно оне које опадају спорије, јер је њихова промјена мања на временском интервалу између два сусједна одбирка. Негативна особина појачања високофреквентних компоненти F2 ублажена је фреквентном карактеристиком филтра F1.

Табела 6.1 – Веза између броја одбирака m и фазног помјераја β

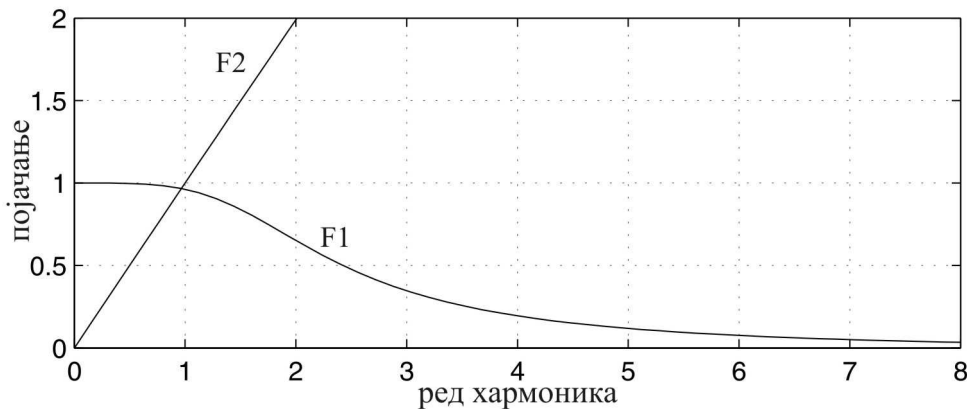
m	16	20	32	64
β	78.75°	81.00°	84.37°	87.19°

Након слабљења *DC* компоненте, алгоритам на бази *DFT* естимира фазоре основног хармоника свих улазних сигнала. Фреквентна карактеристика филтра на бази *DFT* се једноставно одређује и приказана је на слици 6.7. Што се тиче алгоритма у временском домену, код њега је једноставно одредити фреквентну

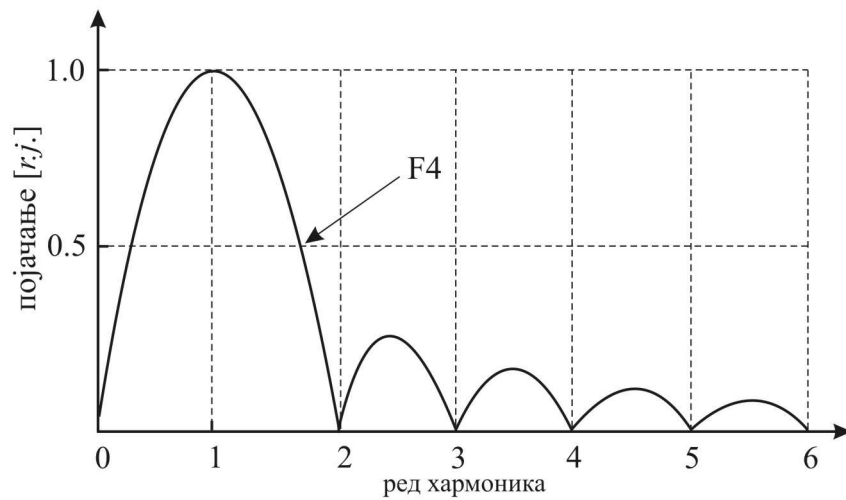
карактеристику суме дате изразом (3.14), али фреквентну карактеристику цјелокупног алгоритма није могуће одредити на класичан начин јер у суму улази производ два улазна сигнала. Фреквентна карактеристика суме (3.14) је приказана на слици 6.8 и показује да се издваја једино једносмјерна компонента, док је појачање свих хармоника нула. Сумирање одбирака на пола периода би повећало брзину детекције квара, али би узроковало осјетљивост алгоритма на парне хармонике код појаве засићења струјних трансформатора, па није пожељно.



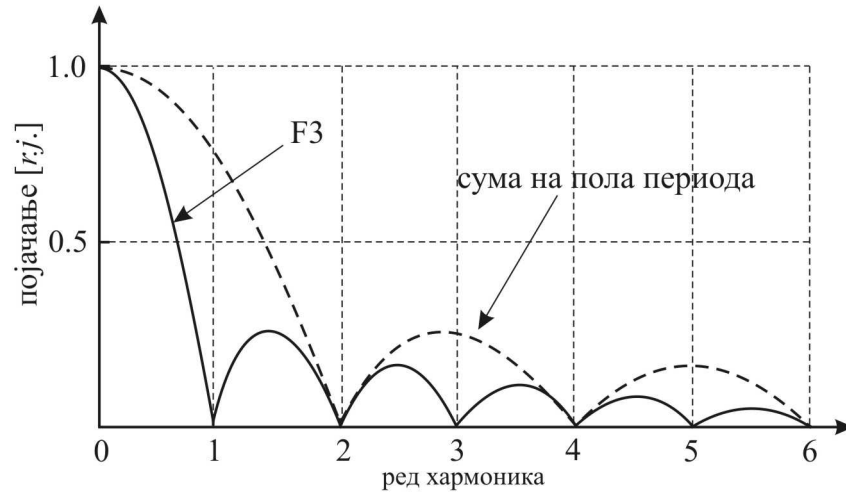
Слика 6.5 – Таласни облици сигнала прије и после филтрирања



Слика 6.6 – Фреквентне карактеристике Батервортновог филтра (F1) и CharmDF (F2)



Слика 6.7 – Фреквентна карактеристика DFT филтра (F4)

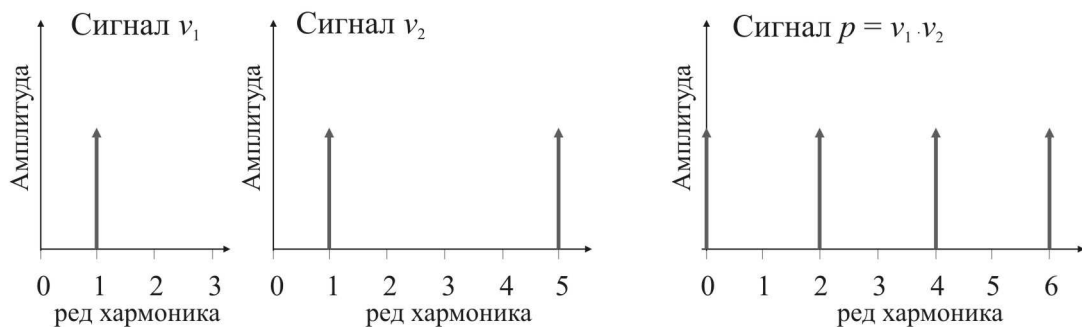


Слика 6.8 – Фреквентна карактеристика филтра (F3)

Да би се одредила фреквентна карактеристика комплетног предложеног алгоритма, мора се утврдити како поједини хармоници присутни у улазним сигналимa $i_r(k)$, $u_{pol}(k)$ и $u_r(k)$ утичу на излазну вриједност алгоритма. Фазни компаратор у временском домену има два улаза (v_1 и v_2) и главни проблем у анализи фреквентне карактеристике је што се хармоник присутан у неком улазном сигналу појављује као сасвим друга хармонијска компонента у производу улазних сигнала $p = v_1 \cdot v_2$. Производ двије прстопериодичне функције различитих фреквенција даје двије компоненте, једну са фреквенцијом једнакој збиру, а другу са фреквенцијом једнакој разлици фреквенција полазних функција:

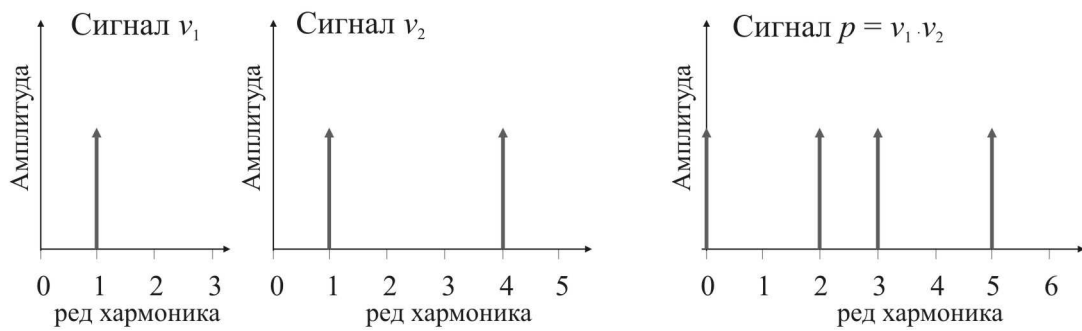
$$\cos \omega \cdot \cos h\omega = \frac{1}{2} [\cos (h-1)\omega + \cos (h+1)\omega]. \quad (6.4)$$

Као примјер на слици 6.9 је приказано како се пети хармоник у сигналу v_2 , након множења са v_1 , појављује као двије компоненте, четврти и шести хармоник. Умношци основних хармоника дају други хармоник и једносмјерну компоненту која једина носи корисну информацију о фазној разлици сигнала. Након интеграције снаге p , односно сумирања (израз 3.14) издваја се једино корисна једносмјерна компонента, док су други, четврти и шести хармоник поништени у суми, што показују и фреквентне карактеристике са слике 6.8. На слици 6.10 приказане су фреквентне компоненте производа p у случају присуства четвртог хармоника у сигналу v_2 . Сигнал p садржи трећи и пети хармоник и јасно је да сума на пола периода не би могла елиминисати њихов утицај. Алгоритам на бази суме (3.14) и у овом случају омогућава правилну детекцију квара због фреквентне карактеристике која елиминише све хармонике.



Слика 6.9 – Сигнали v_1 , v_2 и p у фреквентном домену у случају појаве непарног хармоника

Као трећи случај може се анализирати присуство истог хармоника у оба улазна сигнала. На слици 6.11 је приказано како присуство трећег хармоника у оба улазна сигнала даје у излазном сигналу p шести хармоник и једносмјерну компоненту, која се суперпонира са једносмјерном компонентом која потиче од основних хармоника. Ова додатна DC компонента уноси грешку и може да узрокује погрешну детекцију квара уколико је њена вриједност довољно висока, а квар у близини границе области реаговања.



Слика 6.10 – Сигнали v_1 , v_2 и p у фреквентном домену у случају појаве парног хармоника

Детаљнија анализа, дата у наставку, показује да је утицај ове грешке минималан у случају реалног нивоа виших хармоника у улазним сигнаlima. Посматрајмо сигнале v_1 и v_2 , при чему v_1 садржи основни и 3% трећег хармоника, а v_2 садржи основни и 33% трећег хармоника. Вриједност трећег хармоника у сигналу v_1 је изабрана на основу чињенице да се v_1 добија из улазних напонских сигнала, а највиши дозвољен ниво појединачних напонских хармоника у високонапонским мрежама према стандарду *IEEE 519-1992* не смије прелазити 1.5%. Ми усвајамо двоструку вриједност од 3%. Према истом стандарду највиша вриједност појединачног струјног хармоника који се може инјектирати у мрежу је 15% у случају јаке мреже, а ми поново усвајамо двоструку вриједност од 30% у сигналу v_2 и додајемо још 3% из напонског сигнала, јер је и он присутан у сигналу v_2 . Ако знамо да се корисна информација о фазној разлици налази у *DC* компоненти која је посљедица производа основних хармоника сигнала v_1 и v_2 :

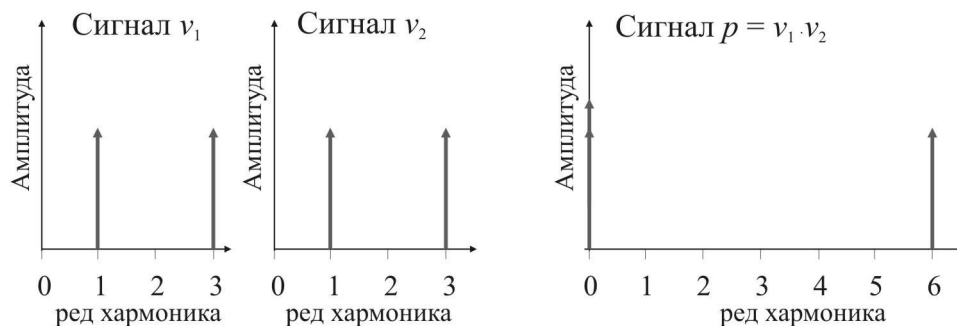
$$DC_K = \int v_1^1 \cdot v_2^1 dt, \quad (6.5)$$

онда се *DC* компонента која изазива сметњу добија из производа трећих хармоника сигнала који су изражени као проценат основних хармоника:

$$DC_G = \int v_1^3 \cdot v_2^3 dt = \int 0.03 \cdot v_1^1 \cdot 0.33 \cdot v_2^1 dt = 0.0099 \cdot \int v_1^1 \cdot v_2^1 dt = 0.0099 \cdot DC_K. \quad (6.6)$$

Израз (6.6) показује да ће у најгорем случају грешка усљед присуства трећег хармоника у оба сигнала бити 0.99%. То је максимална грешка која се добије када су трећи хармоници у сигнаlima у фази, док је у другим случајевима грешка мања. Бројне симулације [25], дате у главама 8 и 10, показале су да присуство виших хармоника и шума у сигнаlima не узрокује другачије реаговање

дистантне заштите на бази сигнала у временском домену у односу на класични приступ у фазорском домену.

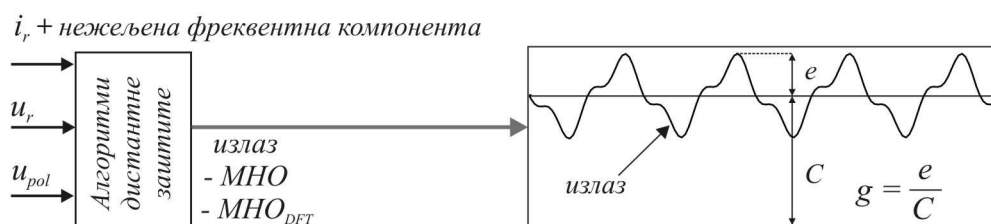


Слика 6.11 – Сигнали v_1 , v_2 и p у фреквентном домену у случају појаве хармоника у оба улазна сигнала

Ова кратка анализа показује да за алгоритме реализоване у временском домену није могуће дати класичну фреквентну карактеристику као за алгоритме у фазорском домену који одвојено филтрирају сигнале и имају по једну улазну и излазну величину. Код класичне фреквентне карактеристике за сваку фреквентну компоненту постоји вриједност појачања филтра као на слици 6.7, док се код приступа у временском домену једна фреквентна компонента на излазу појављује као више компоненти различитих фреквенција, због чега није могуће користити појачање као величину која описује фреквентну карактеристику алгоритма. Ово је главни разлог због чега смо одлучили да уведемо нову величину означену са g (грешка) којом се изражава утицај нежељених фреквентних компоненти (хармоника, интерхармоника и субхармоника) у улазним сигнаlima на излазне вриједности тестираних алгоритама MHO и MHO_{DFT} .

Први корак у одређивању фреквентне карактеристике алгоритама у временском домену је одређивање излазних вриједности MHO и MHO_{DFT} у случају да се улазна струја i_r и напон u_r састоје само од основних хармоника јединичне ефективне вриједности. У том случају излазне вриједности MHO и MHO_{DFT} су тачне и служе као референтне величине (вриједност C на слици 6.12). Затим се нека нежељена фреквентна компонента дода у један од улазних сигнала (i_r или u_r) и посматрају се излази алгоритама MHO и MHO_{DFT} . Уколико алгоритам не може

да филтрира улазну сметњу, његова излазна вриједност добија осцилаторну компоненту приказану на слици 6.12. Вриједност промјенљиве g представља максимално одступање излаза алгоритма од тачне вриједности C , у односу на тачну вриједност. Тим критеријумом могуће је добити процјену понашања комплетног алгоритма на сваку фреквенцијску компоненту, при чему се одвојено праве карактеристике када је поремећај присутан у струјном сигналу i_r и у напонском сигналу u_r .

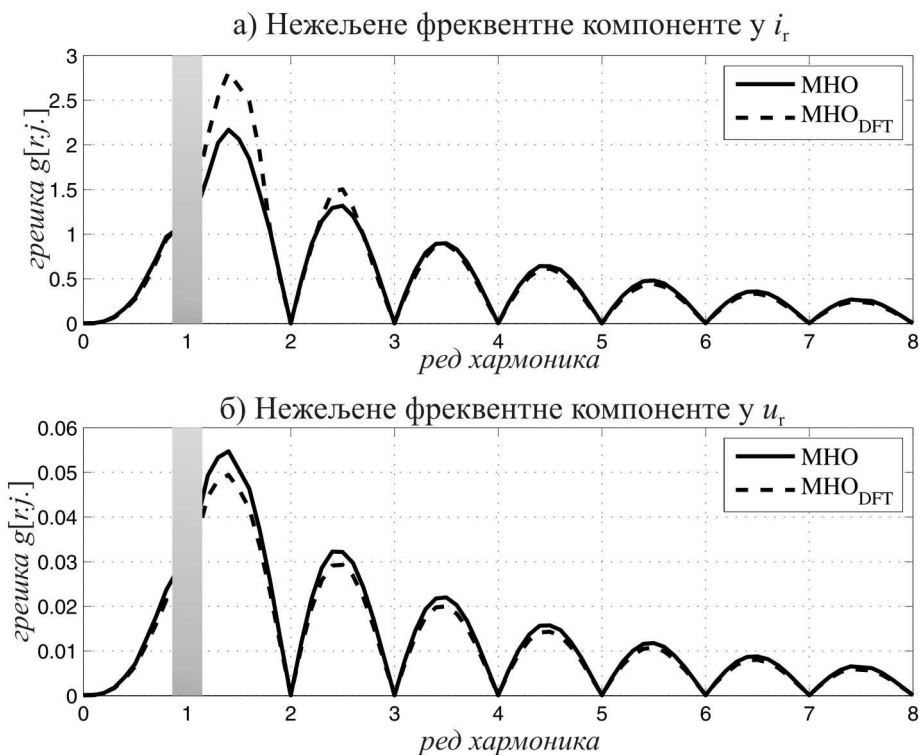


Слика 6.12 – Процјена утицаја хармонијских компоненти улазних сигнала на тачност алгоритма

Алгоритам у фазорском домену на бази DFT има познату фреквентну карактеристику, али да би поређење карактеристика било што објективније одлучили смо да и за њега снимимо исту карактеристику са вриједношћу g за сваку фреквентну компоненту.

На слици 6.13 приказане су фреквентне карактеристике оба алгоритма добијене по критеријуму представљеном на слици 6.12. Слика 6.13а приказује фреквентне карактеристике алгоритма када су фреквентне компоненте додаване у сигнал струје i_r , док слика 6.13б приказује фреквентне карактеристике са фреквентним компонентама у сигналу напона u_r . Карактеристике су добијене тако што су у улазне сигнале додаване фреквентне компоненте од нултог до осмог хармоника са кораком 0.1. Свака компонента има исту ефективну вриједност као основни хармоник улазних сигнала. Грешка g се одређује тако да се свака компонента дода сигналу 200 пута са случајним фазним углом, а затим се нађе средња вриједност грешке која се упише на дијаграм. Тиме се минимизује могућност да унапријед изабрана фаза сигнала утиче на крајњи резултат тестирања. Потребно је

напоменути да фреквентне карактеристике са слике 6.13 немају смисла у тачки која представља основни хармоник, јер се на ординати уместо *појачање* налази *грешка*, а основни хармоник не може бити третиран као додатна фреквентна компонента која узрокује грешку у детекцији квара.

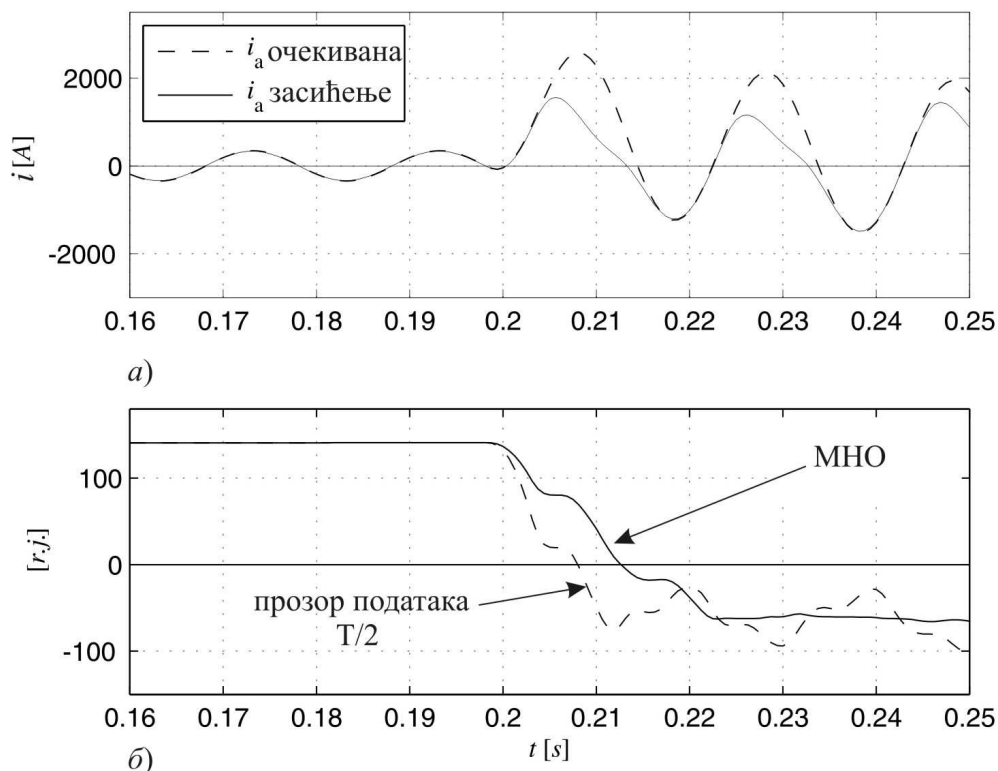


Слика 6.13 – Фреквентне карактеристике алгоритама на бази фазне компарације у фреквентном и фазорском домену а) утицај сметњи у сигналу струје б) утицај сметњи у сигналу напона

Са слике 6.13 се може уочити да је фреквентна карактеристика предложеног алгорита у временском домену, са прозором података дужине једног периода, практично једнака фреквентној карактеристици класичног алгорита дистантне заштите у фазорском домену на бази *DFT*. То је уједно и показатељ да, упркос недостацима приступа у временском домену, у тестирању очекујемо да предложени алгоритми имају једнако висок ниво поузданости и сигурности. Основним недостатком приступа у временском домену сматрамо потенцијалну грешку реаговања заштите у случају истовремене појаве хармоника истог реда у сигнаlima напона и струје релеја. Анализа је показала да је у реалним

ситуацијама могућност грешке минимална, што је показано и у главама 8 и 10. Алгоритми посједују и добро потискивање DC компоненте захваљујући примјени описаног предфилтра F2.

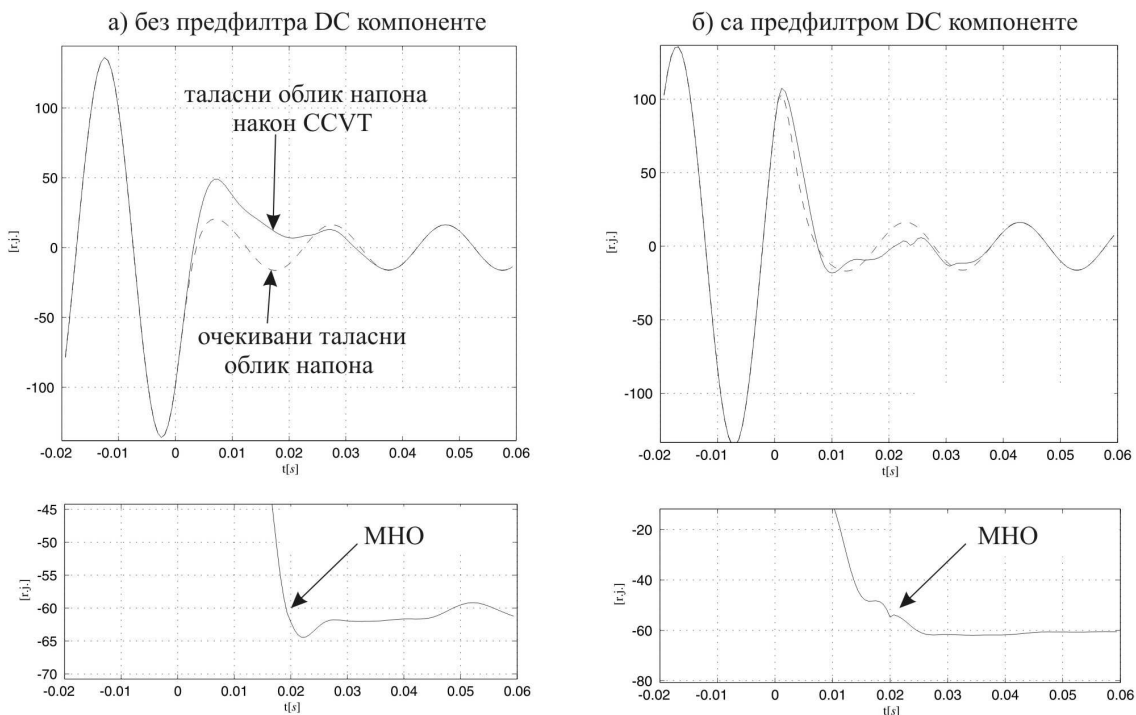
На крају треба поменути утицај засићења струјног трансформатора и присуство капацитивно спрегнутих напонских трансформатора (ССVT). На слици 6.14а је приказана појава засићења струјног трансформатора и излаз алгоритма МНО (6.14б). Може се уочити да излаз остаје стабилан, без великих осцилација, што указује да се не јављају проблеми око правилне детекције квара. На слици 6.14б је приказано и како би изгледао излаз алгоритма уколико би прозор података био дужине пола периода. Једнаку робусност на засићење струјног трансформатора посједују и остали алгоритми које тестирамо.



Слика 6.14 – Утицај засићења струјног трансформатора на детекцију квара [25]

а) Сигнал струје приликом засићења струјног трансформатора б) Излаз алгоритма МНО

Један примјер прелазних процеса код напонских трансформатора је приказан на слици 6.15а. Може се уочити да прелазни процес након појаве квара узрокује појаву компоненте која личи на опадајућу једносмјерну компоненту. Због тога смо исти предфилтар примијенили и на напонске сигнале. Са слике 6.15б може се уочити да предфилтар умањује утицај поменутих прелазних појава и смањује вјероватноћу погрешног реаговања релеја.



Слика 6.15 – Утицај ССVT на детекцију квара [25] а) Таласни облик напона и излаз алгоритма без филтрирања DC компоненте б) Таласни облик напона и излаз алгоритма након филтрирања DC компоненте

7. УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА МРЕЖЕ НА ДЕТЕКЦИЈУ КВАРА

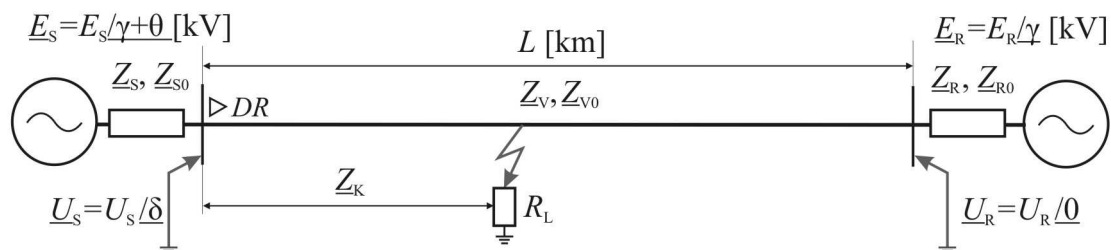
Прије самог тестирања алгоритама потребно је сагледати утицај појединих параметара мреже на то како дистантна заштита „види квар“ и да ли га исправно детектује. Испоставља се да се импеданса коју види дистантни релеј у неким околностима разликује од стварне импедансе квара, што може довести до погрешног реаговања заштите, а тиме и до проблема са стабилношћу система и неиспорученом енергијом [28]. Да би тестирање дало комплетну слику о понашању алгоритама, потребно је анализирати који су то критични параметри и гдје се очекују највећи проблеми око правилне детекције квара.

7.1 Утицај импедансе мреже

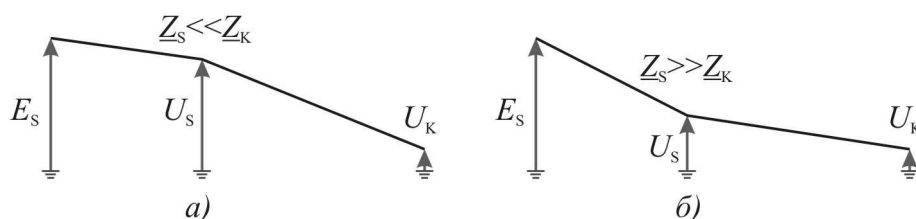
Једна од ствари на коју утиче однос импеданси напојне мреже и штићеног вода (*Source to Impedance Ratio* - $SIR = \underline{Z}_S / \underline{Z}_V$, слика 7.1) је положај кружне карактеристике у комплексној равни. Са слике 2.6 се може уочити да ће пречник кружнице бити већи, а тиме и боља покривеност кварова са луком, уколико је већи SIR , односно уколико је напојна мрежа слабија (већа импеданса напојне мреже која је на слици означена са \underline{Z}_x).

Вриједност SIR утиче на вриједност напона релеја [28], према томе што је мрежа слабија то је и напон на мјесту релеја мањи у току квара (слика 7.2а мрежа јака –

мала вриједност SIR , слика 7.2б мрежа слаба – велика вриједност SIR). Вријеме детекције квара се продужава са порастом SIR што је показано у дијелу тестирања алгоритама.



Слика 7.1 – Усвојени модел мреже за тестирање алгоритама дистантних заштита



Слика 7.2 – Утицај SIR -а на напон на мјесту релеја а) Јака мрежа б) Слаба мрежа

7.2 Утицај отпорности лука на мјерену импедансу мреже

Највећи утицај на правилну детекцију квара има појава лука на мјесту квара (R_L са слике 7.1). Лук је по природи резистиван и тиме узрокује хоризонталан помјерај импедансе квара, што може довести до тога да импеданса квара изађе из дефинисане области реаговања. Ово није једини проблем код појаве лука јер његово присуство у комбинацији са низом параметара мреже узрокује да се импеданса мјерена на мјесту релеја разликује од стварне импедансе вода са луком [1,28]. У случају појаве лука на мјесту квара, на импедансу мјерену на мјесту релеја додатно утичу:

- врста квара на воду,

- локација квара,
- однос импеданси извора на крајевима водова,
- оптерећење вода прије појаве квара.

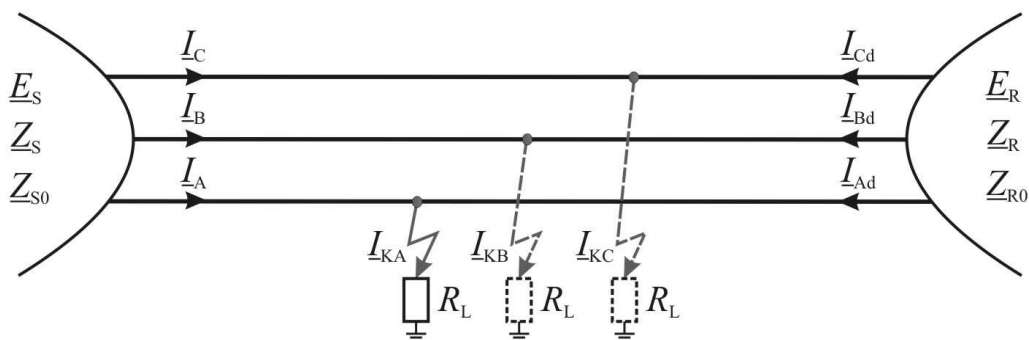
У [1] су изведене формуле које показују како на мјерену импедансу на мјесту релеја \underline{Z}_m утиче врста квара када је у току квара присутан лук. Дио мреже са мјестом квара и ознакама струја приказан је на слици 7.3. Прво анализирамо случај када је мрежа једнострано напајана ($\underline{I}_{Ad} = \underline{I}_{Bd} = \underline{I}_{Cd} = 0$). У случају једнополног кратког споја мјерена импеданса је:

$$\underline{Z}_m = \underline{Z}_K + R_L \frac{\underline{I}_{KA}}{\underline{I}_A + \underline{k} \cdot \underline{I}_0}, \quad (7.1)$$

при чему се под импедансом \underline{Z}_K подразумева импеданса штићеног вода до мјеста квара, \underline{I}_0 представља нулту струју мјерену на мјесту релеја, $\underline{k} = (\underline{Z}_{V0} - \underline{Z}_V) / \underline{Z}_V$. У случају мјерења импедансе преко разлике двије фазне струје и два фазна напона, које покрива двополне и трополни кратак спој, израз је:

$$\underline{Z}_m = \underline{Z}_K + R_L \frac{\underline{I}_{KA} - \underline{I}_{KB}}{\underline{I}_A - \underline{I}_B}, \quad (7.2)$$

Може се закључити да би у случају једнострано напајане мреже код двополних и трополног кратког споја отпорност лука била тачно мјерена на мјесту релеја. У случају једнополног кратког споја, и уз претпоставку да је $\underline{k} = 2$, мјерена отпорност лука била би 40% мања од стварне.



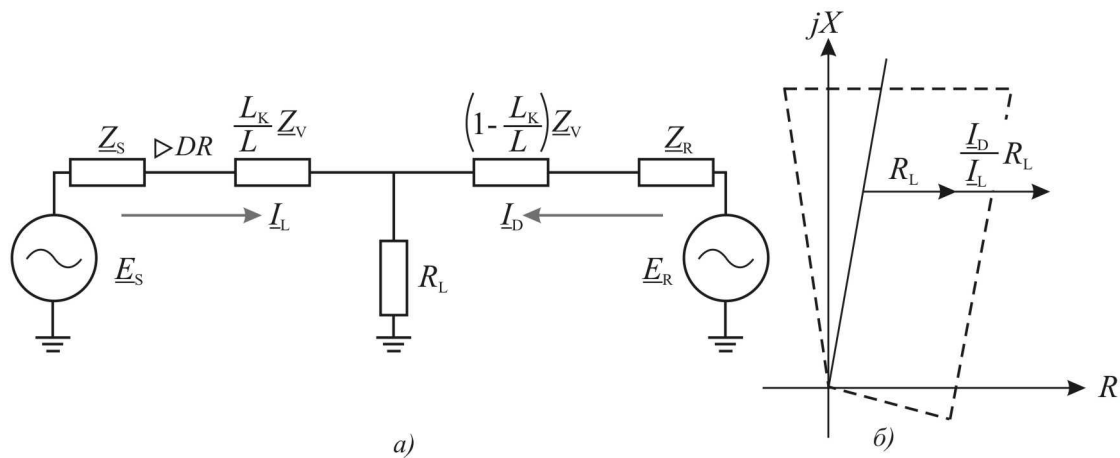
Слика 7.3 – Струје у мрежи у случају квара са луком

7.3 Утицај двостраног напајања на мјерену отпорност лука

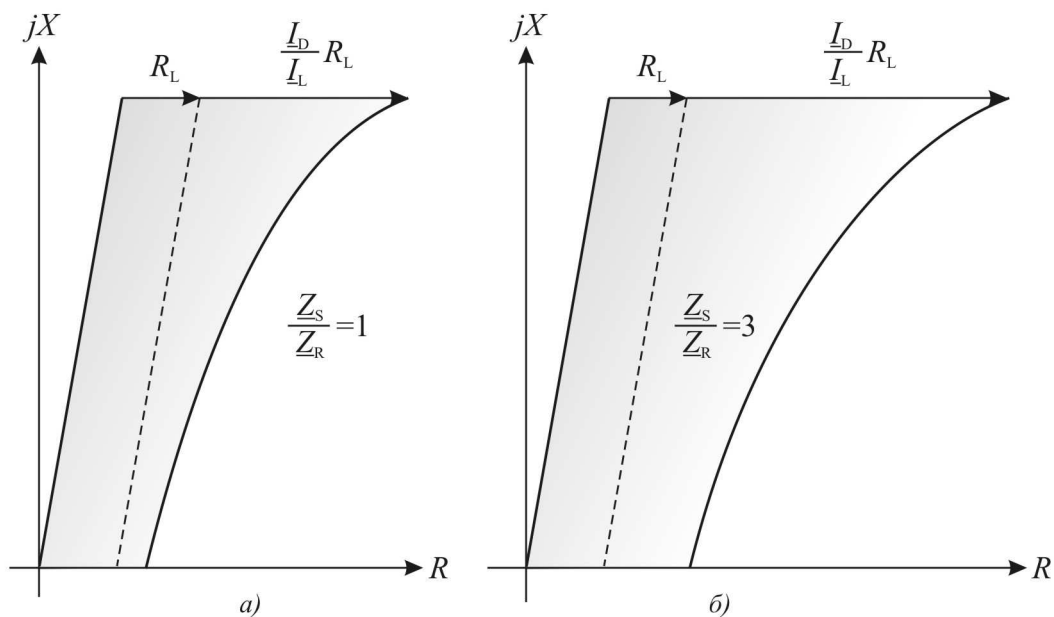
Када се уважи и напајање са друге стране, може се уочити да се на мјесту квара јавља компонента напона која потиче од струје из другог извора. Овдје имамо два могућа случаја. Први је када су напони на крајевима вода у фази ($\delta = 0$, са слике 7.1), што значи да су и струје са лијеве и десне стране квара у фази. Тада се на мјерену компоненту отпорности лука додаје компонента сразмјерна односу струја са лијеве и десне стране квара. Уз претпоставку да су мреже исте снаге и квар је на средини вода, добија се мјерена отпорност лука двоструко већа у односу на случај једнострано напајане мреже. На слици 7.4 илустровано је како двострано напајање може узроковати да квар у зони реаговања не буде детектован јер импеданса виђена на мјесту релеја излази из дефинисане области реаговања [28].

Приказани ефекат је већи како се локација квара помјера ка крају штићеног вода јер тада струја са десне стране расте због смањења укупне импедансе у редној грани. Велики утицај има и однос снага мрежа са лијеве и десне стране.

Најнеповољнији случај је када је мрежа на страни релеја много слабија, односно има много већу унутрашњу импедансу, од мреже на другом крају вода. У том случају је удио струје са десне стране већи, па на мјесту релеја отпорност лука изгледа много већа него што заиста јесте. На слици 7.5 су илустроване мјерене импедансе за два односа импеданси лијеве и десне мреже.



Слика 7.4 – а) Модел мреже са кваром на средини вода б) Ефекат повећања мјерене отпорности лука због двостраног напајања квара са луком



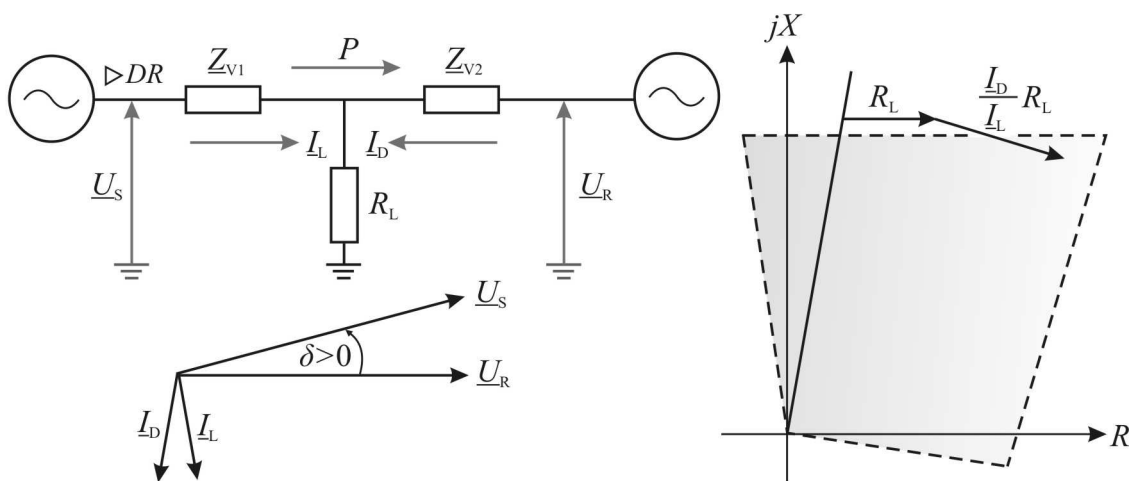
Слика 7.5 – Утицај локације квара на мјерену импедансу у случају када су напони на крајевима вода у фази а) Напојне мреже исте снаге б) Мрежа на страни релеја слабија од мреже на другој страни вода

7.4 Утицај оптерећења вода на мјерену отпорност лука

На крају је потребно илустровати шта се дешава са мјереном импедансом када је у тренутку квара вод оптерећен, односно када постоји фазна разлика између напона на његовим крајевима ($\delta \neq 0$, са слике 7.1). У том случају су и струје I_L и I_D фазно помјерене, па пад напона на отпорности лука услед струје I_D узрокује да отпорност лука на мјесту релеја буде виђена са помјерајем по X оси. Пошто је локација квара везана за мјерену вриједност реактансе, то значи да оптерећење вода, уз присуство отпорности лука на мјесту квара, узрокује да се на мјесту релеја квар детектује као ближи или даљи него што заиста јесте, зависно од тога у ком смјеру тече снага.

У случају тока снаге од извора E_S ка извору E_R , напон U_S предњачи у односу на напон U_R ($\delta > 0$, слика 7.6). Из тог разлога струја I_D касни за струјом I_L , што узрокује да мјерена отпорност добија и компоненту негативне реактансе. То значи да импеданса квара, која лежи изван области реаговања, на мјесту релеја може

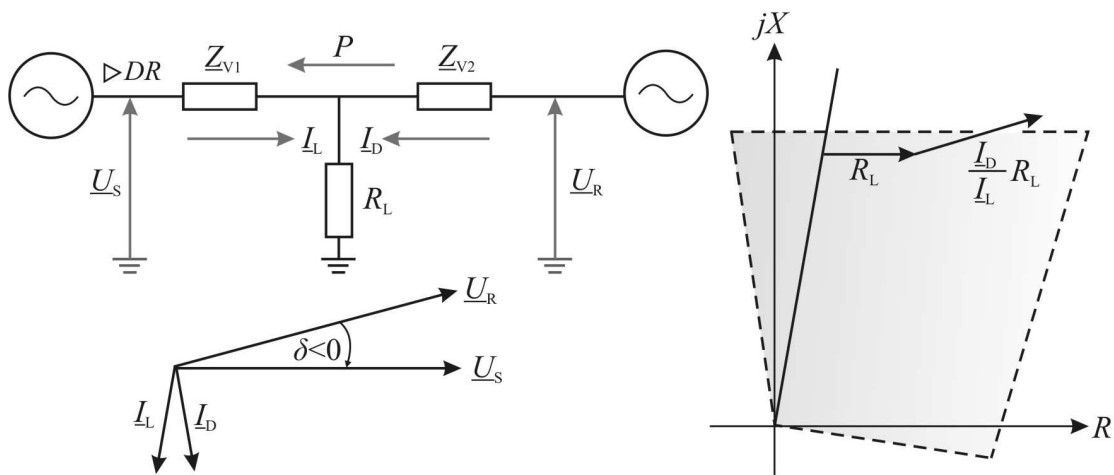
бити виђена као импеданса унутар области реаговања. За поменути смјер снаге дистантни релеј има тенденцију реаговања изван подешене зоне (*overreach*), што умањује сигурност детекције квара. У случају супротног смјера снаге струја I_D предњачи у односу на струју I_L , што узрокује да мјерена отпорност добија и компоненту позитивне реактансе (слика 7.7). У том случају може се десити да релеј не реагује на квар који се деси унутар штићене зоне (*underreach*), па то умањује поузданост детекције квара. У сваком случају постоје околности када на мјесту релеја није могуће са сигурношћу знати да ли је квар био унутар зоне реаговања. Због тога ће се и приликом тестирања увијек јавити неки проценат кварова који ће бити погрешно детектовани.



Слика 7.6 – Утицај оптерећења вода на детекцију квара при $\delta > 0$

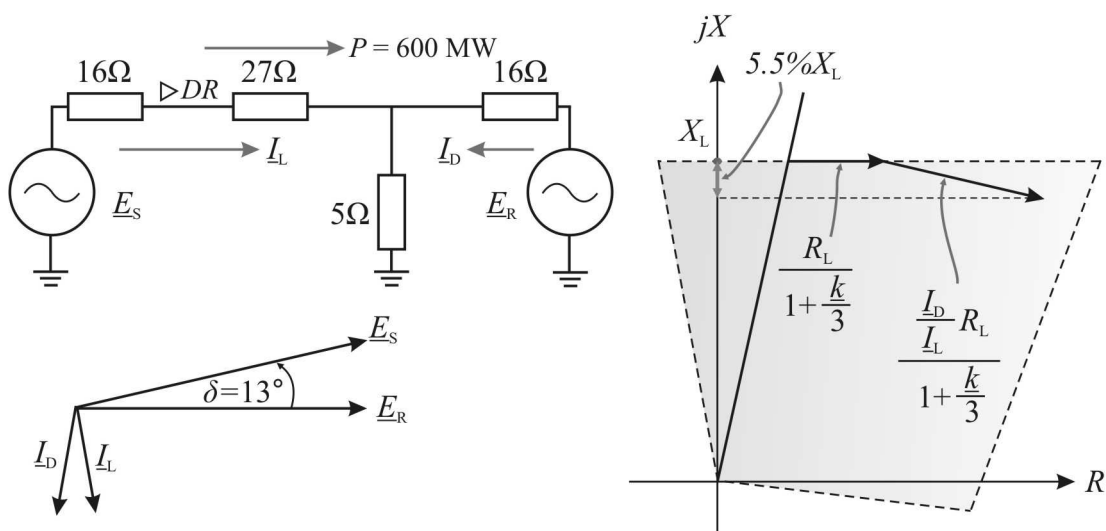
За практичну примјену потребно је сагледати колики је утицај поменутих ефеката у реалним околностима. Испоставља се да у преносним мрежама географски малих земаља ова ротација отпорности лука не прелази неколико степени, па су и погрешна реаговања локализована унутар неколико процената око дефинисане границе реаговања. Податак за Њемачку говори о $10-15^\circ$ фазне разлике и дужинама водава који у највећем броју случајева не прелазе 100 km [28]. На слици 7.8 је илустрована ситуација на 400 kV воду дужине 100 km који преноси снагу 600 MW. Може се уочити да је при отпорности лука $R_L = 5 \Omega$ грешка у процијењеној реактанси квара 5.5% [28]. Неколико процената грешке се може толерисати јер је у старту досег заштите скраћен на 85-90% укупне дужине вода

како би се узеле у обзир грешке мјерних трансформатора, параметара вода и самих алгоритама дистантних заштита.



Слика 7.7 – Утицај оптерећења вода на детекцију квара при $\delta < 0$

У преносним мрежама гдје се велике снаге преносе на велике удаљености, због великих растојања природних ресурса за производњу електричне енергије од центара потрошње, угао преноса може достићи 60° [28]. У случају једнополних кратких спојева, гдје се очекују повећане вриједности отпорности лука, алгоритми дистантних заштита могу имати додатну функцију компензације оптерећења вода тиме што мијењају границе реаговања како би избјегли погрешно реаговање због велике фазне разлике струја са два краја вода.



Слика 7.8 – Примјер утицаја оптерећења вода на детекцију квара

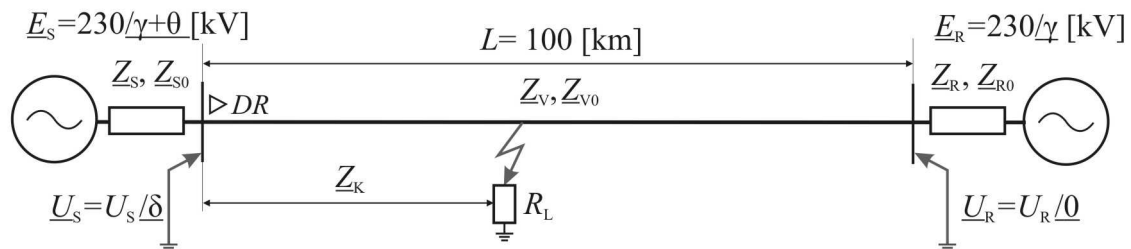
8. ДЕТЕРМИНИСТИЧКИ ПРИСТУП ТЕСТИРАЊУ АЛГОРИТАМА

Детерминистички приступ тестирању алгоритама пружа увид у брзине реаговања и границе штићене зоне при одређеним условима у мрежи. Добра страна овог приступа је што омогућава увид у понашање алгоритама при широком опсегу промјена произвољно изабраних параметара симулације. Тиме уочавамо у ком опсегу промјене неког параметра долази до нарушавања перформанси алгорита. Недостатак је што се овим приступом алгоритми често тестирају на нерелане услове у мрежи, па се и неки закључци могу довести у питање.

Приликом тестирања алгоритама дистантних заштита широко је прихваћен модел мреже у коме је штићени вод двострано нападајан тако да се остатак ЕЕС-а еквивалентира напонским изворима одговарајуће унутрашње импедансе [1,28]. Коришћење сложенијих модела са више чворова и водова не би суштински утицало на резултате, а отежало би избор параметара и продужило вријеме трајања симулација. На слици 8.1 је приказан модел мреже и ознаке свих параметара од интереса.

На првом мјесту потребно је издвојити параметре и њихове изведене величине који имају значајан утицај на понашање алгоритама, а занемарити величине које саме по себи немају пресудан утицај. Ако кренемо од извора, који је дефинисан фазором напона и унутрашњим импедансама, можемо рећи да ни вриједност

напона, па чак ни напонског нивоа, није од пресудне важности, због чега у симулацијама усвајамо константну линијску вриједност 230 kV код оба извора. За разлику од ефективне вриједности напона, њихови фазни ставови су веома важни из два разлога. Први разлог је што, за одабрани тренутак појаве квара, фазним ставом напона (угао γ) одређујемо вриједност опадајуће једносмјерне компоненте у струји квара, која има велики утицај на детекцију квара. Избором угла θ одређујемо фазну разлику напона на крајевима вода δ , што је такође врло значајно за импедансу квара коју види дистантни релеј на својој локацији. Другим ријечима одређујемо смјер и вриједност снаге на штићеном воду, али снага је само секундарна величина која указује на поменути фазни помјерај који нам је од интереса. Унутрашња импеданса извора је такође битна, али не по апсолутној вриједности него у односу на друге импедансе. На првом мјесту битан је однос унутрашње импедансе извора и штићеног вода, који се у литератури означава са *SIR*. На другом мјесту битан је и однос импеданси два извора због одређивања односа стварне и импедансе коју види релеј. Нулте импедансе извора (Z_{S0} , Z_{R0}) се не задају независно, па се усвајају као константан проценат изабране директне импедансе.



Слика 8.1 – Усвојени модел мреже за тестирање алгоритама дистантних заштита

Штићени вод је описан подужним параметрима и дужином. За подужне параметре бирају се вриједности које се често срећу у мрежама. У основи за рад заштите дужина вода, односно његова укупна импеданса, није сама по себи битна, већ поменути однос *SIR*. Осим тога водови се грубо дијеле на краће (дужине до 100 km) и дуге, због ефеката продужења и скраћења зоне реаговања [28]. Због тога смо усвојили да дужина вода у тестовима буде константна 100 km (што је

примјереније нашим мрежама), а да се промјеном импеданси извора мијења *SIR*. Што се тиче квара, битна је његова локација и вриједност импедансе лука (R_L). Тип квара такође није од пресудне важности, па пошто се у преко 75% случајева у мрежи дешавају једнополни кратки спојеви, ми такође алгоритме тестирамо на тај тип квара.

8.1 Резултати тестирања алгоритама

Тестирање алгоритама се одвија по принципу фиксирања свих промјенљивих на неке произвољно изабране вриједности, док се само једна од њих мијења у широким границама. При томе се прати или досег алгоритама у односу на предвиђену зону заштите, или се прати вријеме детекције квара. Затим се промијени вриједност неког од параметара, па се тестирање понови. Циљ је да се утврди при којим вриједностима појединих параметара симулације досег прелази неке критичне вриједности, или опада испод неких доњих граница. Тиме се добијају индиректни показатељи поузданости и сигурности, али није могуће утврдити њихове вриједности. Други циљ је да се упореде времена реаговања алгоритама у различитим ситуацијама како би се процијенило који алгоритам је бржи.

Прије тестирања потребно је изабрати оптималне досеге самих алгоритама по R оси, а то су R_{pod} , код полигоналне карактеристике и N код кружне карактеристике. У [25] смо за избор оптималног досега користили детерминистички приступ гдје смо за разне задате отпорности лука R_L и подешења алгоритма N пратили вриједности нежељеног проширења (*Overreach*) и скраћења (*Underreach*) досега. Овдје не користимо тај приступ јер на располагању имамо стохастички модел мреже, на основу којег је нађено најбоље подешење досега алгоритама. Резултати су дати у десетој глави, а сада наводимо да су усвојене вриједности $R_{pod} = 35 \Omega$ и $N = 9$.

У првој серији тестова посматран је утицај оптерећења вода и отпорности лука на досеге алгоритама. Углови θ су мијењани у опсегу $-20^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$, док је отпорност

лука узимала вриједности до 20Ω . Резултати су приказани у табелама 8.1, 8.2 и 8.3. Може се уочити да у одсуству отпорности лука досези остају у близини подешених у цијелом опсегу промјене оптерећења, што је у складу с анализом датај у седмој глави. Порастом отпорности лука расте и одступање стварног од подешеног досега заштите. Може се уочити да нема значајне разлике између досега предложених полигоналних карактеристика (POLI123) и контролне на бази DFT (POLI_{DFT}).

Табела 8.1 – Досег заштите у % за различите углове оптерећења θ , при изабраној отпорности лука на мјесту квара $R_L = 0 \Omega$

Досег заштите у [%] при: $R_L = 0 [\Omega]$, $R_{POD} = 35 [\Omega]$, $N = 9$

θ [°]	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20
POL11	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
POL12	85.00	84.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
POL13	87.00	87.00	87.00	87.00	87.00	86.00	86.00	86.00
POL _{DFT}	83.00	83.00	83.00	83.00	83.00	83.00	83.00	83.00
MHO	82.00	83.00	84.00	84.00	86.00	83.00	87.00	88.00
MHO _{DFT}	83.00	83.00	84.00	84.00	86.00	85.00	87.00	88.00

Табела 8.2 – Досег заштите у % за различите углове оптерећења θ , при изабраној отпорности лука на мјесту квара $R_L = 10 \Omega$

Досег заштите у [%] при: $R_L = 10 [\Omega]$, $R_{POD} = 35 [\Omega]$, $N = 9$

θ [°]	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20
POL11	81.00	82.00	83.00	84.00	90.00	92.00	93.00	94.00
POL12	80.00	81.00	82.00	84.00	88.00	90.00	92.00	94.00
POL13	83.00	84.00	86.00	97.00	90.00	93.00	94.00	97.00
POL _{DFT}	80.00	81.00	82.00	83.00	84.00	90.00	92.00	93.00
MHO	76.00	78.00	80.00	81.00	80.00	83.00	84.00	89.00
MHO _{DFT}	77.00	78.00	80.00	81.00	81.00	83.00	84.00	87.00

Код свих полигоналних карактеристика може се запазити прекорачење досега код позитивних углова оптерећења, и смањење досега при негативним угловима оптерећења, као што је описано у глави 7. Код кружних карактеристика је примјетно продужење опсега при $R_L = 10 \Omega$, али се при $R_L = 20 \Omega$ јавља смањење опсега без обзира на знак угла θ . Узрок те појаве је то што велике отпорности

лука излазе и оквира кружне карактеристике без обзира на оптерећење вода. Тиме се добија нешто већа сигурност алгоритма, али је скраћење досега значајно веће у односу на полигоналне карактеристике, што значи да је и поузданост мања. У сваком случају тестирања потврђују да је покривеност кварова са луком слабија код кружних карактеристика.

Табела 8.3 – Досег заштите у % за различите углове оптерећења θ , при изабраној отпорности лука на мјесту квара $R_L = 20 \Omega$

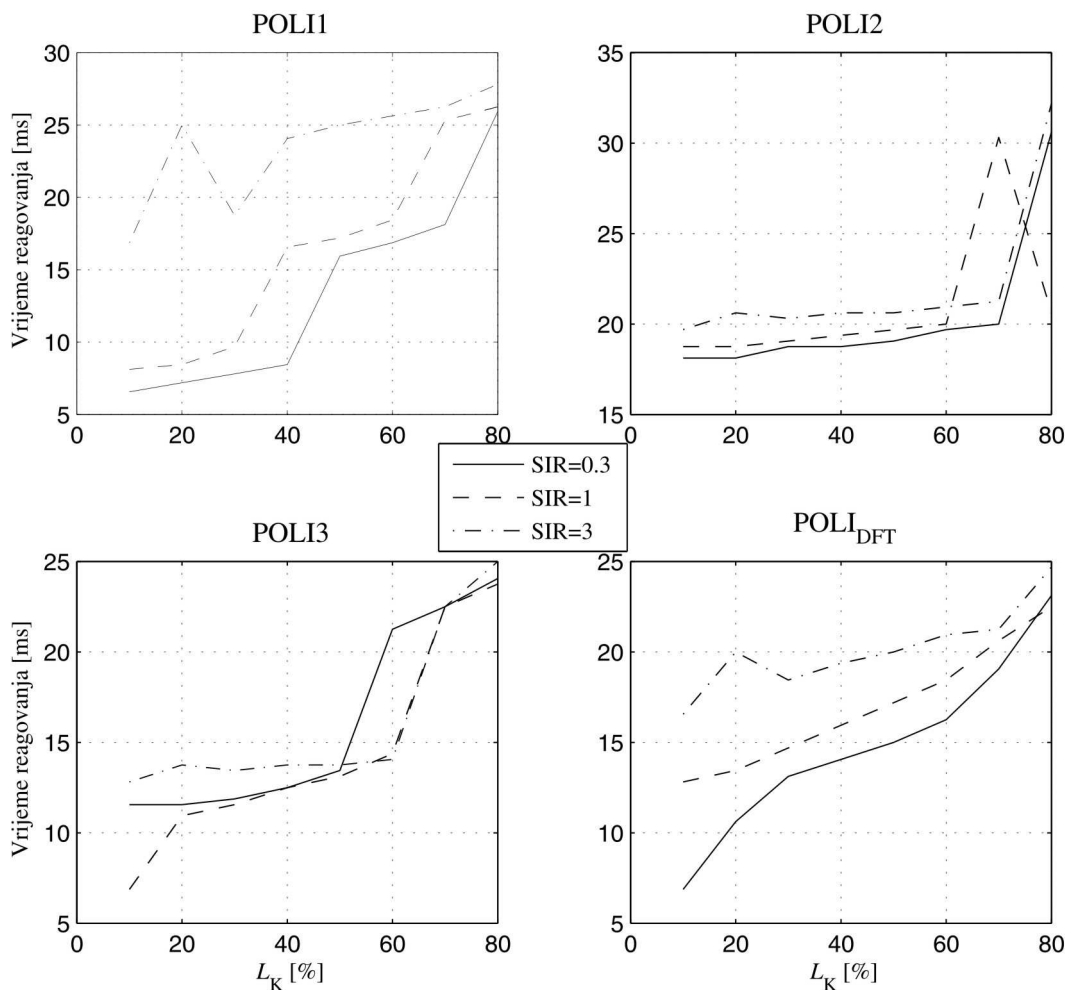
Досег заштите у [%] при: $R_L = 20 [\Omega]$, $R_{POD} = 35 [\Omega]$, $N = 9$

θ [°]	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20
POL11	74.00	77.00	79.00	81.00	83.00	85.00	89.00	91.00
POL12	74.00	77.00	80.00	82.00	83.00	83.00	85.00	87.00
POL13	75.00	77.00	78.00	79.00	82.00	84.00	85.00	88.00
POL _{DFT}	73.00	75.00	76.00	77.00	82.00	83.00	84.00	89.00
МНО	59.00	61.00	62.00	64.00	68.00	69.00	70.00	73.00
МНО _{DFT}	60.00	61.00	63.00	64.00	67.00	68.00	69.00	73.00

У другој серији тестова анализиран је утицај локације квара и промјене SIR на вријеме реаговања алгоритма на квар. Потребно је нагласити да је за сваки алгоритам одређено оптимално сигурносно кашњење, као вријеме између тренутка детекције квара и реаговања на квар. Сигурносна кашњења су објашњења у десетој глави, а оптималне вриједности за сваки алгоритам дате су у табели 10.3. Са слике 8.2 се може уочити да је утицај промјене SIR највећи код алгоритма POL11, а најмањи код POL12, прије свега због много већих почетних кашњења у детекцији квара код POL12. Код МНО алгоритма је утицај SIR такође велики, слика 8.3. Да би се лакше упоредила времена реаговања алгоритма, дати су упоредни дијаграми на сликама 8.4, 8.5 и 8.6. Са слике 8.4 може се уочити да је при $SIR = 0.3$, за највећи број локација квара, најбржи алгоритам POL11. Како расте SIR тако се његова брзина изједначава са POL_{DFT}, а затим POL_{DFT} постаје бржи у детекцији квара. Могло би се закључити да је у просјеку најбржи алгоритам POL13, када се у обзир узму сва три дијаграма.

Ако посматрамо алгоритме са кружном карактеристиком, можемо закључити да је при $SIR = 0.3$ брзина оба алгоритма приближно иста, али са порастом SIR се

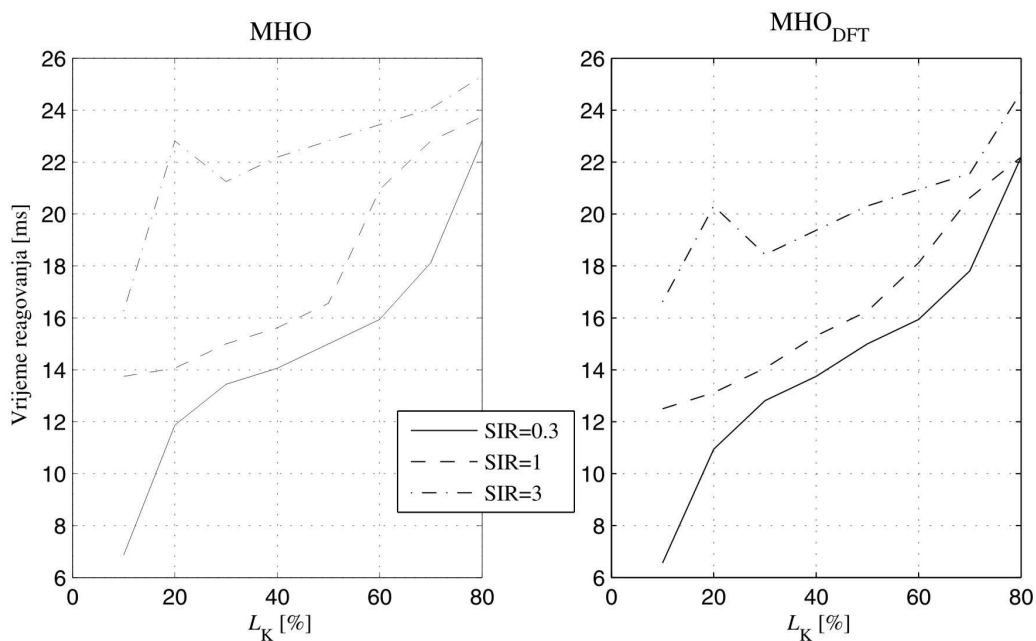
показује да алгоритам MHO_{DFT} постаје бржи од алгоритма MHO . Узрок тога је кашњење приликом реализације карактеристике у временском домену. Овај узрок је мање изражен код алгоритма са полигоналном карактеристиком, о чему ће више ријечи бити у десетој глави. Заједничко за све алгоритме је да вријеме детекције квара расте са удаљеношћу квара од мјеста на коме је лоциран дистантни релеј.



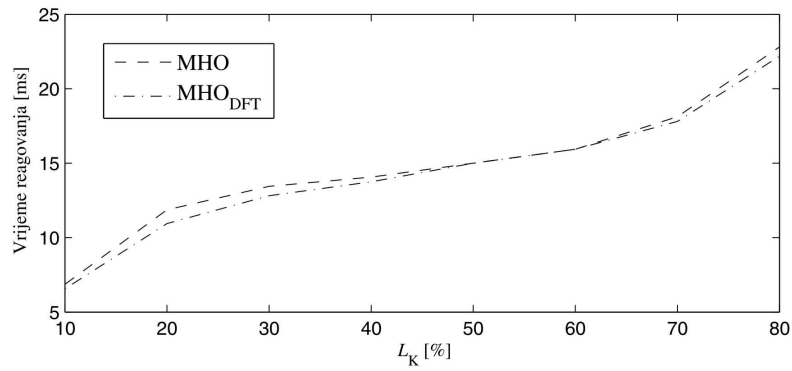
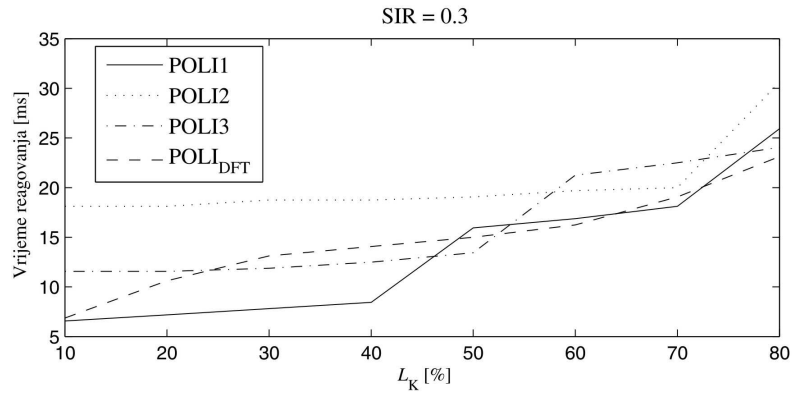
Слика 8.2 – Вријеме реаговања алгоритма са полигоналном карактеристиком у функцији локације квара за различите вриједности SIR

Након тестирања можемо рећи да је алгоритам MHO_{DFT} бржи од алгоритма MHO , а да су грешке у досезима приближно исте, па је закључак да је MHO_{DFT} бољи од алгоритма MHO . Код полигоналних карактеристика ситуација је мало сложенија. У просјеку POLI3 је најбржи, али при $R_L = 10 \Omega$ има нешто веће прекорачење

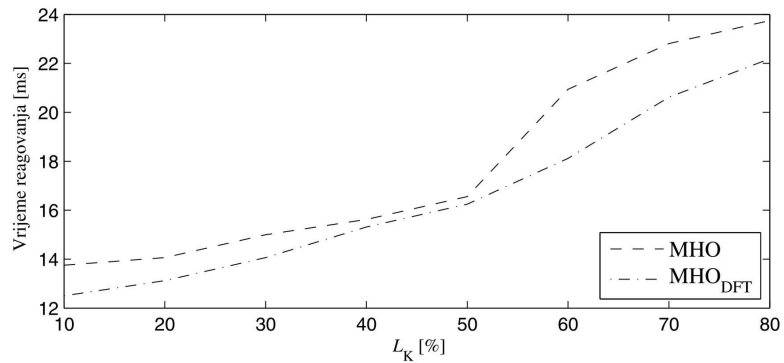
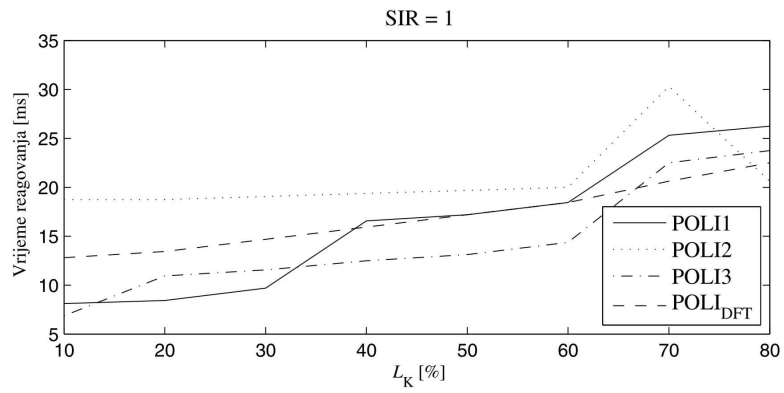
досега. Ако се то изузме, могло би се закључити да је он најбољи од алгоритама са полигоналном карактеристиком. Што се тиче POLI2, он је у просјеку најспорији, па остаје да поредимо POLI1 и POLI_{DFT}. У погледу поузданости за нијансу је бољи POLI1, док је у погледу сигурности за нијансу бољи POLI_{DFT}. За мање вриједности SIR бржи је POLI1, док је за веће вриједности бржи POLI_{DFT}. Ако неки од алгоритама у цијелом посматраном опсегу није бољи од неког другог алгоритама, онда није могуће дати коначни суд о томе који од њих је бољи. Јасно је да ће у реалним условима пресудити којом учестаношћу се поједини параметри налазе у једном, а којом учестаношћу у другом опсегу. Овдје та информација недостаје па нема ни коначне оцјене, ни бројних вриједности за поузданост, сигурност и вријеме реаговања алгоритама.



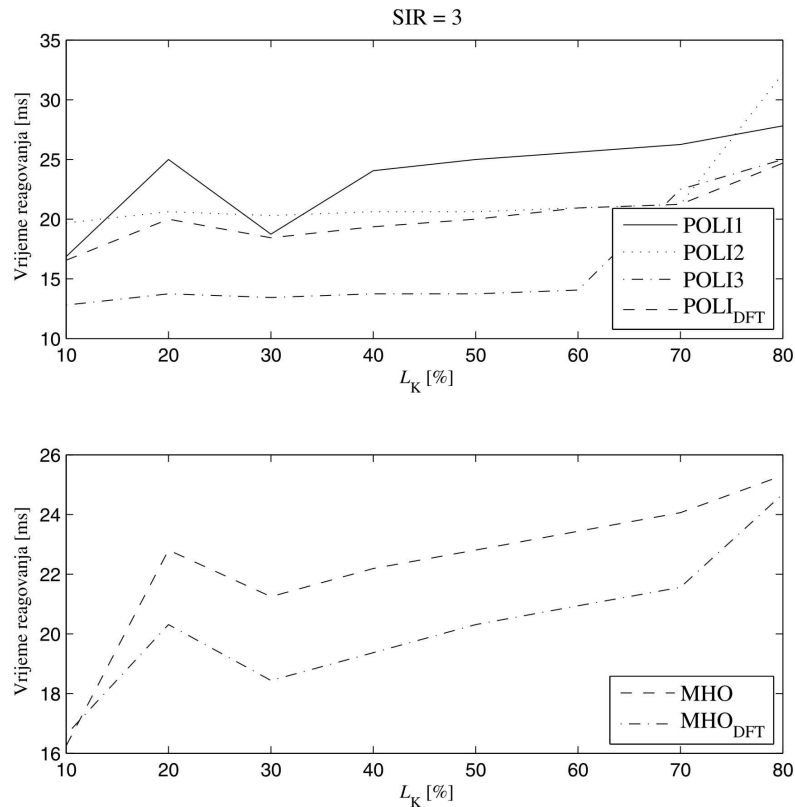
Слика 8.3 – Вријеме реаговања алгоритама са кружном карактеристиком у функцији локације квара за различите вриједности SIR



Слика 8.4 – Вријеме реаговања алгоритама при $SIR = 0.3$



Слика 8.5 – Вријеме реаговања алгоритама при $SIR = 1$



Слика 8.6 – Вријеме реаговања алгоритама при $SIR = 3$

При тестирањима је, осим анализираниог параметра, потребно изабрати и вриједности свих осталих параметара симулације, што такође утиче на резултат, а није сасвим одређено којих вриједности се треба држати. Нереалност тестова се огледа и у томе што се са подједнаком тежином узимају резултати и са $SIR = 0.3$, као и са $SIR = 3$, иако вриједност SIR много чешће лежи у околини 0.3 него у околини 3. То се дешава и са другим параметрима. Ако се узму неке процијењене просјечне вриједности онда губимо сценарије у којима нека комбинација више фактора нарушава перформансе. Друга крајност је тестирање при широком опсегу промјена свих параметара, што је обимно и води бројним нереалним сценаријима. Због тога овај приступ треба користити као једну додатну процјену перформанси алгоритама, али која не даје коначну информацију о поузданости, сигурности и просјечном времену реаговања алгоритама. Тестирање базирано на стохастичком приступу је представљено у глави 10.

9. СТОХАСТИЧКИ МОДЕЛ МРЕЖЕ

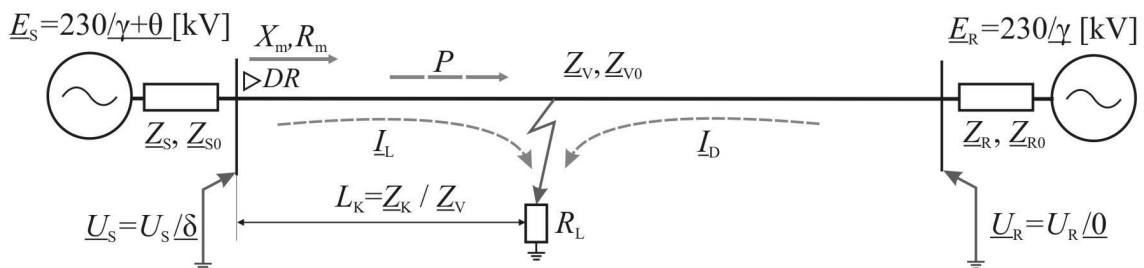
Основна мотивација за стохастички приступ тестирању алгоритама је потреба за процјеном поузданости, сигурности и просјечне брзине детекције квара тестираних алгоритама. Као што смо видјели у претходној глави, детерминистички приступ тестирању, иако пружа много корисних информација, не може дати процјену поменутих величина. Основа овог приступа је у познавању функција густине расподеле свих значајних параметара симулације. Параметри се сваки пут генеришу случајно, врши се симулација квара, записују се времена реаговања, или изостанак реаговања тестираних алгоритама, и поступак се понавља хиљадама пута. На крају се преброје погрешна реаговања и израчуна се поузданост и сигурност алгоритама. Из расподеле брзина реаговања утврди се просјечно вријеме реаговања сваког алгорита. Тиме је искључена субјективност у избору параметара, а такође је избјегнуто и понављање великог броја нереалних сценарија који кваре општи резултат тестирања.

На слици 9.1 су приказани параметри симулације и издвојене све величине чију расподелу је неопходно познавати како би било извршено тестирање алгоритама. Може се уочити да је неопходно познавати функције расподеле 6 величина:

- $\underline{Z}_S, \underline{Z}_R$, – директне импедансе мрежа на крајевима штићеног вода. Нулте импедансе мрежа рачунамо у функцији директних и није их потребно независно задавати. Пошто и однос X_S/R_S има типичне вриједности зависно од врсте мреже, може се усвојити да је код импеданса мреже једина непозната величина X_S .

- γ – угао напона при коме се дешава квар, од кога зависи вриједност опадајуће једносмјерне компоненте;
- θ – угао напона којим одређујемо фазну разлику напона на крајевима штићеног вода, која утиче на локацију квара која се види на мјесту уградње релеја;
- L_k – локација квара на штићеном воду ($L_k = X_m / X_V$);
- R_L – отпорност лука на мјесту квара;

Ни тип квара ни дужина вода нису од пресудног утицаја на резултате симулације. Због тога бирамо најчешћи квар у мрежи, једнополни кратак спој, а за дужину вода усвајамо 100 km, што је разумно за државе које нису географски велике [28]. Што се тиче дужине вода ту је најважније да однос $SIR = \underline{Z}_S / \underline{Z}_V$ буде одговарајући за анализирану мрежу.



Слика 9.1 – Усвојени модел мреже за тестирање алгоритама дистантних заштита

У циљу одређивања потребних функција расподеле коришћени су:

- софтверски пакети *Power System Assistant* [46], *Power System Simulator* [47];
- записи токова снага и ефективних вриједности напона на водовима преносних мрежа (*SCADA- Supervisory Control And Data Acquisition* систем [50]);
- записи кварова прикупљани са дистантних заштита.

9.1 Симулације трополних кратких спојева

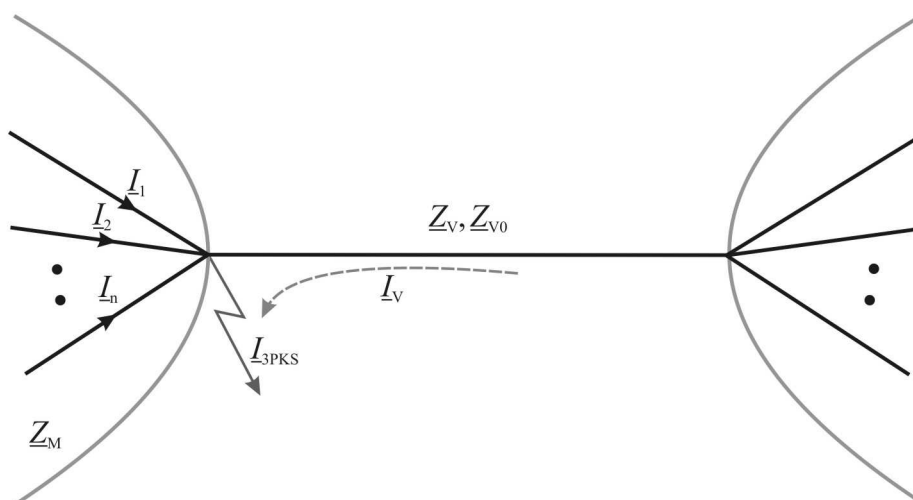
За симулације се користи модел европске преносне мреже (*UCTE - Union for the Coordination of the Transmission of Electricity*). Симулације трополних кратких

спојева дају информацију о импеданси мреже у чвору у коме се дешава кратак спој. На слици 9.2 је приказан чвор мреже у коме се симулира трополни кратак спој и струје квара које долазе по водовима који се сустичу у чвор:

$$I_{3PKS} = I_V + \sum_{i=1}^n I_i . \quad (9.1)$$

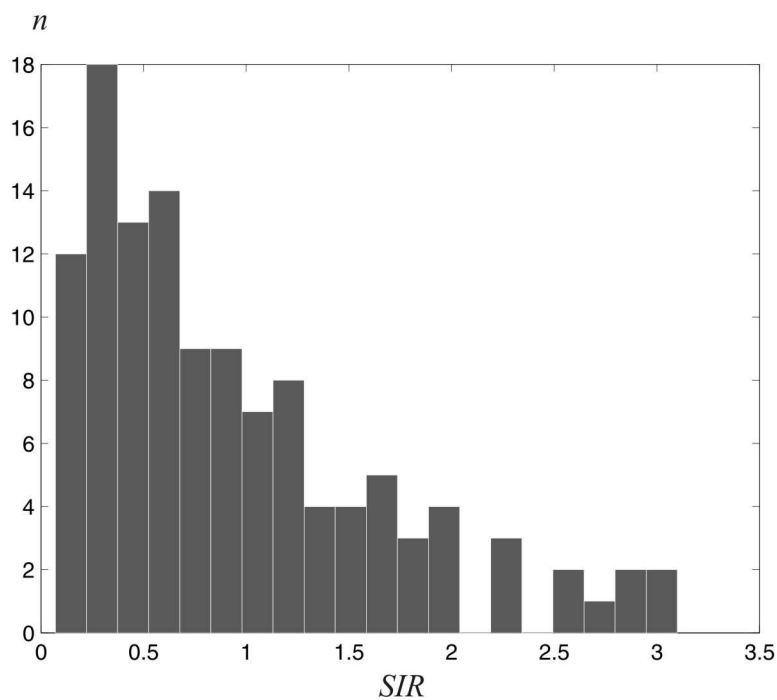
Наш циљ је да се у чвору у коме се задаје квар одреде вриједности SIR према водовима који се сустичу у чвор. Да би се добио тражени податак при свакој симулацији је потребно од укупне струје трополног кратког споја одузети дио струје који долази по посматраном воду. Из преостале струје и напона чвора се одређује импеданса еквивалентне мреже \underline{Z}_M , која подијељена импедансом посматраног вода даје вриједност $SIR = |\underline{Z}_M / \underline{Z}_V|$:

$$\underline{Z}_M = \frac{U_{fr}}{\sum_{i=1}^n I_i} = \frac{U_{fr}}{I_{3PKS} - I_V} . \quad (9.2)$$

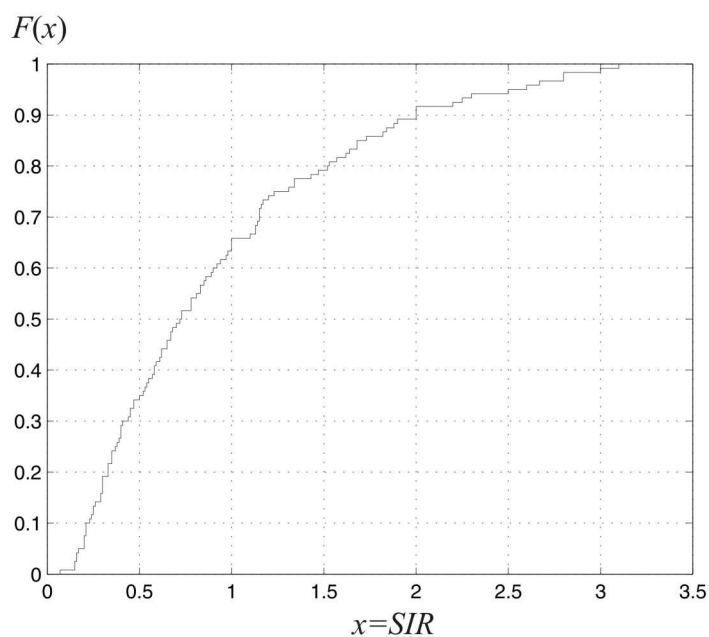


Слика 9.2 – Симулација кратког споја у мрежи у циљу добијања вриједности SIR

Кварови су задавани у чворовима мрежа Босне и Херцеговине и Србије, на напонским нивоима 110, 220 и 400 kV. Симулацијама је добијено 120 вриједности SIR , чији хистограм је приказан на слици 9.3. Може се уочити да су вриједности SIR најучесталије у интервалу 0 до 1 и да нису прелазиле вриједност 3. Средња вриједност износи 0.94, док је стандардна девијација 0.72. На слици 9.4 је приказана кумулативна функција расподеле (CDF – *Cumulative Distribution Function*) случајне промјенљиве SIR .



Слика 9.3 – Хистограм врједности SIR добијених симулацијама трополног кратког споја



Слика 9.4 – Кумулативна функција расподеле случајне промјенљиве SIR

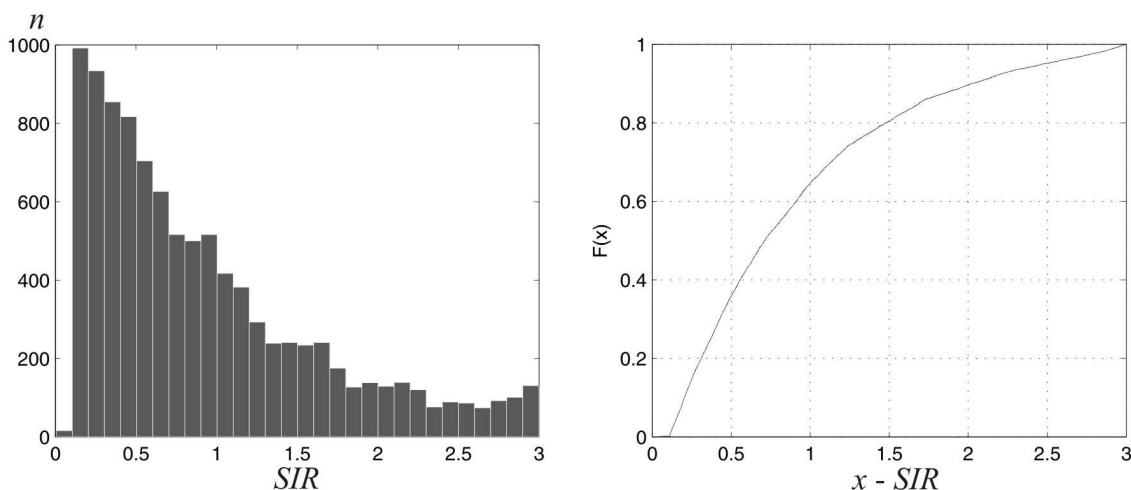
Покушај апроксимације густине расподеле случајне промјенљиве SIR , неком познатом густином расподеле, није дао задовољавајуће резултате јер је промјенљива повремено узимала нереално високе врједности које су доводиле до неприхватљивих радних стања. Да би се увело ограничење у могуће

вриједности SIR , а да распоdjела буде што сличнија полазној, апроксимирани смо кумулативну функцију распоdjеле (са слике 9.4) користећи 10 линеарних сегмената (табела 9.1).

Табела 9.1 – Тачке на кумулативној функцији распоdjеле SIR између којих је извршена линеаризација

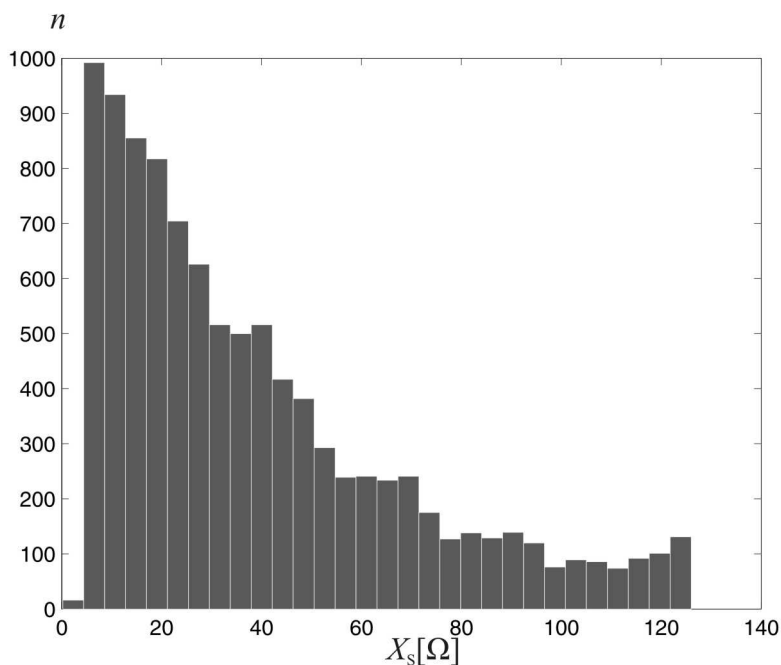
x	0.1077	0.2591	0.500	0.7227	1.007	1.251	1.7300	2.299	2.8	3
$F(x)$	0.0015	0.1521	0.353	0.5013	0.6473	0.7405	0.8595	0.9336	0.9765	1

Генерисање произвољног броја случајних промјенљивих SIR за потребе симулације врши се на основу генерисања вриједности случајне промјенљиве по униформној распоdjели на интервалу 0 до 1, која представља вриједност $F(x)$ на слици 9.5, а затим се преко линеаризованих сегмената одреде случајне промјенљиве x које представљају SIR . Хистограм и кумулативна функција распоdjеле, на овај начин генерисаних 10000 вриједности случајне промјенљиве SIR , приказани су на слици 9.5. Може се уочити да облик хистограма генерисане промјенљиве приближно одговара облику добијеном из симулација приказаном на слици 9.3. Средња вриједност SIR износи 0.92, док је стандардна девијација 0.71.



Слика 9.5 – Хистограм и кумулативна функција распоdjеле 10000 генерисаних вриједности SIR

На крају се, узевши у обзир усвојену импедансу штићеног вода, добија густина расподјеле случајне промјенљиве X_S , која је и била тражена. Расподјела X_R је идентична, али се генерише одвојено како би појединачне вриједности биле независне од X_S . На слици 9.6 је приказан хистограм генерисаних 10000 вриједности случајне промјенљиве X_S , колико и користимо у симулацијама кварова. Потребно је напоменути да смо усвојили да су промјенљиве X_S и X_R независне, јер нема правила ни зависности односа снага мрежа на крајевима посматраног вода. Може се десити да вод повезује јаку мрежу са неким мањим извором, тако да је на другој страни снага мреже много мања, при чему релеј инсталиран на другом крају вода види супротну ситуацију.

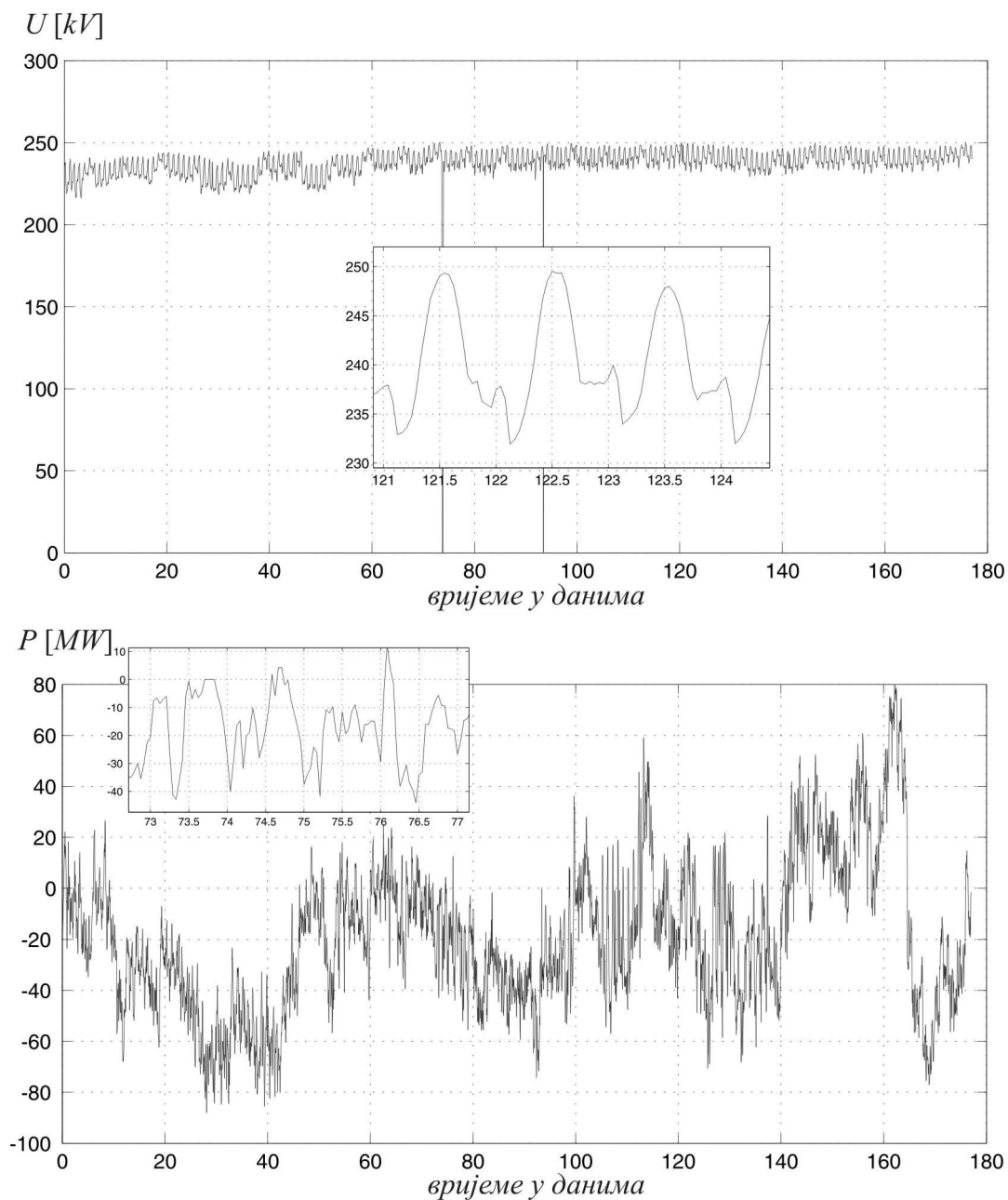


Слика 9.6 – Хистограм 10000 генерисаних вриједности X_S

9.2 Подаци добијени из SCADA система

SCADA је систем који омогућава мјерење, контролу и праћење индустријских система. Нама су били на располагању подаци са оперативног подручја Бања Лука. Прикупљено је преко 50000 сатних записа ефективних вриједности напона у чворовима и снага на водовима преносних мрежа. Подаци су узимани из свих годишњих доба на напонским нивоима 110, 220 и 400 kV. На слици 9.7 су

приказане промјене napona и снаге на једном 220 kV воду на интервалу од 6 мјесеци. Може се уочити да су промјене napona релативно мале на цијелом посматраном периоду, док снага узима разне вриједности и повремено мијења смјер. Такође се на увећаним дијеловима слика може уочити понављање сегмената на дневном нивоу.

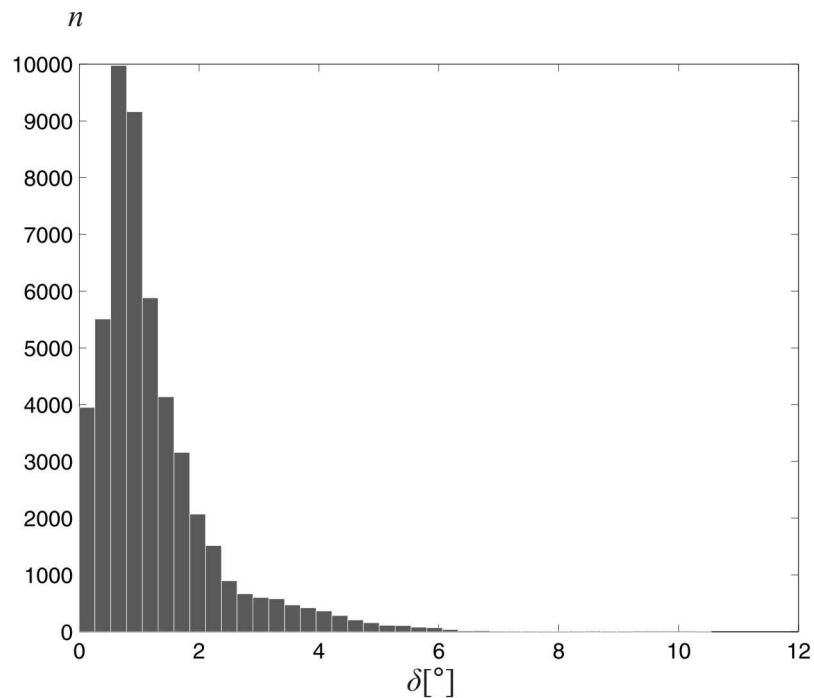


Слика 9.7 – Напон и снага на воду у периоду од 6 мјесеци

Пошто са аспекта релејне заштите вриједности снаге и напона саме по себи немају значајан утицај на детекцију квара, потребно је посматрати величину од интереса, а то је фазна разлика напона на крајевима штићеног вода, на слици 9.1 означена са δ . Зависност снаге од напона и угла δ [29] дата је изразом:

$$P = \frac{U_S \cdot U_R}{X_V} \sin \delta, \quad (9.3)$$

одакле се добија 50000 вриједности углова фазних разлика напона на посматраним водовима. Хистограм углова δ приказан је на слици 9.8, гдје се може уочити да углови веома ријетко прелазе 10° , што је у складу са чињеницом да се енергија преноси на релативно мале удаљености [28,29]. Средња вриједност угла δ износи 1.22° , док је стандардна девијација 0.98° . На слици 9.9 је приказана кумулативна функција расподеле случајне промјенљиве δ .



Слика 9.8 – Хистограм 50000 углова δ добијених из мреже

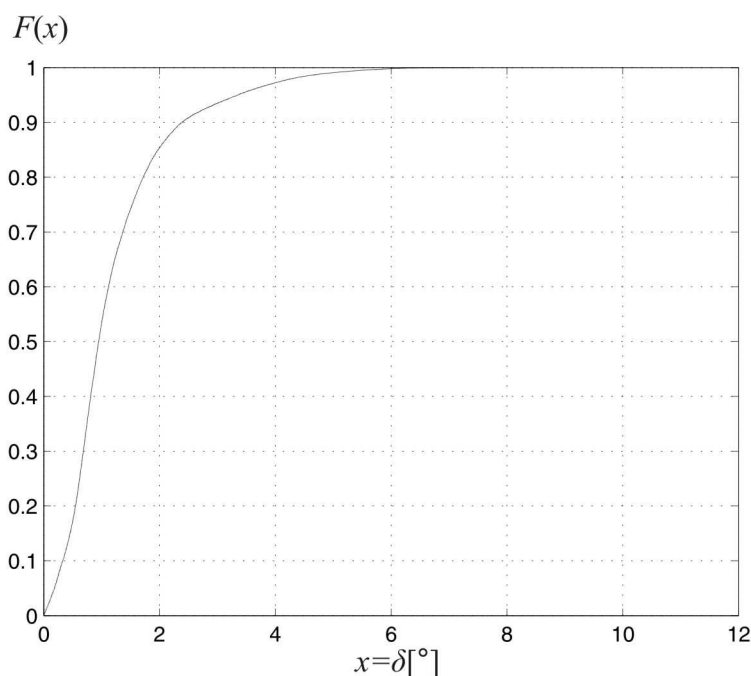
Овдје је проблем апроксимације густине расподеле још израженији, ако би се бирала нека од познатих функција густине расподеле. Основни разлог је што са аспекта стабилности нема смисла усвајати углове оптерећења који су блиски или већи од 90° , а који би се неминовно јављали у оваквим апроксимацијама. Због тога смо поново прибјегли апроксимацији функције са слике 9.9 линеарним

сегментима (табела 9.2). Када се на овај начин генерише 10000 углова δ , добијају се хистограм и кумулативна функција расподеле приказани на слици 9.10.

Средња вриједност генерисаног угла δ износи 1.27° , док је стандардна девијација 1.07° .

Табела 9.2 – Тачке на кумулативној функцији расподеле случајне промјенљиве δ између којих је извршена линеаризација

x	0.48	1.364	1.805	2.484	4.314	5.532	10.5
$F(x)$	0.162	0.7	0.819	0.907	0.98	0.995	1



Слика 9.9 – Кумулативна функција расподеле случајне промјенљиве δ

У посљедњем кораку је потребно израчунати углове θ , када су познати углови δ , пошто се у симулацији задају вриједности углова електромоторних сила напојних мрежа. Јасно је да ће при порасту импеданси напојних мрежа бити потребан и већи угао θ , да би се на крајевима вода добила задата фазна разлика δ . Ако претпоставимо да код унутрашњих импеданси напојних мрежа доминира реактанса, да се кроз цијелу грану са слике 9.1 преноси иста активна снага P , и да су разлике ефективних вриједности напона занемариве [29], онда кроз наредне изразе (уз израз 9.3) долазимо до траженог угла θ :

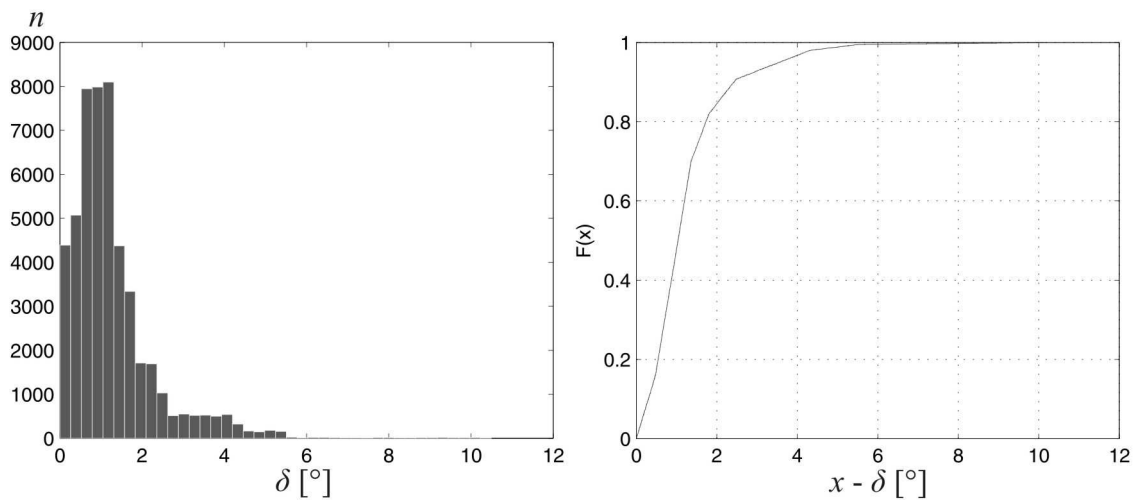
$$\theta = \delta + \delta_1 + \delta_2, \quad (9.4)$$

$$P = \frac{E_S \cdot U_S}{X_S} \sin \delta_1, \quad (9.5)$$

$$P = \frac{E_R \cdot U_R}{X_R} \sin \delta_2, \quad (9.6)$$

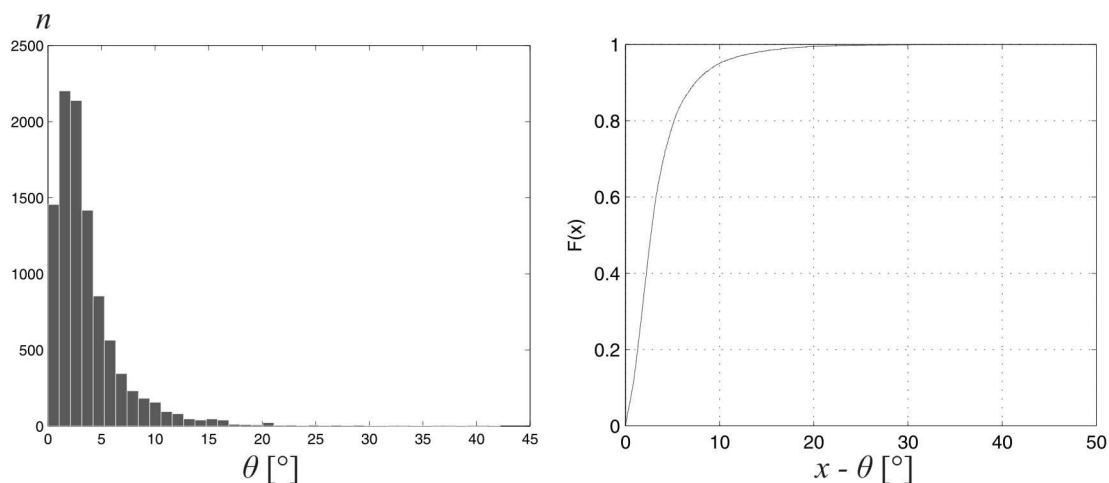
$$\theta \cong \delta + \arcsin\left(\frac{X_S}{X_V} \sin \delta\right) + \arcsin\left(\frac{X_R}{X_V} \sin \delta\right). \quad (9.7)$$

Угао δ_1 представља фазну разлику између напона \underline{E}_S и \underline{U}_S , угао δ_2 фазну разлику између \underline{U}_R и \underline{E}_R .



Слика 9.10 – Хистограм и кумулативна функција расподеле 10000 генерисаних вриједности угла δ

Када се из генерисаних вриједности случајних промјенљивих δ , X_S и X_R , и из израза (9.7) израчунају вриједности угла θ , добије се хистограм приказан на слици 9.11. Средња вриједност угла θ је 3.63° , док је стандардна девијација 3.48° . Може се уочити да је због присуства унутрашњих импеданси лијеве и десне мреже, средња вриједност угла θ , као и стандардна девијација, око три пута већа од средње вриједности и стандардне девијације угла δ .



Слика 9.11 – Хистограм и кумулативна функција расподеле 10000 генерисаних вриједности угла θ

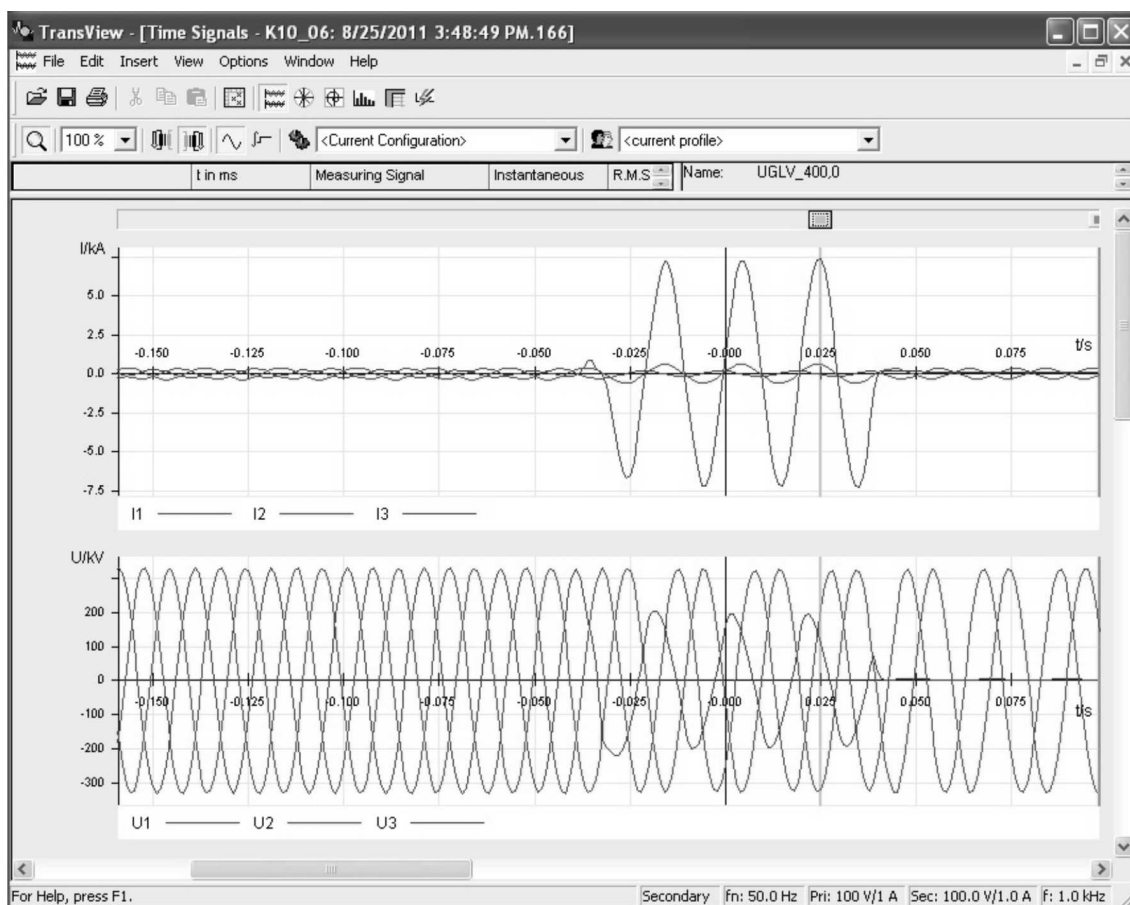
9.3 Записа кварова дистантних заштита

За комплетирање стохастичког модела за тестирање алгоритама било је неопходно прикупити што више записа кварова из преносне мреже. Ови записи пружају кључну информацију о расподјели отпорности лука на мјесту квара, која у великој мјери утиче на то да ли ће квар бити детектован на прави начин. Осим расподеле отпорности лука ови записи пружају могућност да се одреде густине расподеле локације квара на воду (L_K) и тренутка појаве квара, односно фазног угла напона γ , који утиче на вриједност опадајуће DC компоненте.

Захваљујући помоћи колега из преносних компанија, прикупљено је 120 записа кварова који су се у посљедњих неколико година десили у мрежама Босне и Херцеговине, Србије и Хрватске, на водовима напонских нивоа 110, 220 и 400 kV. Добијени подаци су анализирани у програмском пакету *Test Universe* фирме *Omicron*, програмом *TransView* [48]. Поменути програм омогућава преглед таласних облика свих фазних струја и напона (слика 9.12), активних и реактивних снага, те импеданси у свим мјерним петљама дистантне заштите (слика 9.13). Подаци су додатно анализирани тако што су издвојени одбирци напонских и струјних сигнала и независно рачунате мјерене импедансе квара, како би се

искључиле потенцијалне грешке приликом подешавања параметара у програму *TransView*.

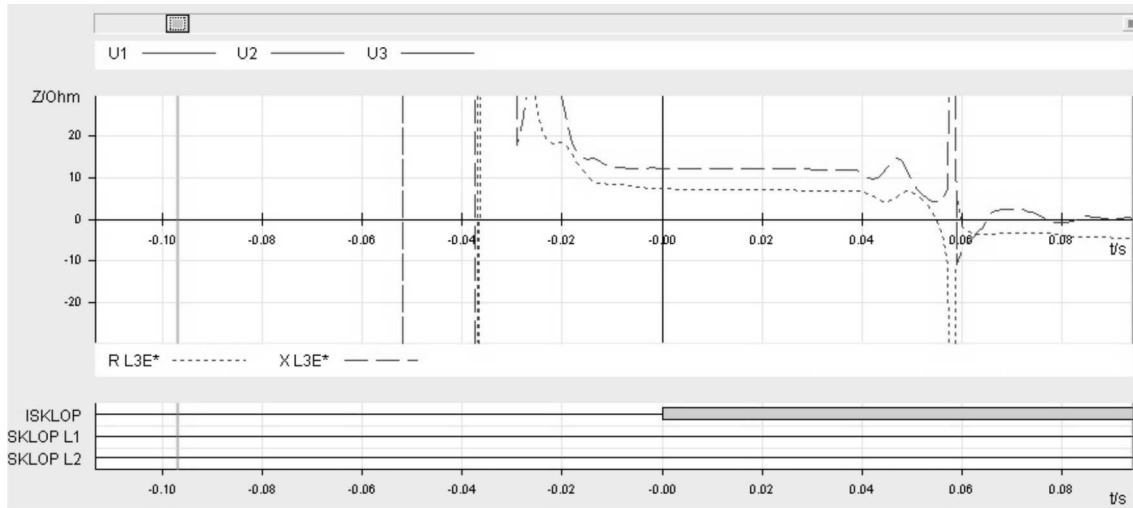
За одређивање угла γ посматран је таласни облик напона фазе погођене кваром. Тренутак појаве квара се на таласном облику напона детектује наглом промјеном тренутне вриједности (слика 9.14), а ако оне нису довољно уочљиве онда се тренутак појаве квара види из таласног облика фазне струје. Из максималне вриједности напона у претходном периоду и вриједности напона у тренутку појаве квара приближно се одреди угао γ .



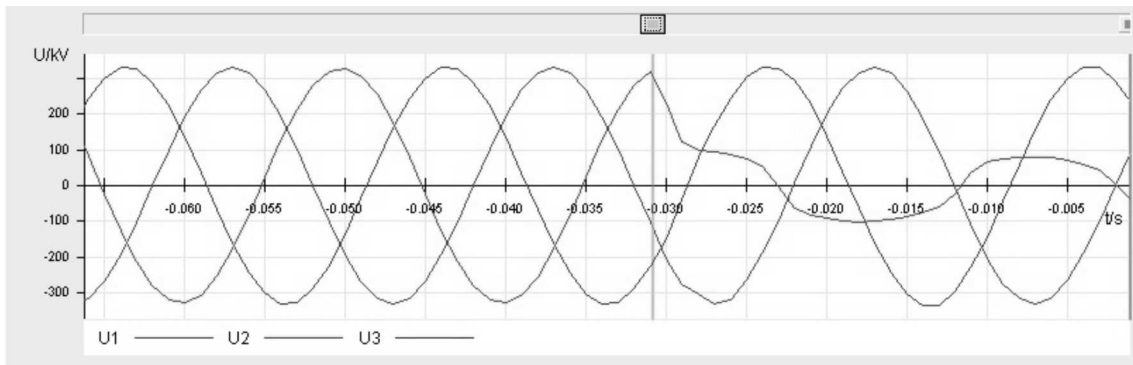
Слика 9.12 – Таласни облици фазних струја и напона, прије и након појаве квара, приказани програмом *TransView*

На овај начин је добијено 120 вриједности угла појаве квара чији је хистограм приказан на слици 9.15а. У овом случају смо усвојили униформну густину расподеле угла γ јер тренутак појаве квара не зависи од фазе напона, колико од

спољашњих околности које узрокују квар. На слици 9.15б дат је и хистограм генерисаних 10000 вриједности углова за потребе симулација. Углови су сврставани у опсег 0 до 90°, јер се на том интервалу дешава промјена опадајуће DC компоненте од њене минималне вриједности (при $\gamma = 90^\circ$) до максималне вриједности (при $\gamma = 0^\circ$).



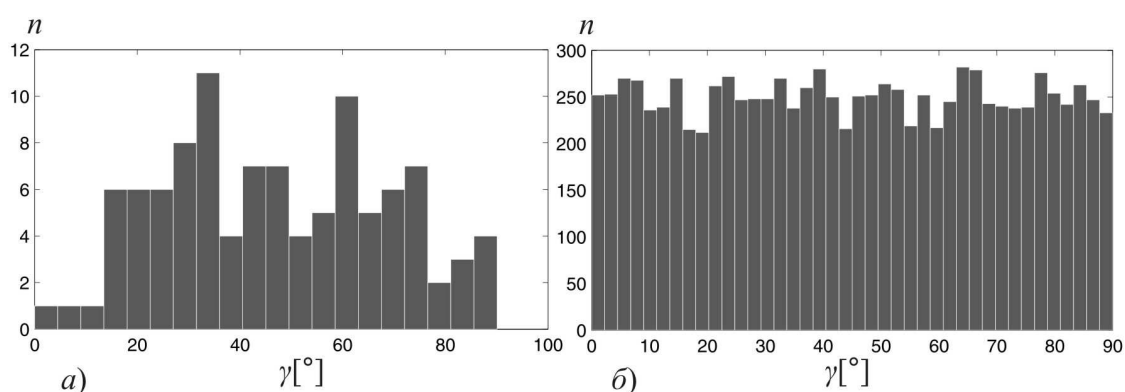
Слика 9.13 – Мјерена отпорност и реактанса у петљи квара и тренутак искључења квара



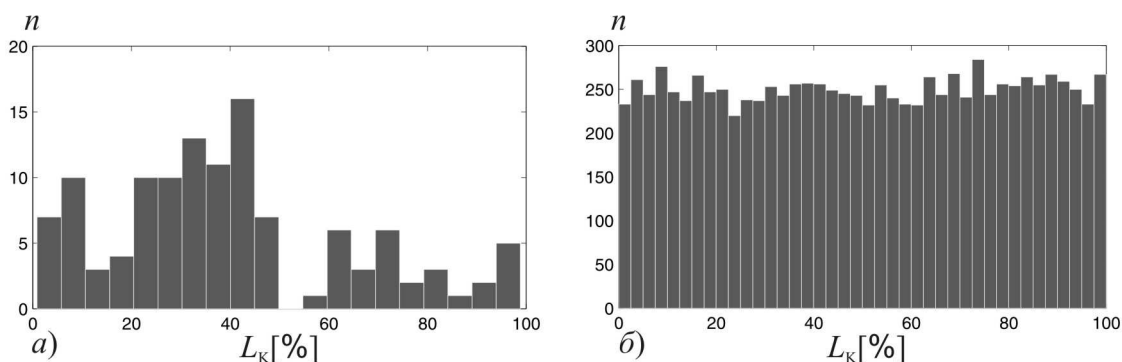
Слика 9.14 – Тренутак појаве квара детектован на таласном облику напона фазе погођене кваром

За одређивање локације квара на воду користимо мјерену вриједност реактансе на мјесту релеја X_m . У седмој глави је показано да на мјерену реактансу утиче отпорност лука и оптерећење вода, али за релативно мале углове δ , забиљежене на нашим водовима, ми усвајамо да је тај утицај мали. Осим тога нама локација

квара није битна у неком појединачном случају, него нам је важна њена густина расподеле. Поменуће грешке су по знаку некада позитивне, а некада негативне, зависно од смјера снаге, стога је оправдано сматрати да неће утицати на густину расподеле L_K . На слици 9.16а приказан је хистограм добијених локација квара, док је хистограм генерисаних 10000 вриједности L_K за потребе симулације приказан на слици 9.16б. Као и у претходном случају оправдано је усвојити униформну густину расподеле, иако на хистограму постоје регије мање густине због релативно малог броја доступних записа.



Слика 9.15 – Хистограм а) 120 углова γ добијених из мреже б) 10000 генерисаних вриједности углова γ



Слика 9.16 – Хистограм а) 120 локација квара L_K добијених из мреже б) 10000 генерисаних вриједности L_K

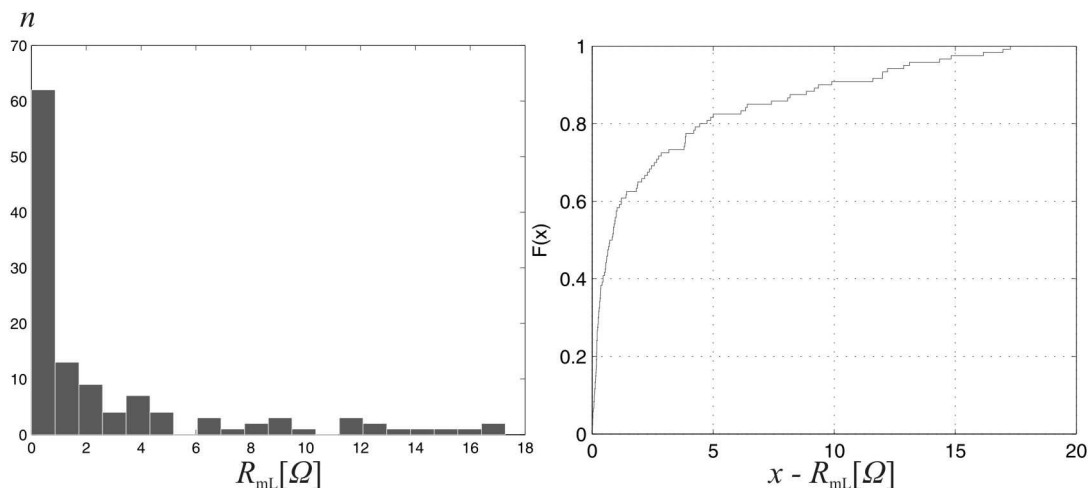
Последња густина расподеле потребна за симулације је густина расподеле отпорности лука R_L . На располагању имамо мјерене отпорности на мјесту релеја

R_m . Од мјерених вриједности отпорности треба одузети дио који чини отпорност самог вода, тако да остатак представља мјерену отпорност лука на мјесту релеја:

$$R_{mL} = R_m - L_K \cdot R_V. \quad (9.8)$$

Хистограм мјерених отпорности лука дат је на слици 9.17. Средња вриједност отпорности лука R_{mL} износи 2.86Ω , док стандардан девијација има вриједност 4.26Ω . За генерисање случајне промјенљиве R_{mL} користимо Вејбелову (*Weibull*) апроксимацију њене густине расподеле:

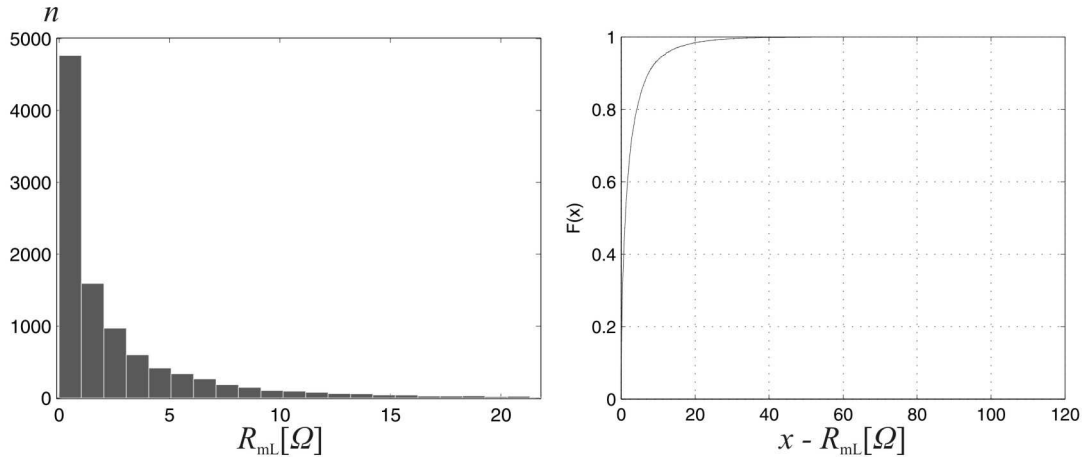
$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}, \quad x > 0, \quad a = 1.94941, \quad b = 0.619476. \quad (9.9)$$



Слика 9.17 – Хистограм и кумулативна функција расподеле 120 отпорности лука мјерених на локацији релеја R_{mL}

Када се, на основу поменуте апроксимације густине расподеле, генерише тражених 10000 вриједности случајне промјенљиве R_{mL} , добије се хистограм са слике 9.18. Средња вриједност отпорности лука добијене из поменуте расподеле износи 2.85Ω , док стандардна девијација има вриједност 4.88Ω . При овој апроксимацији функција $f(x)$ теоријски може имати произвољно велике вриједности. То значи да генерисане бројне вриједности случајне промјенљиве R_{mL} нису ограничене максималном вриједношћу од 18Ω , која се појавила у мјереним вриједностима. У пракси се могу десити кварови са врло великим вриједностима отпорности лука (преко 100Ω) па је зато потребно омогућити да се и у симулацијама повремено појаве тако високе вриједности. Због тога је, за

разлику од расподеле угла δ , у овом случају изабрана густина расподеле која оставља могућност таквог догађаја. Са слике 9.18 може се уочити да је на примјеру генерисаних 10000 вриједности R_{mL} добијена максимална вриједност која премашује 100 Ω .



Слика 9.18 – Хистограм и кумулативна функција расподеле 10000 генерисаних вриједности отпорности лука R_{mL}

У седмој глави је анализирано како на мјерену отпорност лука утичу стварна отпорност лука R_L , оптерећење вода, импедансе мрежа X_S и X_R и локација квара L_K . На слици 7.8 је илустрована зависност $R_{mL} = f(R_L)$, при чему ми због релативно малих вриједности δ и R_{mL} , претпостављамо да је грешка процјене удаљености квара довољно мала да отпорност лука може бити израчуната из израза:

$$R_L = R_{mL} \frac{1 + \frac{k}{3}}{1 + \frac{I_D}{I_L}}. \quad (9.10)$$

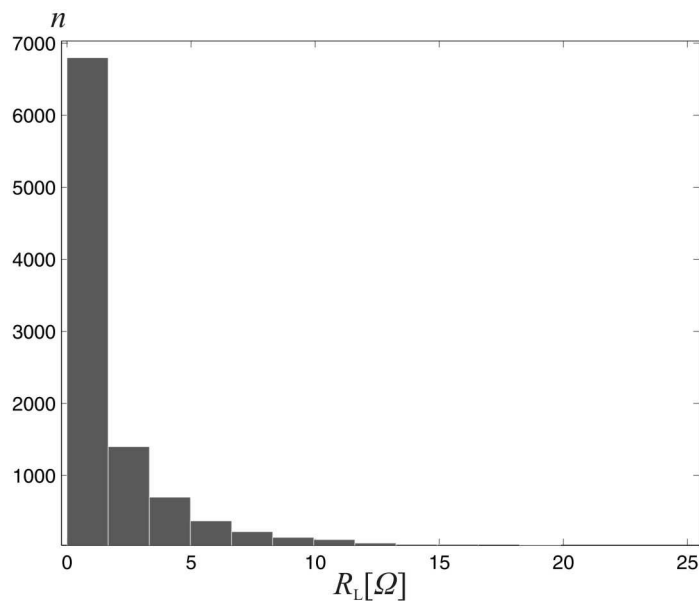
Ако однос струја које дотичу са лијеве и десне стране изразимо у функцији доминантних реактанси извора и штићеног вода, добијамо:

$$\frac{I_D}{I_L} = \frac{X_S + L_K X_V}{X_R + (1 - L_K) X_V}. \quad (9.11)$$

На крају долазимо до израза из којег се рачуна како задати отпорност лука у симулацији (R_L), да би на мјесту релеја била измјерена отпорност лука R_{mL} , при чему је потребно познавати и вриједности X_S и X_R :

$$R_L = R_{mL} \frac{1 + \frac{k}{3}}{1 + \frac{X_S + L_K X_V}{X_R + (1 - L_K) X_V}} \quad (9.12)$$

Примјеном претходног израза добија се хистограм отпорности лука које треба задати у симулацијама, приказан на слици 9.19. Средња вриједност отпорности лука R_L износи 2.13Ω , док стандардна девијација има вриједност 3.89Ω .



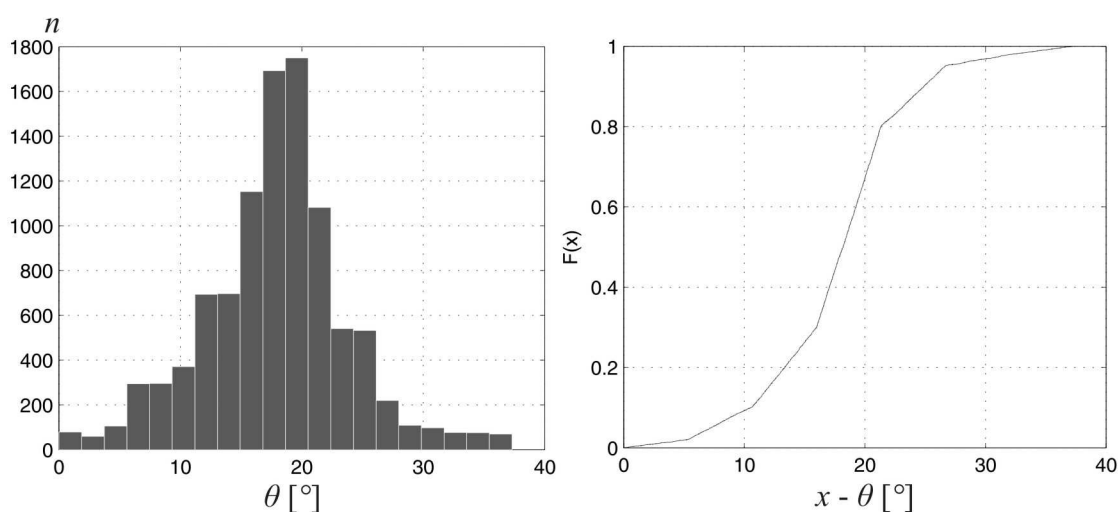
Слика 9.19 – Хистограм 10000 генерисаних вриједности отпорности лука на мјесту квара R_L

Код моделовања лука потребно је напоменути још једну ствар. Лук се може моделовати као константна отпорност на мјесту квара, из чега произилази и анализа приказана у седмој глави. Други приступ је да се лук моделује напоном који зависи од физичке дужине лука на мјесту квара. Тај напон нема облик чисте синусоиде него има и компоненте виших хармоника, да би био што сличнији стварном напону на мјесту квара чији је облик снимљен мјерењима у лабораторијским условима. Више о детекцији квара базираној на оваквом моделу напона може се наћи у [30]. Иако тачнији, овај модел лука није примијењен у овој дисертацији јер ми симулацију не базирамо на моделу, него на подацима из стварног енергетског система. Мјерене отпорности лука су мјеравније за процјену понашања алгоритама од симулације, па је наш једини задатак био да у

моделу лука задамо такве вриједности R_L да се на мјесту релеја добију отпорности R_{mL} које су што је могуће ближе мјерењима на реалним водовима преносне мреже. Због тога нама начин моделовања лука не утиче на добијене резултате симулација.

9.4 Расподјеле промјенљивих у случају већег оптерећења мреже

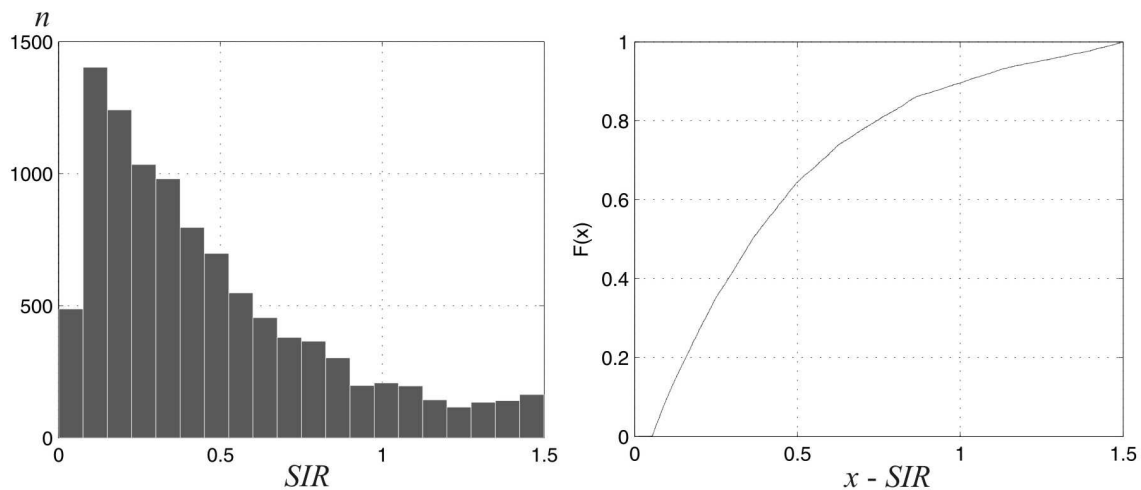
Да процјена поузданости, сигурности и брзине тестираних алгоритама не би била ограничена само на случај мрежа БиХ и Србије, одлучили смо генерисати најзначајније расподјеле случајних промјенљивих за сценарио мреже код које су оптерећења много већа него у мрежама БиХ и Србије. Повећана оптерећења узрокују веће вриједности углова θ и δ , али такву ситуацију имамо и у случају да се енергија преноси на већу удаљеност. Суштина је у томе да се тестирање врши при знатно већим вриједностима угла θ , без обзира на то шта их узрокује. Пошто нисмо у могућности да дођемо до података из једне такве мреже, преостаје нам да направимо грубу процјену уважавајући најважније одлике таквог преноса. На првом мјесту је потребно предложити расподјелу угла електромоторне силе θ . Кумулативну функцију расподјеле, приказану на слици 9.20, генерисали смо из неколико линеарних сегмената.



Слика 9.20 – Хистограм и кумулативна функција расподјеле 10000 генерисаних вриједности угла θ у случају већег оптерећене мреже

Средњу вриједност угла θ смо повећали преко 5 пута у односу на претходну мрежу (17.86 према 3.62 у мрежама БиХ и Србије). Може се уочити да су углови у највећој мјери груписани у интервалу 10° до 30° , за разлику од случаја на слици 9.11 гдје углови ријетко прелазе 10° . Тиме са аспекта детекције квара добијамо много гору ситуацију, јер ће ротације отпорности лука бити много веће.

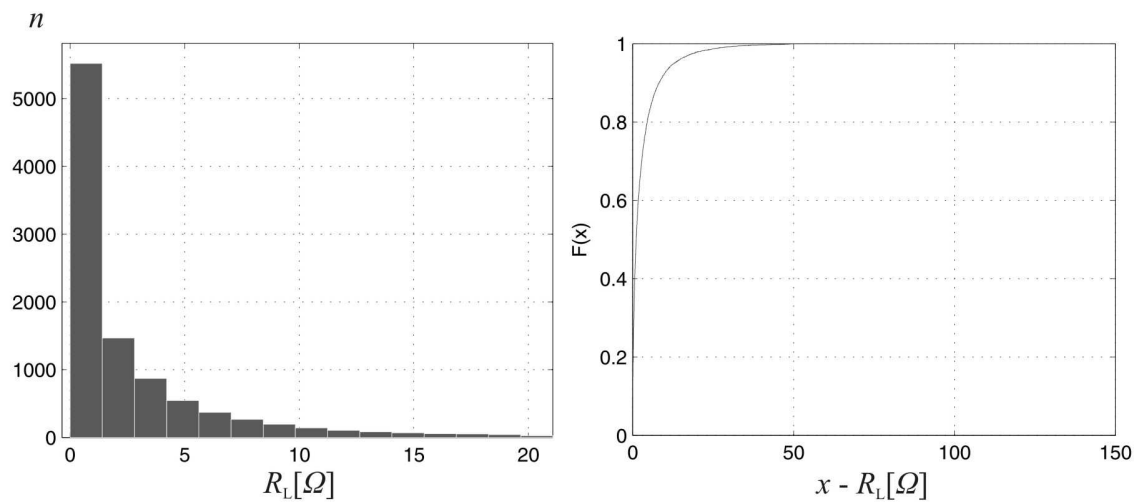
Друга промјенљива коју мијењамо је SIR , гдје усвајамо два пута мање вриједности у односу на претходни случај. Основни разлози су у томе што је при преносу на велике удаљености импеданса вода већа, а да би се преносила велика снага и напојна мрежа мора бити јача, што доводи до мањих вриједности SIR . Хистограм ове промјенљиве је приказан на слици 9.21.



Слика 9.21 – Хистограм и кумулативна функција расподеле 10000 генерисаних вриједности SIR у случају већег оптерећене мреже

Последња корекција коју вршимо је расподела промјенљиве R_L . Да бисмо симулирали неповољније услове по алгоритме, усвојили смо да промјенљива R_L има око 50% веће вриједности у односу на случај са слике 9.19. Средња вриједност отпорности R_L је са 2.13Ω повећана на 3.13Ω . Хистограм промјенљиве R_L , и кумулативна функција расподеле, приказане су на слици 9.22. Највећа отпорност лука која се јавља у симулацијама има вриједност 150Ω , што ће сигурно довести до тога да такви кварови не буду детектовани унутар области

реаговања. У пракси се, иако ријетко, дешавају и такви кварови, а њих би требало да детектују и искључе земљоспојне заштите.



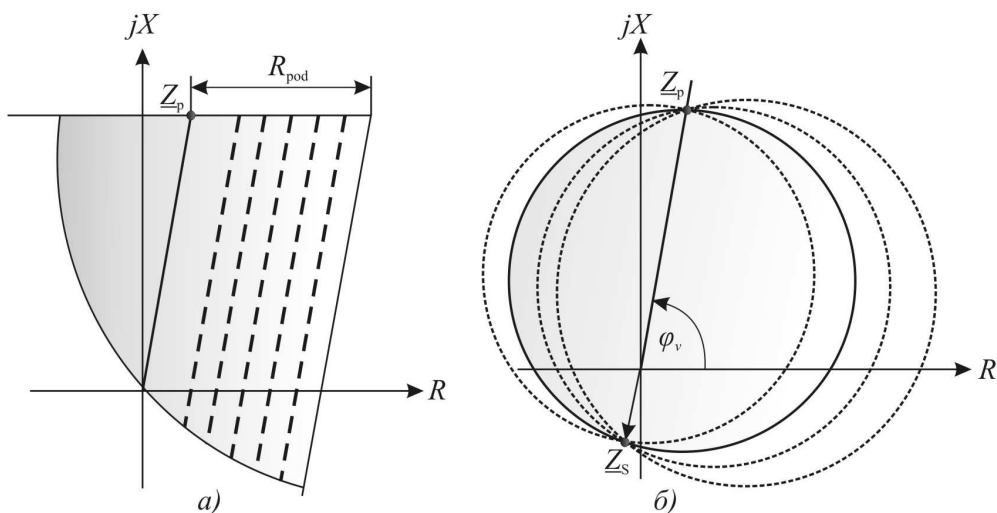
Слика 9.22 – Хистограм и кумулативна функција расподеле 10000 генерисаних вриједности R_L у случају већег оптерећене мреже

Што се тиче угла напона у тренутку појаве квара γ , и локације квара L_K , поново усвајамо униформне расподеле.

10. СТОХАСТИЧКИ ПРИСТУП ТЕСТИРАЊУ АЛГОРИТАМА

Основна сврха стохастичког приступа тестирању алгоритама јесте процјена поузданости, сигурности и просјечног времена реаговања дистантне заштите, што није могуће класичним детерминистичким приступом. У претходној глави су одређене расподјеле свих случајних промјенљивих неопходних да се обави тестирање. Један сет улазних података је базиран на подацима из мрежа Босне и Херцеговине и Србије, док је други сет података припремљен да симулира услове већег оптерећења мреже, или гдје се пренос обавља на веће удаљености. На слици 9.1 приказан је модел мреже у којој се задају радна стања и квар, које алгоритми морају правилно да детектују. Тестира се укупно 6 алгоритама, 4 са полигоналном карактеристиком реаговања (*POLI*) и два са кружном карактеристиком (*MHO*).

Пошто је дужина вода фиксна (100 km), а зона реаговања подешена на 85% укупне дужине вода, код карактеристике једино остаје да се још подеси досег по реалној оси. Код алгоритама са полигоналном карактеристиком овај досег подешавамо директно, при чему R_{pod} узима вриједности од 5 до 40 Ω (слика 10.1). Код кружне карактеристике угао подешавамо индиректно, кашњењем N које се креће од 5 до 11 одбирака. Веза између кашњења N и угла карактеристике φ дата је у табели 3.3. Треба запазити да је код ове карактеристике досег по R оси највећи када је N најмање.

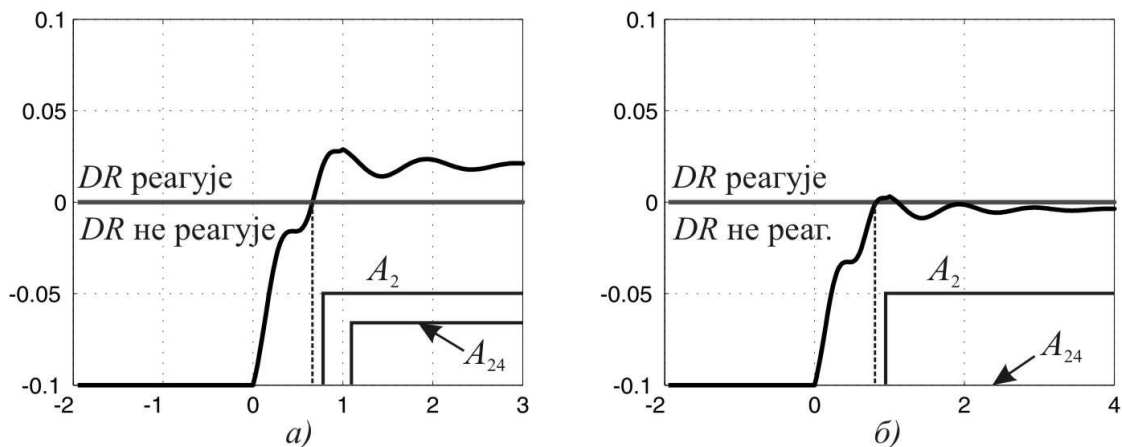


Слика 10.1 – Подешавање досега карактеристике по R оси а) Полигонална карактеристика б) Кружна карактеристика

У шестој глави је показано да алгоритми осјетљиви на присуство сметњи у сигналу могу погрешно детектовати квар. У неким случајевима је повољније имати неку временску задршку прије коначне одлуке о реаговању заштите. На слици 10.2 су илустрована реаговања два алгоритма на двије различите ситуације у мрежи. Један алгоритам након детекције квара има сигурносну задршку од 2 одбирка (A_2), док други има задршку од 24 одбирка (A_{24}). Очигледно други алгоритам реагује касније, након 18 периода одабирања у односу на први (слика 10.2а). Међутим, у случају квара у близини границе реаговања, када само привремено долази до испуњења услова реаговања, дужа временска задршка помаже да други алгоритам исправно препозна да квар није у зони реаговања (слика 10.2б). Из тог разлога је сваки од 6 поменутих алгоритама тестиран са по 10 различитих временских задршки, што значи да се практично сваки пут тестира 60 алгоритама. Тиме се може уочити колика задршка је оптимална за неки тип алгоритама.

Свако тестирање се састоји од 10000 симулација кварова. За сваки квар је познато да ли је био у зони реаговања или не, јер му је локација одређена случајном промјенљивом L_K . Граница прве зоне реаговања је помјерена на 85% укупне дужине вода како би се осигурално селективно реаговање узевши у обзир грешке напонских и струјних мјерних трансформатора, непознавање стварних

вриједности параметара вода и грешке заштите због ефеката описаних у седмој глави. Због тога се приликом тестирања дистантних заштита толерише да стварна граница реаговања има неко одступање од подешене. Најчешће се усваја толеранција од $\pm 5\%$, што за досег од 85% значи да су границе толерантне зоне 80.75% и 89.25% укупне дужине вода.



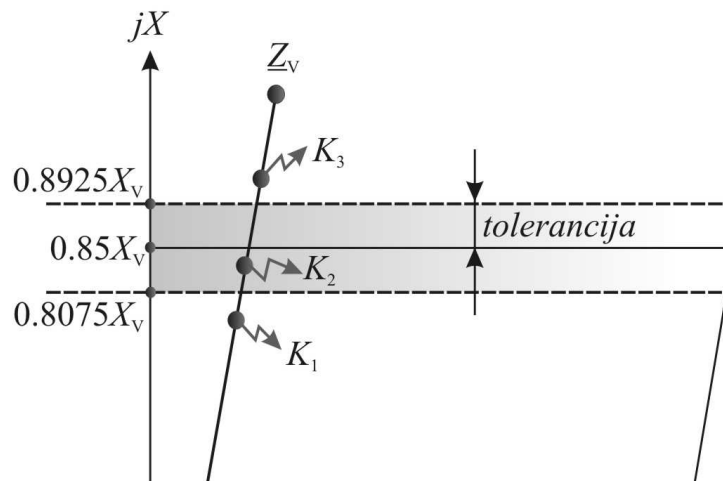
Слика 10.2 – Реаговање алгоритма при различитим вриједностима сигурносног каињења а) Квар у зони реаговања б) Квар на граници зоне реаговања

Наш први сет тестова биће са истом границом толеранције. То значи да у случају да алгоритам не одреагује на квар при $L_K < 80.75\%$ (квар 1 са слике 10.3), то се убраја у погрешно реаговање (*underreach*). У случају да алгоритам одреагује на квар при коме је $L_K > 89.25\%$ (квар 3 са слике 10.3), то се такође убраја у погрешно реаговање (*overreach*). Код кварова унутар „сиве зоне“, нити реаговања, нити нереаговања се не убрајају у погрешно реаговање. На крају се изброје сва погрешна реаговања у 10000 симулација кварова и изразе у промилима. За сва реаговања, која нису категорисана као погрешна, израчуна се просјечно вријеме реаговања у милисекундама. Да би се на крају стекао осјећај о перформансама алгоритма, и да би био изабран најбољи од 60 тестираних, предлагемо сљедећи критеријум оцјењивања:

$$Осјена = \frac{100}{(P_D + I_D + V_R)}, \quad (10.1)$$

при чему P_D представља број погрешних реаговања преко досега, у промилима (*overreach*), I_D представља број погрешних реаговања испод досега, у промилима

(*underreach*), док V_R представља просјечно вријеме реаговања. За сваку од ових величина је пожељно да буде што мања, па узимамо реципрочну вриједност њиховог збира. Алгоритам је бољи уколико има већу вриједност $Ocjena$.



Слика 10.3 – Опсег толеранције приликом доношења одлуке о погрешним реаговањима

10.1 Тестирање алгоритама на моделу мрежа БиХ и Србије

Након прве серије тестирања у којој су полигоналне карактеристике тестиране са подешеним досезима од 10Ω до 40Ω , при чему је толеранција била 5%, најбољи резултат, за услове у мрежама БиХ и Србије, постигнут је са полигоналном карактеристиком при досегу 35Ω (табела 10.1). При томе је алгоритам са најбољом оцјеном POLI1. Просјечно вријеме реаговања код најбољег алгоритма је 17.57 ms , број погрешних реаговања преко досега је 0.3% , а број погрешних реаговања испод досега је 1.1% . Други по оцјени је алгоритам на бази *DFT*, чији резултат је незнатно слабији. Код њега је нешто већи број погрешних реаговања испод досега, а нешто мањи број погрешних реаговања преко досега релеја. Вријеме реаговања је нешто спорије, 17.72 ms . Интересантно је примијетити да код полигоналних карактеристика кашњења у временском домену нису довела до повећања укупног кашњења алгоритма у односу на фазорски приступ. Основни разлог лежи у карактеру прелазног процеса након појаве квара. Алгоритам POLI2

има убједљиво најбржу детекцију квара, али и највише гријеша, што илуструје поменути сукоб брзине и сигурности алгоритма. Сличне перформансе у погледу поузданости и сигурности алгоритма потврђују да на њих највише утиче фреквентна карактеристика, која је код предложених алгоритма у временском домену једнако добра као код алгоритма на бази *DFT*.

Табела 10.1 – Подешени досег полигоналних карактеристика који даје најбољу оцјену тестираних алгоритма за мреже БиХ и Србије

		Полигоналне карактеристике $R_{pod}=35\Omega$									
Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реаг. [ms]	17.57	18.28	19.03	19.79	20.58	21.37	22.49	23.46	24.37	25.27
	Преко дос. [%]	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00
	Испод дос. [%]	1.10	1.20	1.40	1.40	1.50	1.70	1.80	1.90	1.90	1.90
	Осјена	5.27	5.06	4.85	4.67	4.49	4.30	4.08	3.93	3.79	3.68
POLI2	Вр. Реаг. [ms]	11.47	12.50	13.59	14.54	15.44	16.26	17.60	18.98	20.40	21.82
	Преко дос. [%]	97.40	93.70	87.60	76.90	62.10	46.90	22.20	5.10	0.50	0.20
	Испод дос. [%]	0.90	1.00	1.20	1.30	1.30	1.40	1.60	1.70	1.80	1.80
	Осјена	0.91	0.93	0.98	1.08	1.27	1.55	2.42	3.88	4.41	4.20
POLI3	Вр. Реаг. [ms]	17.80	18.64	19.55	20.49	21.44	22.37	23.69	24.79	25.69	26.57
	Преко дос. [%]	1.30	1.20	1.00	1.00	0.70	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	Испод дос. [%]	1.50	1.50	1.60	1.60	1.60	1.80	1.90	1.90	1.90	1.90
	Осјена	4.86	4.69	4.51	4.33	4.21	4.05	3.83	3.73	3.61	3.50
POLI _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	17.72	18.34	18.94	19.55	20.16	20.78	21.69	22.62	23.52	24.45
	Преко дос. [%]	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [%]	1.40	1.50	1.50	1.60	1.60	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
	Осјена	5.18	4.99	4.84	4.68	4.57	4.45	4.26	4.10	3.93	3.78

Алгоритми на бази кружне карактеристике су лошији, што је и очекивано с обзиром на покривеност зоне са отпорностима лука. Код кружних карактеристика боље перформансе има алгоритам на бази *DFT*, него предложени алгоритам на бази фазне компарације у временском домену (табела 10.2). Основни разлог је мање кашњење, које је у временском домену узроковано подешеним углом карактеристике. Ако поредимо MNO_{DFT} и POLI1 може се уочити да је овај други само незнатно бржи у просјеку, али да има много мање погрешних реаговања испод досега. То показује да кружна карактеристика много слабије покрива раван импедансе и да кварови са луком чешће излазе из штићене зоне него код полигоналних карактеристика. Једина добра страна је да у том случају мање гријеше код кварова изван досега карактеристике.

Детаљни резултати тестирања при осталим подешавањима дати су у низу табела у првом прилогу дисертације. Што се тиче сигурносног кашњења алгоритма, једно

од понуђених 10 мора бити изабрано како би сваки пут били поређени исти алгоритми. Из резултата датих у првом прилогу може се уочити да су сви алгоритми, осим POLI2, у просјеку давали најбоље резултате при минималном сигурносном кашњењу. У табели 10.3 су дата сигурносна кашњења сваког од алгоритама, која усвајамо за даља тестирања. Када се анализира неки алгоритам, подразумејива се кашњење из табеле 10.3, ако није другачије наглашено.

Табела 10.2 – Подешени досег кружних карактеристика који даје најбољу оцјену тестираних алгоритама за мреже БиХ и Србије

Кружне карактеристике $N=9$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реаг. [ms]	18.47	19.10	19.72	20.34	20.96	21.58	22.49	23.40	24.33	25.25
	Преко дос. [%о]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [%о]	3.80	3.90	3.90	3.90	4.00	4.00	4.30	4.40	4.40	4.40
	Осјена	4.47	4.33	4.22	4.11	3.99	3.89	3.73	3.60	3.48	3.37
МНО _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	17.58	18.19	18.80	19.43	20.04	20.65	21.56	22.47	23.41	24.33
	Преко дос. [%о]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [%о]	3.70	3.70	3.70	3.80	3.90	4.20	4.30	4.40	4.50	4.50
	Осјена	4.68	4.55	4.42	4.29	4.16	4.01	3.87	3.72	3.58	3.47

Табела 10.3 – Оптимална сигурносна кашњења алгоритама

Алгоритам	POLI1	POLI2	POLI3	POLI _{DFT}	МНО	МНО _{DFT}
Сигурнос. Каш.	2	24	2	2	2	2

У наставку дајемо сажетак преосталих резултата. У табелама 10.4 и 10.5 дати су најбољи резултати од сваког алгоритма, а међу њима су бирани најбољи за задати досег по R оси. Из табеле 10.4 може се уочити да је алгоритам POLI1 био најбољи у 4 од 7 случајева, POLI2 у 2 случаја, а POLI_{DFT} само при подешеној отпорности од 30 Ω . Може се закључити да се POLI1 у просјеку, али и по најбољем појединачном резултату, показала као најбоља карактеристика за услове у мрежама БиХ и Србије.

Табела 10.4 – Најбољи резултати постигнути полигоналним карактеристикама за различите подешене отпорности

$R_{\text{под}} [\Omega]$	10	15	20	25	30	35	40
POLI1	2.8	3.7	4.51	3.01	3.91	5.27	2.25
POLI2	2.1	2.96	3.66	3.44	4.01	4.20	3.47
POLI3	2.43	3.28	4.16	2.66	3.62	4.86	2.08
POLI _{DFT}	2.4	3.3	4.18	3.19	4.47	5.18	2.91

У табели 10.5 приказани су најбољи резултати код кружних карактеристика. Показало се да је у 6 од 7 случајева боље резултате постигао МНО_{DFT} алгоритам, највише захваљујући већој брзини реаговања. Код ових алгоритама су мање варијације оцјена него код полигоналних карактеристика.

Табела 10.5 – Најбољи резултати постигнути кружним карактеристикама за различита подешене кашњења N

N	10	9	8	7	6	5	4
МНО	4.41	4.47	4.5	4.15	3.6	2.88	2.23
МНО _{DFT}	4.6	4.68	4.62	4.25	3.68	2.85	2.24

10.1.1 Поузданост и сигурност алгоритама

Најзад имамо довољно података да израчунамо поузданост и сигурност алгоритама, сходно изразима (4.1) и (4.2), који сада имају облик:

$$Pouzdanost = \left(1 - \frac{I_D [\%]}{1000} \right) \cdot 100\% , \quad (10.2)$$

$$Sigurnost = \left(1 - \frac{P_D [\%]}{1000} \right) \cdot 100\% . \quad (10.3)$$

У табелама 10.6 и 10.7 су дати поузданост и сигурност најбољих алгоритама из табела 10.4 и 10.5. Може се уочити да је *Sigurnost* од 100% остварена само при веома ниском подешењу досега по R оси, при чему је била умањена *Pouzdanost*. И из анализе дате у седмој глави је јасно да повећање досега по R оси доводи до већег броја детекција кварова са луком унутар зоне, али и до већег броја погрешних реаговања за кварове изван зоне, јер и мали углови ротације код великих отпорности лука доводе до тога да се импеданса привидно нађе у зони реаговања.

У табели 10.8 су приказани резултати тестирања када се мијења толеранција око дефинисане границе реаговања. Очигледно број промашаја расте како се граница смањује до 1%, али као што смо навели то не угрожава штићену мрежу па нема

потребе за тако строгим критеријумом погрешног реаговања. Порастом толеранције до 7%, што представља 90.95% дужине штићеног вода, показује се да алгоритам ни у једном случају није погрешно реаговао, што указује на 100% сигурност. То је охрабрујући резултат који осигурава могућност практичне примјене алгоритма без бојазни да ће стабилност система бити угрожена. Сличан резултат показује и алгоритам на бази *DFT*.

Табела 10.6 – Поузданост и сигурност алгоритама са полигоналном карактеристиком

$R_{pod} [\Omega]$	10	15	20	25	30	35	40
Најбољ. Алг.	POL11	POL11	POL11	POL12	POL1 _{DFT}	POL11	POL12
<i>Pouzdanost</i> [%]	98.09	98.99	99.51	99.47	99.8	99.89	99.86
<i>Sigurnost</i> [%]	100	99.99	99.99	99.71	99.73	99.97	99.46

Табела 10.7 – Поузданост и сигурност алгоритама са кружном карактеристиком

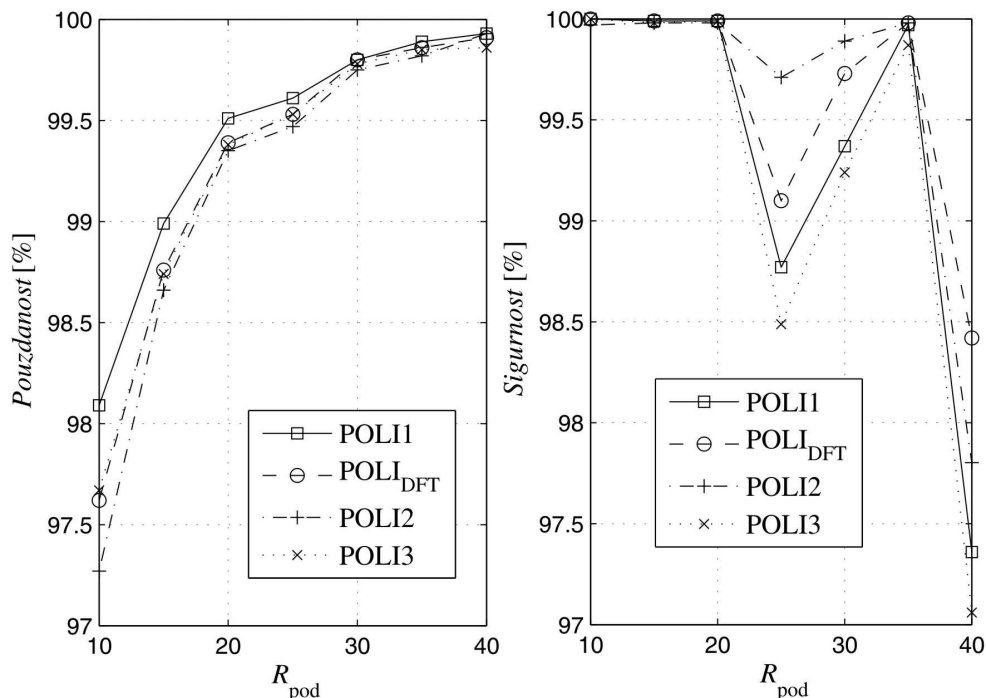
N	10	9	8	7	6	5	4
Најбољ. Алг.	MHO _{DFT}	MHO _{DFT}	MHO _{DFT}	MHO _{DFT}	MHO _{DFT}	MHO	MHO _{DFT}
<i>Pouzdanost</i> [%]	99.59	99.63	99.68	99.73	99.77	99.69	99.47
<i>Sigurnost</i> [%]	100	99.99	99.91	99.67	99.26	98.62	97.78

Табела 10.8 – Утицај толеранције на оцјену алгоритма

Толеранција		1%	3%	5%	7%	9%	11%
POL11	Вр. Реаг. [ms]	17.57	17.57	17.57	17.57	17.57	17.57
	Преко дос. [‰]	9.10	2.70	0.30	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	2.60	1.10	1.10	1.00	1.00	1.00
	Оцјена	3.42	4.68	5.27	5.39	5.39	5.39

Иако смо изабрали оптималне досеге карактеристике реаговања сваког од алгоритама, за услове преносних мрежа БиХ и Србије, ипак је потребно видјети како би другачије подешавање утицало на поузданост и сигурност. Због тога су на дијаграмима са слике 10.4 приказане промјене поузданости и сигурности за разне подешене досеге по R оси, код полигоналних карактеристика реаговања. Може се уочити да са порастом досега расте поузданост, али опада сигурност. Код

подешеног досега од 35 Ω сигурност расте до максимума, што показује зашто баш при том подешењу алгоритми имају највише оцјене у табелама резултата.



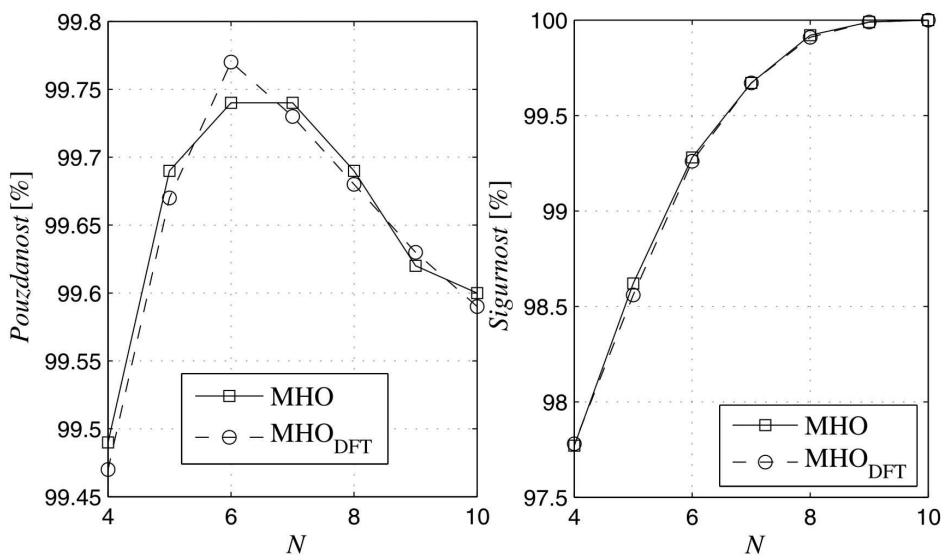
Слика 10.4 – Утицај подешеног досега по R оси на поузданост и сигурност алгоритма дистантних заштита са полигоналном карактеристиком реаговања

Код алгоритама са кружном карактеристиком криве поузданости испочетка расту, а затим опадају (слика 10.5), док криве сигурности расту са N . Напомињемо да пораст N значи скраћење досега по R оси. Оптимално рјешење је постигнуто при $N = 9$, када је сигурност довољно порасла, а поузданост није много опала (обратити пажњу на границе по u оси на два графика).

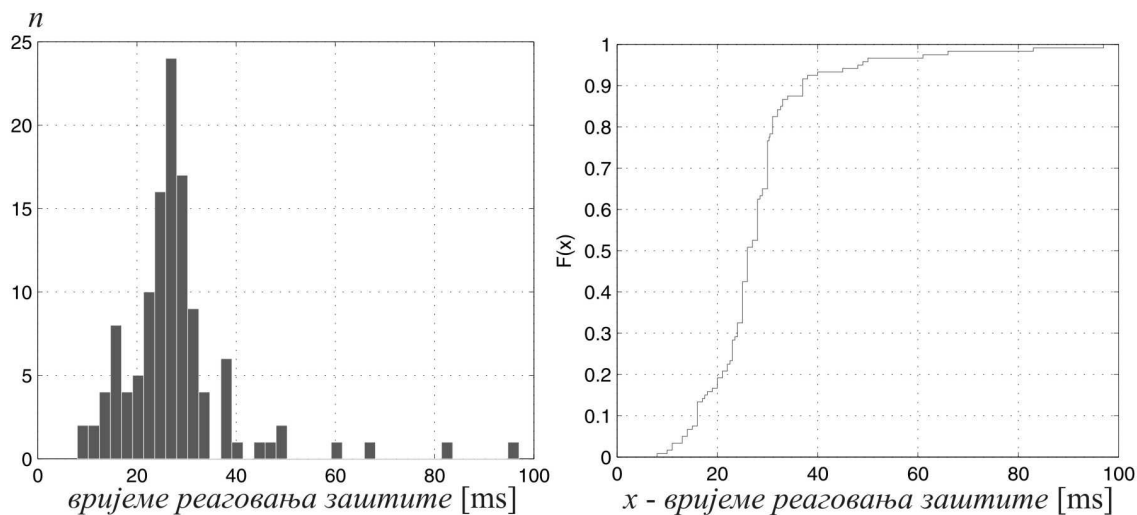
10.1.2 Вријеме реаговања алгоритама

На крају остаје да се анализира вријеме реаговања тестираних алгоритама и да се упореди са подацима добијеним из записа кварова у мрежама БиХ и Србије. Посматрајмо прво расподелу времена реаговања комерцијалних дистантних заштита на 120 кварова у мрежама БиХ и Србије. На слици 10.6 дат је хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања. Просјечно вријеме

реаговања износи 27.91 ms, док је стандардна девијација 12.07 ms. Заштите су реаговале за вријеме краће од 20 ms на мање од 20% кварова, док су само у једном случају реаговале за вријеме мање од 10 ms.



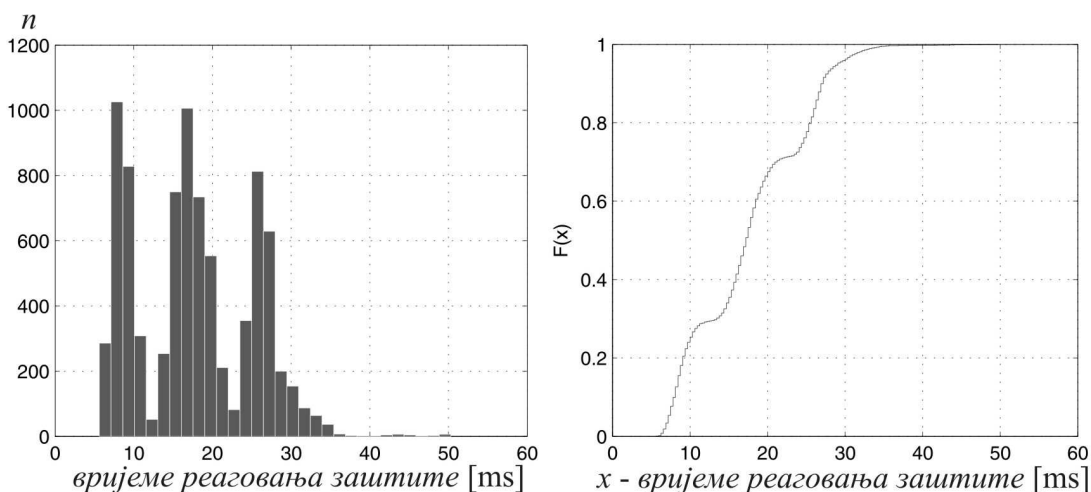
Слика 10.5 – Утицај подешеног досега по R оси на поузданост и сигурност алгоритма дистантних заштита са кружном карактеристиком реаговања



Слика 10.6 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања комерцијалних дистантних заштита у мрежама БиХ и Србије

Код алгоритма POLI1 са сигурносним кашњењем од 2 одбирка резултати су приказани на слици 10.7 . Просјечно вријеме реаговања износи 17.57 ms, док је

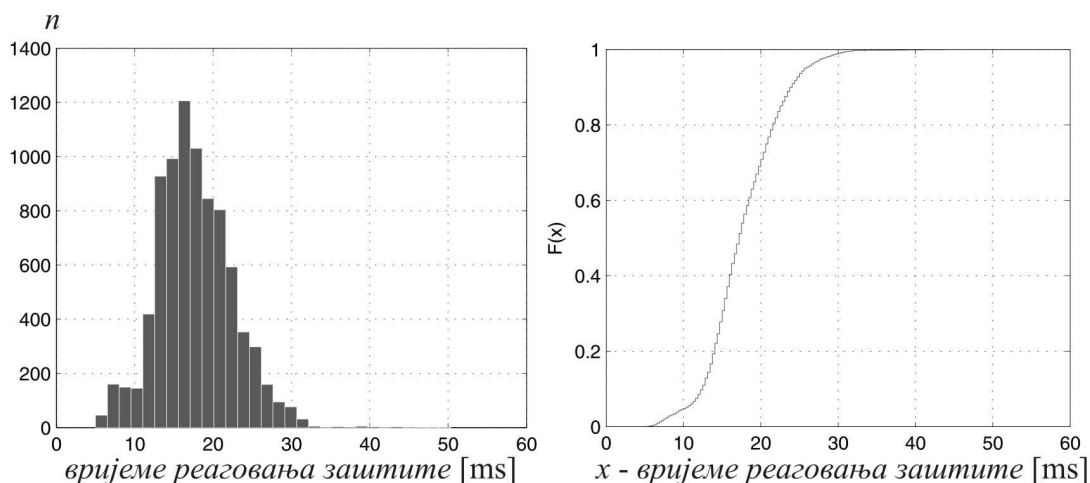
стандардна девијација 7.39 ms. На хистограму се могу уочити три области, прва са временом реаговања испод и око 10 ms, друга до 20 ms и трећа преко 25 ms. Овај алгоритам на кварове реагује за мање од 10 ms у око 25% случајева, док у претходном примјеру тај проценат није достигнут ни до 20 ms. Вријеме реаговања испод 20 ms се постиже у 68% случајева. Ово поређење не треба сматрати дефинитивним доказом да је тестирано рјешење много брже од рјешења која се користе у пракси. Постоји могућност да се при практичној имплементацији од произвођача захтијева да испуни и неке додатне услове због којих је то кашњење веће, али једини подаци које ми имамо су ови презентовани.



Слика 10.7 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма POLII на моделу мрежа БиХ и Србије

Расподјела времена реаговања за алгоритам на бази DFT ($POLII_{DFT}$), са кашњењем од 2 одбирка, дата је на слици 10.8. Просјечно вријеме реаговања износи 17.72 ms, док је стандардна девијација 4.81 ms. Овај алгоритам на кварове реагује за мање од 10 ms у око 4.8% случајева, док се вријеме реаговања испод 20 ms постиже у 69% случајева. Може се закључити да предложени алгоритам (POLII) у много више случајева доводи до врло брзог реаговања заштите, чак у 25% у односу на 4.8% код стандардног рјешења базираног на DFT . Значај ове чињенице је у томе што се ту ради о блиским кваровима за које је пожељно да буду искључени брже од удаљених кварова. Фазна компарација у временском домену, иако има додатна временска кашњења, просто има бржи прелазни процес који доводи до веома брзе

детекције квара у скоро сваком четвртом случају. При томе је очувана поузданост и сигурност детекције, што је наговијештено и приликом анализа фреквентних карактеристика алгоритама. Ипак, POLI1 има и нешто већи број спорије детектованих кварова, због веће стандардне девијације, па је просјечно вријеме детекције приближно исто као код POLI_{DFT}.



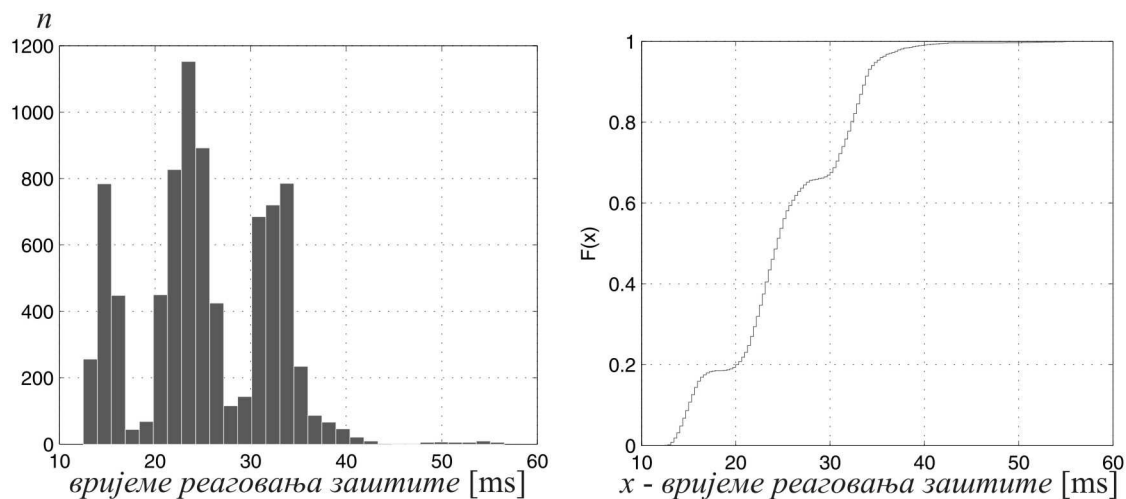
Слика 10.8 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритама POLI_{DFT} на моделу мрежа БиХ и Србије

Што се тиче утицаја сигурносног кашњења на расподелу времена детекције квара, ту је ситуација јасна. Кварови ће бити детектовани са закашњењем једнаким додатном кашњењу, што се види у просјечном времену детекције квара, док стандардна девијација остаје приближно иста. На слици 10.9 приказан је хистограм алгорита POLI1 са кашњењем од 24 одбирка. У односу на слику 10.7, просјечно вријеме реаговања је са 17.57 ms порасло на 25.26 ms, док је стандардна девијација са 7.39 ms опала на 6.91 ms. Разлике се могу приписати чињеници да ова два алгорита неће детектовати исти број кварова, па то утиче на коначни облик хистограма.

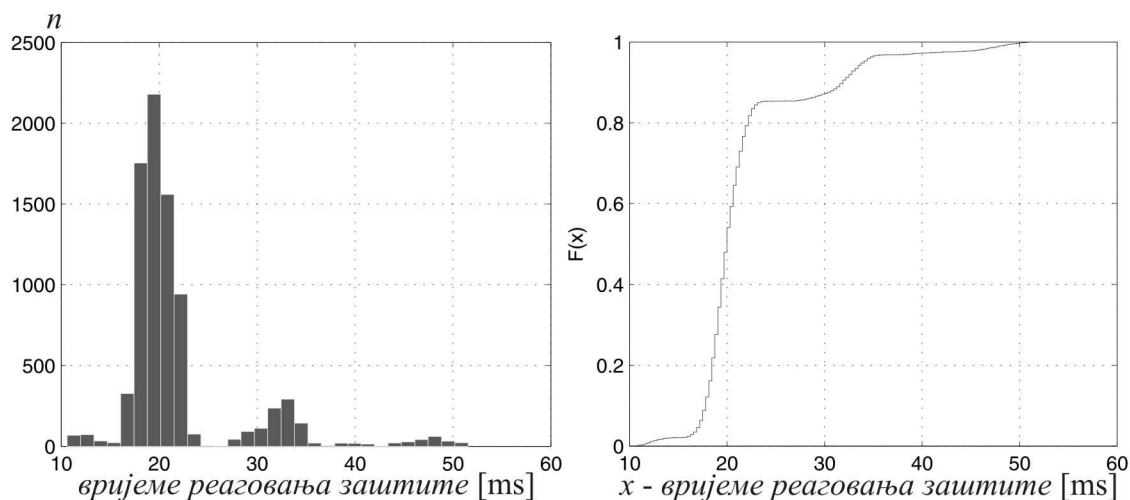
Хистограми и кумулативне функције расподела времена реаговања преосталих алгоритама дати су на сликама 10.10, 10.11, 10.12 и 10.13. Сви подаци везани за брзине реаговања алгоритама (симулација кварова у мрежама БиХ и Србије) су

ради лакшег поређења дати у табели 10.9. Табела се односи на подешења

$R_{\text{pod}} = 30 \Omega$, $N = 9$, толеранција 5 %.



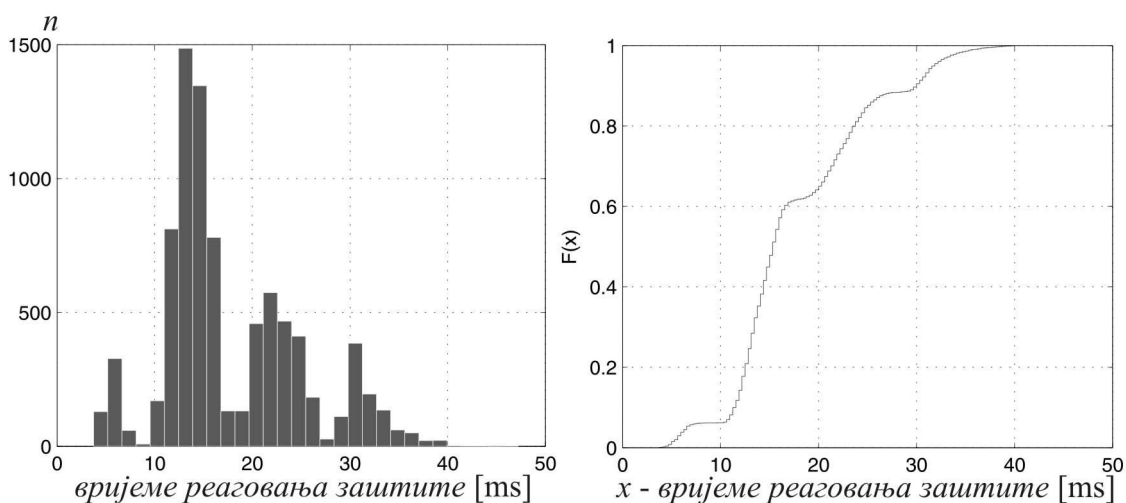
Слика 10.9 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма POLI1 са максималним кашњењем од 24 одбирка



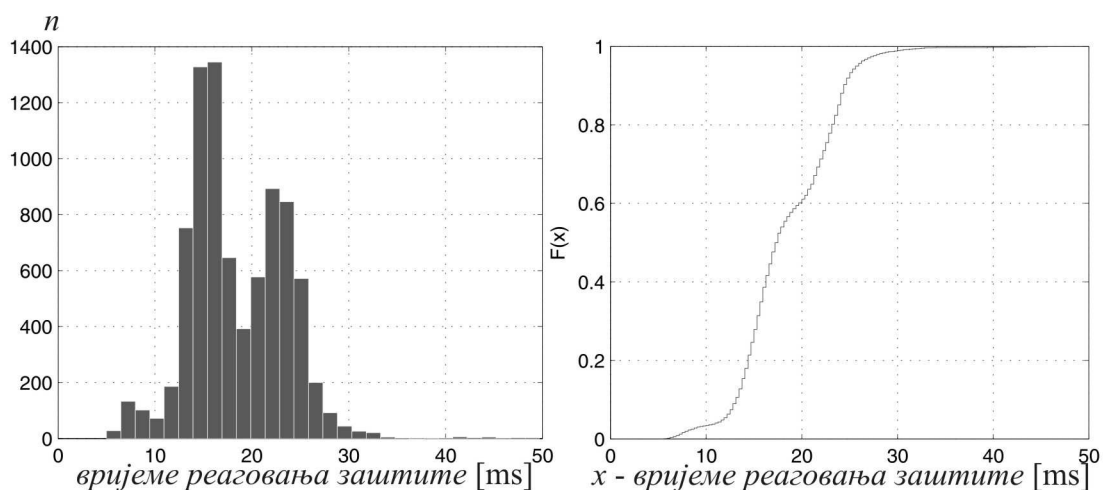
Слика 10.10 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма POLI2 на моделу мрежа БиХ и Србије

Може се уочити да је у просјеку најбржи алгоритам био POLI1, који је уједно имао и убједљиво највећи проценат кварова који су детектовани веома брзо, у времену испод половине периода основног хармоника сигнала. У просјеку је практично једнако брз алгоритам MHO_{DFT} , али има знатно мање брзо детектованих кварова. На зачељу је POLI2 који заостаје по свим параметрима

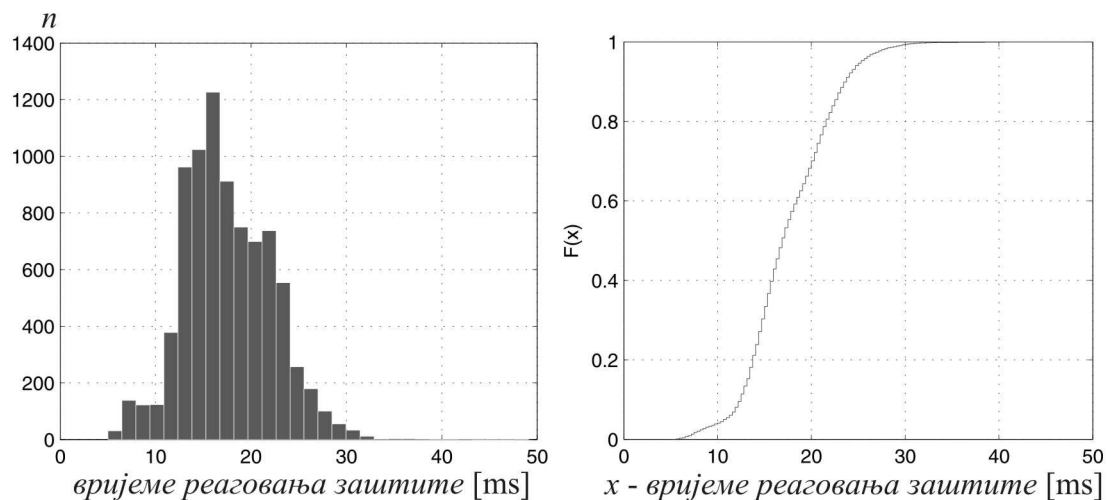
брзине реаговања. Разлог је велико сигурносно кашњење неопходно да се перформансе овог алгоритма приближе осталима по поузданости и сигурности. Када би се изузеле поузданост и сигурност онда би овај алгоритам био најбржи, што се може видјети и у првој колони табеле 10.1 . Овим је показано да повећање брзине детекције квара не значи само по себи побољшање, ако су при томе нарушени поузданост и сигурност детекције квара. Због тога је процјена поузданости и сигурности неопходна приликом поређења алгоритама дистантних, али и других типова заштита.



Слика 10.11 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма POLI3 на моделу мрежа БиХ и Србије



Слика 10.12 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма МНО на моделу мрежа БиХ и Србије



Слика 10.13 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма MHO_{DFT} на моделу мрежа БиХ и Србије

Табела 10.9 – Показатељи брзине реаговања алгоритама

	POL11	POL12	POL13	POL1 _{DFT}	MHO	MHO _{DFT}
просјечно вријеме реаговања [ms]	17.57	21.82	17.79	17.72	18.47	17.58
стандардна девијација [ms]	7.39	6.23	7.12	4.81	4.99	4.65
процент реаговања < 10 [ms]	25%	0%	6.20%	4.80%	3.40%	3.80%
процент реаговања < 20 [ms]	68%	48%	65%	69%	60%	66.20%

10.2 Тестирање алгоритама на моделу мреже са повећаним оптерећењем

У поглављу 9.4 дате су расподеле случајних промјенљивих једне мреже у којој су оптерећења водова много већа него код разматраног модела БиХ и Србије. Осим тога повећане су и вриједности отпорности лука, док су унутрашње импедансе извора смањене. Циљ је да се види како на поузданост, сигурност и брзину реаговања алгоритама утичу услови повећаног оптерећења на водовима. Према анализи датој у глави 7, очекује се повећан број погрешних реаговања, јер повећање фазне разлике извора, уз повећање отпорности лука, доводи до већих варијација реактансе квара виђене на мјесту релеја. У крајњем случају је неопходно увести компензацију оптерећења у алгоритам. Да текст дисертације не би био оптерећен сувишним подацима и сликама, основне табеле су дате у прилогу 2, а у наставку су дати само најзначајнији резултати тестирања.

Табела 10.10 – Најбољи резултати постигнути полигоналним карактеристикама за различите подешене отпорности

$R_{\text{pod}} [\Omega]$	35	40	45	50
POL11	3.44	1.84	3.25	1.76
POL12	2.97	2.24	3.14	2.33
POL13	2.93	1.61	2.51	1.54
POL1 _{DFT}	3.42	2.21	3.67	2.39

Табела 10.11 – Најбољи резултати постигнути кружним карактеристикама за различите подешене углове карактеристике

N	11	10	9	8
МНО	2.33	2.63	2.64	2.6
МНО _{DFT}	2.35	2.62	2.63	2.58

Табела 10.12 – Поузданост и сигурност алгоритама са полигоналном карактеристиком

$R_{\text{pod}} [\Omega]$	35	40	45	50
Најбољ. Алг.	POL11	POL12	POL1 _{DFT}	POL1 _{DFT}
Pouzdanost [%]	99.36	99.5	99.55	99.74
Sigurnost [%]	99.29	98.13	99.39	97.73

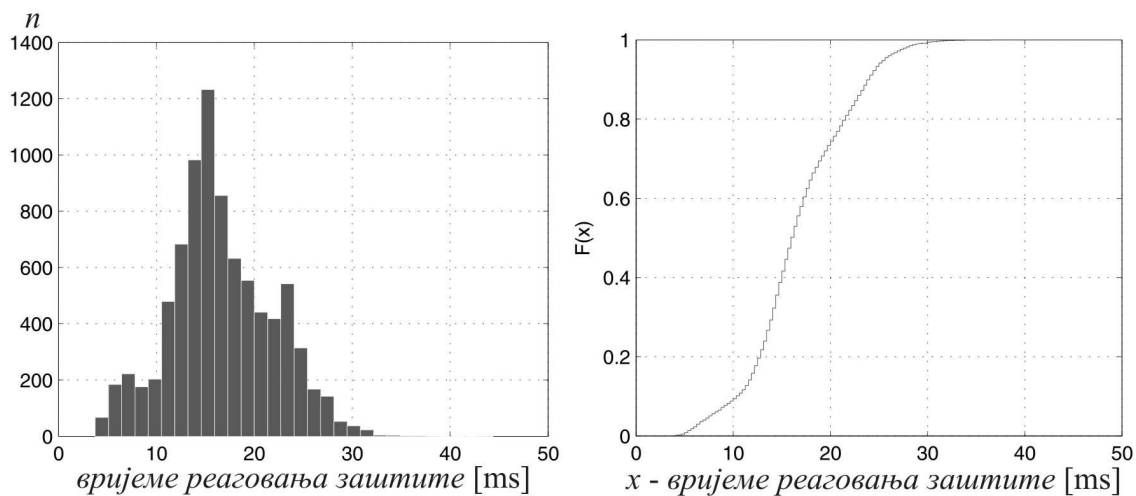
Табела 10.13 – Поузданост и сигурност алгоритама са кружном карактеристиком

N	11	10	9	8
Најбољ. Алг.	МНО _{DFT}	МНО	МНО	МНО
Pouzdanost [%]	97.700	98.240	98.510	98.920
Sigurnost [%]	99.730	99.690	99.430	98.940

Може се уочити да је код полигоналних карактеристика у просјеку најбоље оцјене добио алгоритам POL1_{DFT}, али најбоља оцјена у овом тестирању је била 3.67, док је у случају мрежа БиХ и Србије добијена најбоља оцјена 5.27. Код кружних карактеристика, у просјеку је боље оцјене добио алгоритам МНО у односу на МНО_{DFT}, али је поново најбоља оцјена (2.64) мања него у претходном тестирању (4.68).

Што се тиче поузданости, поново се може уочити погоршање. Код полигоналних карактеристика је у овом тестирању највиша поузданост 99.74%, а у претходној мрежи 99.89%, док је код кружних карактеристика највећа поузданост 98.92% наспрам 99.77% у претходној мрежи. Сигурност најбоље полигоналне карактеристике је 99.39%, најбоље кружне 99.73%, а у претходној мрежи најбоља сигурност код обе карактеристике је била 100%.

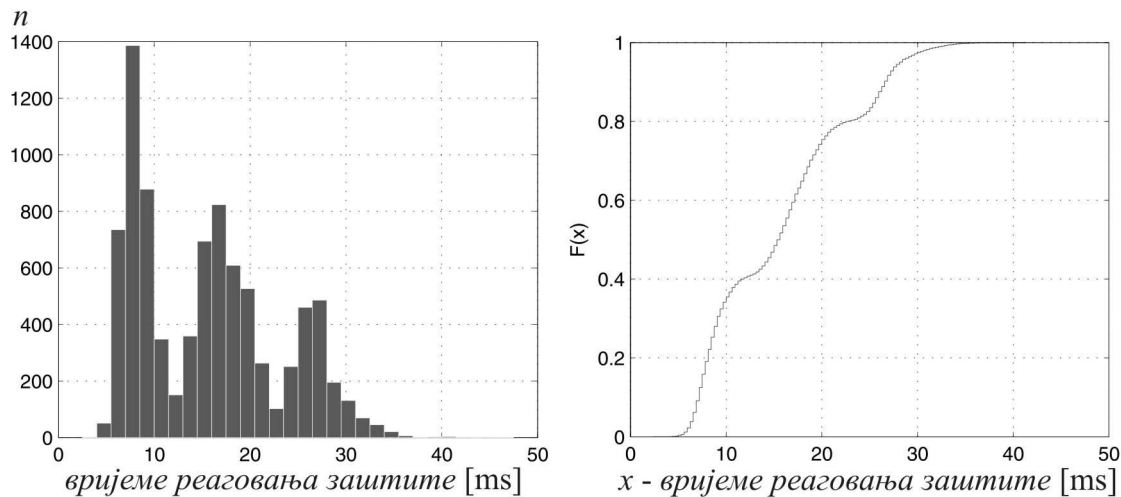
На сликама 10.14 и 10.15 дати су хистограми и кумулативне функције расподеле времена реаговања два најбоље оцијењена алгоритма у овој симулацији. Код алгоритма POLI_{DFT} ($R_{pod} = 45 \Omega$) је забиљежено просјечно вријеме реаговања 16.68 ms, док је стандардна девијација 5.25 ms. Алгоритам је реаговао за вријеме краће од 10 ms на 9.3% кварова, док је за вријеме краће од 20 ms реаговао у 73.32% кварова. Може се уочити да су сви показатељи брзине бољи него у случају симулације кварова у мрежама БиХ и Србија, али су поузданост и сигурност лошији.



Слика 10.14 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма POLI_{DFT} на моделу мреже са преносом снаге на веће удаљености

Алгоритам POLI1 је имао другу најбољу оцјену при $R_{pod} = 35 \Omega$. Просјечно вријеме реаговања је 16.68 ms, што је за око 1 ms брже него у симулацији у мрежама БиХ и Србије. Стандардна девијација 5.25 ms. Алгоритам је реаговао за вријеме краће од 10 ms на чак 35.48% кварова, док је за вријеме краће од 20 ms

реаговао код 75.41% кварова. Иако има лошију укупну оцјену, POLII алгоритам има боље показатеље брзине од POLI_{DFT}, јер сваки трећи пут на квар реагује у времену краћем од половине периода основног хармоника сигнала.



Слика 10.15 – Хистограм и кумулативна функција расподеле времена реаговања алгоритма POLII на моделу мреже са преносом снаге на веће удаљености

На хистограму се поново могу уочити три регије, при чему је сада регија велике брзине реаговања највећа. Присуство регије са временима реаговања већим од 25 ms доприноси да укупна разлика у просјечним временима реаговања буде мала.

11. ЗАКЉУЧАК

У дисертацији су презентовани нови алгоритми дистантних заштита базирани на фазној компарацији у временском домену. Описана су четири нова алгоритма, три са полигоналном (POLI_{1,2,3}) и један са кружном карактеристиком реаговања (МНО). Представљени алгоритми су поређени са алгоритмима на бази дискретне Фуријеове трансформације (МНО_{DFT}, POLI_{DFT}) који се најчешће користе у пракси и представљају класично рјешење у овој области. Основна разлика између наших и класичних рјешења је у томе што не рачунамо фазоре, него сигнале остављамо у временском домену гдје уз мали број рачунских операција одређујемо њихову фазну разлику, односно утврђујемо да ли је квар лоциран унутар подешене зоне реаговања. Основна предност овог приступа је у томе што значајно редукује број рачунских операција које алгоритам извршава у сваком периоду одабирања. Показано је да се предложеним алгоритмом кружна карактеристика реаговања реализује уз 67% мање рачунских операција у односу на класичан приступ, а при томе се не захтијева додатна меморија за одређивање вриједности функције *аркустангенс*. Уштеда може ићи и преко 70% уколико би класични алгоритам рачунао приближне вриједности функције *аркустангенс*. У случају полигоналне карактеристике наш приступ захтијева око 30% мање рачунских операција у односу на класични алгоритам.

Прије самих тестирања показано је да предложени приступ има двије потенцијално слабе тачке. Први недостатак представља чињеница да истовремено присуство виших хармоника истог реда у улазним сигнаlima може узроковати

грешке у детекцији квара. Детаљна анализа је показала да је и при условима који су много строжији од реалних услова у мрежи, поменуто грешка незнатна, тако да практично нема утицаја на тачност детекције квара. Овај закључак је потврђен бројним тестовима који су показали да нашим приступом број грешака у детекцији квара у просјеку остаје приближно исти као код класичног приступа. Други потенцијални недостатак предложених алгоритама је неопходност уношења додатних временских кашњења у сигнале како би биле реализоване жељене карактеристике реаговања. То би теоретски могло довести до тога да предложени алгоритми буду у свакој ситуацији спорији од контролних. Тестирања спроведена у раду су показала да то није тачно и да су у многим случајевима наши алгоритми бржи од класичних, што потврђује предности реализације алгоритама у временском домену.

За детаљно поређење алгоритама потребно је, осим поменутог броја рачунских операција, процијенити поузданост, сигурност и вријеме детекције квара. Први приступ овом задатку је детерминистички и користи се у великој већини радова који се баве овом проблематиком. На овај начин није могуће одредити поузданост, сигурност и расподјелу времена реаговања алгоритама, него се тестирањем, кроз промјену појединих параметара у широком опсегу, добијају показатељи тражених величина. У раду је показано да на овај начин често није могуће процијенити који алгоритам је бољи у неком погледу. Основни показатељ поузданости и сигурности је фреквентна карактеристика алгоритма. Код фазне компарације у временском домену није могуће директно доћи до фреквентне карактеристике, као што је то случај код DFT. Због тога смо предложили критеријум за процјену фреквентне карактеристике наших алгоритама. Тестирања су показала да је фреквентна карактеристика веома блиска познатој фреквентној карактеристици класичних алгоритама, чиме се дошло до претпоставке да је поузданост и сигурност предложених алгоритама приближно иста као код класичних рјешења. Та претпоставка је потврђена бројним тестирањима.

Тестови су показали да оптерећење вода и отпорности лука имају практично подједнак утицај на поређене алгоритме, у смислу прекорачења и скраћења

досега. Што се тиче скраћења досега (показатељ поузданости) код полигоналних карактеристика, ту је предложени алгоритам POLI1 за нијансу бољи од класичног алгоритма POLI_{DFT}, док је у случају продужења досега (показатељ сигурности) за нијансу бољи POLI_{DFT}. Алгоритми са кружном карактеристиком су имали већа скраћења досега у односу на алгоритме са полигоналном карактеристиком, што је било и очекивано. Што се тиче процјене времена детекције квара, детерминистички приступ тестирању је показао да је најбржи алгоритам POLI3, а да поредећи POLI1 и POLI_{DFT} добијамо да за мање вриједности SIR брже реагује POLI1, док за веће вриједности SIR брже реагује POLI_{DFT}. Проблем је што овај начин тестирања са једнаком тежином узима и вриједности SIR које се у малом броју случајева јављају у мрежи, па се овај резултат разликује од резултата добијеног код стохастичког приступа тестирању. Код алгоритма са кружном карактеристиком, MHO_{DFT} је у већини случајева бржи од MHO.

Основни циљ стохастичког приступа тестирању алгоритма био је да пружи бројне вриједности поузданости и сигурности алгоритма, као и расподеле времена детекције квара, како би било могуће направити што објективније поређење алгоритма. Основа стохастичког модела мреже су расподеле најзначајнијих величина добијене из података прикупљених у мрежама Босне и Херцеговине и Србије. Алгоритми су при разним подешавањима досега по R оси тестирани на по 10000 кварова у моделу мреже. Предложен је и критеријум оцјене алгоритма који укључује показатеље поузданости, сигурности и брзине детекције квара. Према предложеном критеријуму, највише оцјене је добио алгоритам POLI1. Што се тиче поузданости, ту је такође убједљиво најбољи алгоритам POLI1, док је у погледу сигурности за нијансу бољи алгоритам POLI_{DFT}.

Уколико као показатељ времена реаговања алгоритма узмемо просјечно вријеме реаговања на 10000 кварова, при разним подешавањима алгоритма, онда је у сваком тестирању најбржи био алгоритам POLI1, за разлику од детерминистичког приступа тестирању, гдје је најбржи био POLI3. Разлика између просјечних времена реаговања POLI1 и POLI_{DFT} није велика и углавном лежи у опсегу између 0.5 и 1 ms, али свакако показује да временска кашњења унесена у фазну

компарацију у временском домену не угрожавају брзину алгоритма. Разлоге треба тражити у природи прелазног процеса која је другачија него код класичног приступа. Разлика се највише уочава у хистограму расподеле времена реаговања. Хистограми показују да алгоритам POLI1 има већу стандардну девијацију времена реаговања од алгоритма POLI_{DFT}. Посљедица тога је да, иако је разлика у просјечним временима у границама 1 ms, POLI1 у много више случајева квар детектује у веома кратком времену, испод 10 ms. Значај ове чињенице је у томе што се ту ради о блиским кваровима за које је пожељно да буду искључени брже од удаљених кварова. Тако имамо ситуацију да POLI1 у чак 25% случајева квар детектује за вријеме краће од 10 ms, док POLI_{DFT} тако брзу детекцију има код само 4.8% кварова, а ни остали алгоритми нису много бољи. Једино се код кружне карактеристике показало да је предложени алгоритам у већини тестова спорији од класичног рјешења, али та разлика је углавном између 0.5 и 1 ms. У суштини, алгоритам POLI2 има најбржу детекцију квара, због најбржег прелазног процеса, али код њега је због тога угрожена поузданост и сигурност, па смо морали усвојити много веће сигурносно кашњење. Тиме смо показали да повећање брзине алгоритма нема никакав значај ако доводи до смањења поузданости и сигурности, што често у литератури није оправдано кроз тестирање.

Посљедњи тестови су вршени на моделу мреже у којој су, у односу на модел БиХ и Србије, оптерећења много већа и гдје су отпорности лука веће. Најбржи је и даље остао алгоритам POLI1, али због веће разлике у сигурности општа оцјена иде на страну алгоритма POLI_{DFT}.

Након свега изнесеног можемо извући неколико општих оцјена. Алгоритми дигиталних дистантних заштита које смо предложили у овој дисертацији омогућавају детекцију квара уз 30% до 70% мање рачунских операција у односу на класично рјешење базирано на DFT, при чему не губе на брзини, поузданости и сигурности. Доказали смо да предложени алгоритми имају практично исту фреквентну карактеристику као класично рјешење. Упркос потреби увођења временског кашњења у сигнале, најбољи од наших алгоритама, POLI1, у сваком

тестирању је био бржи од свих осталих, а имао је и убједљиво највећи број врло брзо детектованих кварова, за мање од 10 ms. Поузданост и сигурност су такође приближно исти као код класичног рјешења, осцилујући од случаја до случаја на једну или другу страну. Узевши у обзир све критеријуме и све тестове, може се закључити да је од свих 6 тестираних алгоритама најбољи алгоритам са полигоналном карактеристиком базиран на фазној компарацији у временском домену, POLI1.

Прикупљени подаци из преносних мрежа Босне и Херцеговине и Србије омогућили су формирање стохастичког модела мреже за процјену поузданости, сигурности и просјечног времена реаговања алгоритама. Ови модели могу бити корисни и другим ауторима приликом тестирања неких других типова заштита преносних водова.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Đurić M.: *Relejna zaštita*, - Beopres, Beograd, 2008.
- [2] Working Group D5, IEEE Power System Relaying Committee: *Proposed Statistical Performance Measures for Microprocessor-Based Transmission-Line Protective Relays; Part I - Explanation of the Statistics*, - Preceding Companion Paper. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 12, No 1, January 1997.
- [3] Phadke A. G., Thorp J. S., *Computer relaying for power systems*, - Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [4] Fan Wang: *Power Quality Disturbances and Protective Relays, Component Switching and Frequency Deviation*, - Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2003.
- [5] Waldemar Rebizant, Janusz Szafran, Andrzej Wiszniewski: *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*, - Springer-Verlag London, 2011.
- [6] Dong-Gue Li, Ye-Jun Oh, Sang-Hee Kang, Byung M. Han: *Distance Relaying Algorithm Using a DFT-based Modified Phasor Estimation Method*, - Power Tech 09, Bucharest, Romania, June 2009.
- [7] A. Gomez Exposito, J.A. Rosendo Macias, J.L. Ruis Macias: *Discrete Fourier transform computation for digital relaying*, - International Journal of Electrical Power and Energy Systems 25, 2003, pp. 229–233.
- [8] Morais A.P., Cardoso G., Mariotto L., Ferreira G.D.: *Numerical distance relaying algorithm based on Mathematical Morphology and Least-Squares Curve Fitting method*, - Electric Power Systems Research, Vol 81, Issue 5, May 2011, pp. 1144-1150.
- [9] Kleber M. Silva, Washington L.A. Neves, Benemar A. Souza: *Distance protection using a wavelet-based filtering algorithm*, - Electric Power Systems Research, Vol 80, Issue 1, January 2010, pp. 84-90.

- [10] Osman A.H., Malik O.P.: *Transmission line distance protection based on wavelet transform*, - IEEE Trans. Power Deliv. 19 (2), 2004, pp. 515–523.
- [11] Đurić M., Radojevic Z., Terzija V.: *Time Domain Solution of Fault Distance Calculation and Arcing Faults Detection on Overhead Lines*, - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999, pp. 60-67.
- [12] Suonan Jiale, Wang Zengchao, Kang Xiaoning: *An accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation using one terminal data*, - Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011.
- [13] Jiankang Zhang, Jiale Suonan, Zaibin Jiao, Guobing Song, Xiaohua Su: *A Fast Full-Line Tripping Distance Protection Method for HVDC Transmission Line*, - Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012.
- [14] Pathirana V., McLaren P. G.: *Hybrid Algorithm for High Speed Transmission Line Protection*, - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 20, No 4, 2005.
- [15] Pathirana V., McLaren P.G., Dirks E.: *Investigation of a hybrid travelling wave/impedance relay principle*, - IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol 1, 2002, pp. 48 -53.
- [16] Ernesto Vázquez, Jorge Castruita, Oscar L. Chacón: *A New Approach Traveling-Wave Distance Protection - Part I: Algorithm*, - IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 22, No 2, 2007, pp. 795-800.
- [17] Liu Yipeng, Duan Jiandong, Huang Ning, An Lin, *Research on a Novel Traveling-wave Protection using Mathematical Morphology for Transmission Line Unsymmetrical Grounded Faults*, - Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011, Asia-Pacific, pp. 1-4.
- [18] Jyh-Cherng Gu, Sun-Li Yu: *Removal of DC Offset in Current and Voltage Signals Using a Novel Fourier Filter Algorithm*, - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 15, No 1, January 2000.
- [19] Dong-Gue Li, Ye-Jun Oh, Sang-Hee Kang, Byung M. Han: *Distance Relaying Algorithm Using a DFT-based Modified Phasor Estimation Method*, - Power Tech 09, Bucharest, Romania, June 2009.

- [20] Ren J., Kezunovic M.: *Elimination of DC Offset in Accurate Phasor Estimation Using Recursive Wavelet Transform*, - Power Tech 09, Bucharest, Romania, June 2009.
- [21] Andersson G.: *Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe and recommended means to improve system dynamic performance*, - IEEE Trans Power Syst 2005, 20(4), pp. 1922–1928.
- [22] Corsi S., Sabelli C.: *General blackout in Italy Sunday September 28, 2003, h. 03:28:00*. - In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society general meeting, Vol 2, June 2004, pp. 1691–702.
- [23] Report of the Enquiry Committee on Grid Disturbance in Northern Region on 30th July 2012. and in Northern, Eastern & North-Eastern Region on 31st July 2012.
http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf
- [24] Ђурић М.: *Класични дистантни релеји и дистантне заштите*, - Научна књига, Београд, 1992.
- [25] Zubić S., Djurić M.: *A distance relay algorithm based on the phase comparison principle*, - Electric Power Systems Research, Vol 92, 2012, pp. 20-28.
- [26] Jorge Lazaro Domínguez, José Félix Miñambres Argüelles, Miguel Angel Zorroza Arrieta, Begoña Larrea Jaurrieta, Maribel Sanchez Benito, Iñigo Antiza Zugazaga: *New quick-convergence invariant digital filter for phasor estimation*, - Electric Power Systems Research, Vol 79, Issue 5, May 2009, pp. 705-713.
- [27] Tarlochan S. Sidhu, Xudong Zhang, Vinayagam Balamourougan: *A New Half-Cycle Phasor Estimation Algorithm*, - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20, No 2, April 2005.
- [28] Ziegler, *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*, - 3rd ed., Wiley VCH, Berlin, Germany, 2008.
- [29] Рајаковић Н.: *Анализа електроенергетских система I*, - Академска Мисао, Београд 2002.
- [30] Ђурић М., Терзија В., Радојевић З., Ђуришић Ж., Стојановић З., Зубић С., Бајић В.: *Алгоритми за дигиталне релејне заштите*, - ЕТА, Београд 2012.
- [31] Stojanović Z., Djurić M.: *The algorithm for directional element without dead tripping zone based on digital phase comparator*, - Electric Power Systems Research, Vol 81, Issue 2, February 2011, pp. 377-383.

- [32] Samantaray S.R., Dash P.K.: *Transmission line distance relaying using a variable window short-time Fourier transform*, - Electr. Power Syst. Res. 78, 2008, pp. 595-604.
- [33] Hou D., Roberts J.: *Capacitive Voltage Transformers: Transient Overreach Concerns and Solutions for Distance Relaying*, - Conf. on Electr. Comp. Eng. 1 1996, pp. 119-125.
- [34] Price E., Einarsson T.: *Complementary Approach for Reliable High Speed Transmission Line Protection*, 61st Annu. Conf. for Protective Relay Eng. 2008, pp. 170-179.
- [35] Hart D., Novosel D., Calero F., Udren E., LiFeng Yang, Development of a numerical comparator for protective relaying: Part II, IEEE Trans. Power Del. 11 (1996) 1274-1284.
- [36] F. Calero, Development of a numerical comparator for protective relaying: I, IEEE Trans. Power Del. 11 (1996) 1266 – 1273.
- [37] L. Wang, E. Price, *New high-speed microprocessor distance relaying for transmission lines*, Int. Conf. on Power Syst. Technol., 2 (1998) 1143-1147.
- [38] Sakaguchi T.: A Statistical Decision Theoretic Approach to Digital Relaying, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.99, 1980, pp.1918-1926.
- [39] Seppo Hanninen, Matti Lehtonen, Urho Pulkkinen: A probabilistic method for detection and location of very high resistive earth faults, - Electric Power Systems Research 54 (2000) 199–206.
- [40] Sauhats A., Jonins A., Danilova M.: *Statistical Adaptive Algorithms for Fault Location on Power Transmission Lines based on Method of Monte-Carlo*, 7th Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, September 22-26, 2002, Naples, Italy.
- [41] Zima-Bockarjova M., Sauhats A., Kucajevs J., Halilova N.: *Distance protection algorithm for power transmission lines based on Monte-Carlo method*, PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, 2009, pp.1-7
- [42] Bockarjova M., Sauhats A., Andersson G.: *Statistical Algorithm for Power Transmission Lines Distance Protection*, - 9th International Conference on

Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Stockholm, Sweden - June 11-15, 2006

- [43] Bockarjova M., Sauhats A., Andersson G.: *Statistical Algorithms for Fault Location on Power Transmission Lines*, - *IEEE Power Tech Conference, June 27-30, St.Petersburg Russia, 2005.*
- [44] Faustino Agreira C. I., Fonseca de Jesus S. M., Lopes de Figueiredo S., Machado Ferreira C., Dias Pinto J. A., Maciel Barbosa F. P.: *Probabilistic Steady-State Security Assessment of an Electric Power System Using a Monte Carlo Approach*, Universities Power Engineering Conference, 2006. Vol.2, 2006, pp. 408-411.
- [45] Kezunovic, M., Ren, J.: *New test methodology for evaluating protective relay security and dependability*, - *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008*, pp.1-6.
- [46] <http://www.powersystemassistant.com/>
- [47] <http://www.energy.siemens.com/hq/en/services/power-transmission-distribution/power-technologies-international/software-solutions/pss-e.htm>
- [48] <http://www.omicron.at/en/products/pro/secondary-testing-calibration/sw/fault-analysis/>
- [49] <http://www.centrel.org/ucte.html>
- [50] <http://www.abb.com/industries/db0003db004061/0ae6e06a6f2503fbc1257356006daa07.aspx>

НОМЕНКЛАТУРА

$\underline{a}, \underline{b}$	Тачке у комплексној равни импедансе које одређују локацију карактеристике реаговања дистантне заштите
<i>CCVT</i>	<i>Capacitive Coupled Voltage Transformer</i>
<i>CharmDF</i>	Филтар опадајуће једносмјерне компоненте сигнала
d	Пречник кружне карактеристике реаговања
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i> – једносмјерна струја
<i>DFT</i>	<i>Discrete Fourier Transformation</i> – дискретна Фуријеова трансформација
<i>DWT</i>	<i>Discrete Wavelet Transformation</i> – дискретна вејвлет трансформација
$\underline{E}_S, \underline{E}_R$	Електромоторне силе напојних мрежа на крајевима штићеног вода
$f = 50 \text{ Hz}$	Фреквенција основног хармоника сигнала
g	<i>Грешка</i> – изражава утицај виших хармоника и међухармоника на тачност алгоритама дистантне заштите
\underline{k}_0	Коефицијент земљоспоја
$\underline{k}_1 - \underline{k}_4$	Коефицијенти којима се одређује облик карактеристике реаговања дистантне заштите
$\underline{k}_{bc}, \underline{k}_{ca}, \underline{k}_{ab}, \underline{k}_a, \underline{k}_b, \underline{k}_c$	Коефицијенти за формирање поларизационих напона код кружне карактеристике реаговања
<i>LES</i>	<i>Least Error Squares</i> – метода најмањих квадрата
m	Број одбирака по периоду основног хармоника сигнала
МНО	Ознака новог алгорита дистантне заштите са кружном карактеристиком реаговања на бази фазне компарације у временском домену
МНО _{DFT}	Ознака алгорита дистантне заштите са кружном карактеристиком реаговања на бази <i>DFT</i>
n	Ознаку тренутног одбирка дискретизованог сигнала
N	Број одбирака којим се изражава кашњење сигнала за одређени угао (код кружне карактеристике односи се на угао φ којим се подешава досег карактеристике по R оси)
p	Тренутна снага, $p = v_1 \cdot v_2$
P	Интеграл тренутне снаге p (активна снага којом се детектује квар код дистантних релеја на бази фазне компарације у временском домену)
POLI123	Ознаке нових алгоритама дистантне заштите на бази фазне компарације у временском домену, са полигоналном карактеристиком реаговања
POLI _{DFT}	Ознака алгорита дистантне заштите на бази <i>DFT</i> , са полигоналном карактеристиком реаговања
<i>PSA</i>	<i>Power System Assistant</i>
<i>PSS</i>	<i>Power System Simulator</i>

R_L	Отпорност лука на мјесту квара
R_{pod}	Подешени досег дистантне заштите по R оси у случају полигоналних карактеристика реаговања
\underline{S}	Фазор сигнала
$s(k)$	Представља k -ти одбирак сигнала у тренутку t
$s_f(k)$	Представља k -ти одбирак сигнала филтрираног <i>CharmDF</i>
SIR	<i>Source to Impedance Ratio</i> – однос импедансе извора и импедансе штићеног вода
T_{od}	Период одабирања сигнала
T	Помјерај сигнала у времену који одговара углу φ
T_{oh}	Период основног хармоника сигнала
\underline{U}_{pol}	Напон поларизације код кружне карактеристике реаговања
$\underline{U}_r, \underline{I}_r$	Фазори напона и струје релеја из којих се рачуна импеданса квара
$\underline{U}_S, \underline{U}_R$	Напони на крајевима штићеног вода
$\underline{V}_1, \underline{V}_2$	Фазори добијени из \underline{U}_r и \underline{I}_r чијом фазном разликом се детектује квар на штићеном воду
X_{RE}, X_{IM}	Реална и имагинарна компонента фазора добијена из <i>DFT</i>
\underline{Z}	Тачка у комплексној равни импедансе
\underline{Z}_0	Нулта импеданса
\underline{Z}_d	Директна импеданса
\underline{Z}_K	Импеданса квара
\underline{Z}_m	Импеданса мјерена на мјесту дистантног релеја
\underline{Z}_p	Импеданса вода која се штити у првој зони дистантне заштите
$\underline{Z}_S, \underline{Z}_R$	Импедансе извора на крајевима штићеног вода
α	Фазна разлика сигнала \underline{V}_1 и \underline{V}_2
γ	Фазни угао напона у тренутку појаве квара
δ	Фазна разлика између напона на два краја штићеног вода
δ_1, δ_2	Углови између дијелова полигоналне карактеристике реаговања и R осе у комплексној равни импедансе
θ	Фазна разлика између електромоторних сила напојних мрежа на два краја штићеног вода
φ	Угао кружне карактеристике реаговања
φ_L	Угао између карактеристике штићеног вода и R осе у комплексној равни импедансе
Φ_1, Φ_2	Гранични углови фазног компаратора
ω_1	Учестаност основног хармоника сигнала

ПРИЛОГ 1

У наставку су дати резултати тестирања полигоналних и кружних карактеристика за услове у мрежама Босне и Херцеговине и Србије, при чему толеранција на граници реаговања износи 5%.

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=40\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реаг. [ms]	17.38	18.09	18.83	19.60	20.41	21.19	22.32	23.31	24.21	25.12
	Преко дос. [‰]	26.40	25.80	24.70	23.70	22.10	20.90	18.40	15.90	12.80	10.70
	Испод дос. [‰]	0.70	0.70	0.80	0.90	1.00	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
	Осјена	2.25	2.24	2.26	2.26	2.30	2.30	2.37	2.46	2.60	2.69
POLI2	Вр. Реаг. [ms]	11.49	12.55	13.65	14.57	15.49	16.34	17.69	19.15	20.61	21.98
	Преко дос. [‰]	111.70	110.70	108.30	102.80	95.00	81.90	54.80	27.30	8.40	5.40
	Испод дос. [‰]	0.70	0.80	0.90	0.90	0.90	1.10	1.20	1.30	1.30	1.40
	Осјена	0.81	0.81	0.81	0.85	0.90	1.01	1.36	2.09	3.30	3.47
POLI3	Вр. Реаг. [ms]	17.76	18.58	19.49	20.44	21.43	22.36	23.70	24.79	25.69	26.59
	Преко дос. [‰]	29.40	28.20	27.10	25.90	25.10	24.60	21.80	18.80	15.40	12.70
	Испод дос. [‰]	1.00	1.00	1.20	1.30	1.30	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
	Осјена	2.08	2.09	2.09	2.10	2.09	2.07	2.13	2.22	2.35	2.46
POLI _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	17.62	18.24	18.85	19.47	20.08	20.69	21.62	22.54	23.45	24.36
	Преко дос. [‰]	15.80	15.40	14.50	13.70	12.60	11.60	9.90	8.10	6.60	4.90
	Испод дос. [‰]	0.90	1.10	1.20	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.40	1.50
	Осјена	2.91	2.88	2.89	2.90	2.94	2.98	3.05	3.13	3.18	3.25

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=35\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реаг. [ms]	17.57	18.28	19.03	19.79	20.58	21.37	22.49	23.46	24.37	25.27
	Преко дос. [‰]	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00
	Испод дос. [‰]	1.10	1.20	1.40	1.40	1.50	1.70	1.80	1.90	1.90	1.90
	Осјена	5.27	5.06	4.85	4.67	4.49	4.30	4.08	3.93	3.79	3.68
POLI2	Вр. Реаг. [ms]	11.47	12.50	13.59	14.54	15.44	16.26	17.60	18.98	20.40	21.82
	Преко дос. [‰]	97.40	93.70	87.60	76.90	62.10	46.90	22.20	5.10	0.50	0.20
	Испод дос. [‰]	0.90	1.00	1.20	1.30	1.30	1.40	1.60	1.70	1.80	1.80
	Осјена	0.91	0.93	0.98	1.08	1.27	1.55	2.42	3.88	4.41	4.20
POLI3	Вр. Реаг. [ms]	17.80	18.64	19.55	20.49	21.44	22.37	23.69	24.79	25.69	26.57
	Преко дос. [‰]	1.30	1.20	1.00	1.00	0.70	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	Испод дос. [‰]	1.50	1.50	1.60	1.60	1.60	1.80	1.90	1.90	1.90	1.90
	Осјена	4.86	4.69	4.51	4.33	4.21	4.05	3.83	3.73	3.61	3.50
POLI _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	17.72	18.34	18.94	19.55	20.16	20.78	21.69	22.62	23.52	24.45
	Преко дос. [‰]	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	1.40	1.50	1.50	1.60	1.60	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
	Осјена	5.18	4.99	4.84	4.68	4.57	4.45	4.26	4.10	3.93	3.78

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=30\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реар. [ms]	17.29	17.97	18.69	19.42	20.14	20.86	21.88	22.81	23.72	24.63
	Преко дос. [‰]	6.30	6.00	5.50	5.10	4.30	3.70	2.70	1.80	1.10	0.70
	Испод дос. [‰]	2.00	2.00	2.10	2.10	2.40	2.60	2.70	2.80	2.90	2.90
	Оцена	3.91	3.85	3.80	3.76	3.73	3.68	3.67	3.65	3.61	3.54
POLI2	Вр. Реар. [ms]	11.37	12.27	13.29	14.35	15.28	16.15	17.43	18.77	20.07	21.32
	Преко дос. [‰]	103.50	100.40	96.10	88.30	76.00	59.00	34.10	13.90	3.10	1.10
	Испод дос. [‰]	1.40	1.60	1.70	1.70	1.90	2.10	2.20	2.40	2.40	2.50
	Оцена	0.86	0.88	0.90	0.96	1.07	1.29	1.86	2.85	3.91	4.01
POLI3	Вр. Реар. [ms]	17.79	18.60	19.45	20.35	21.22	22.03	23.19	24.15	25.03	25.93
	Преко дос. [‰]	7.60	7.60	7.50	7.10	6.50	5.80	4.50	2.80	1.40	0.80
	Испод дос. [‰]	2.20	2.20	2.30	2.40	2.40	2.60	2.60	2.80	2.80	2.80
	Оцена	3.62	3.52	3.42	3.35	3.32	3.29	3.30	3.36	3.42	3.39
POLI _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.68	18.30	18.92	19.53	20.14	20.75	21.66	22.57	23.49	24.41
	Преко дос. [‰]	2.70	2.60	2.40	2.10	1.80	1.70	1.00	0.70	0.70	0.50
	Испод дос. [‰]	2.00	2.10	2.10	2.30	2.40	2.50	2.50	2.60	2.70	2.80
	Оцена	4.47	4.35	4.27	4.18	4.11	4.01	3.97	3.87	3.72	3.61

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=25\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реар. [ms]	16.98	17.65	18.33	19.01	19.72	20.39	21.38	22.32	23.23	24.14
	Преко дос. [‰]	12.30	11.90	11.40	10.60	9.80	8.80	8.20	7.10	5.40	3.50
	Испод дос. [‰]	3.90	4.00	4.40	4.80	4.90	5.40	5.70	5.90	5.90	6.00
	Оцена	3.01	2.98	2.93	2.91	2.91	2.89	2.83	2.83	2.90	2.97
POLI2	Вр. Реар. [ms]	11.31	12.15	13.07	14.08	15.04	15.95	17.18	18.43	19.67	20.90
	Преко дос. [‰]	103.40	101.30	96.80	89.90	79.80	66.00	42.30	22.00	7.90	2.90
	Испод дос. [‰]	3.00	3.10	3.60	4.10	4.20	4.40	4.80	4.90	5.10	5.30
	Оцена	0.85	0.86	0.88	0.93	1.01	1.16	1.56	2.21	3.06	3.44
POLI3	Вр. Реар. [ms]	17.69	18.48	19.30	20.10	20.92	21.66	22.73	23.68	24.60	25.49
	Преко дос. [‰]	15.20	14.80	14.00	13.20	12.60	11.60	10.90	9.10	7.60	5.30
	Испод дос. [‰]	4.70	4.80	5.00	5.30	5.40	5.50	5.60	5.80	5.90	5.90
	Оцена	2.66	2.63	2.61	2.59	2.57	2.58	2.55	2.59	2.62	2.73
POLI _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.67	18.29	18.89	19.51	20.12	20.73	21.64	22.55	23.47	24.41
	Преко дос. [‰]	9.00	8.40	7.70	7.10	6.60	5.50	4.20	3.00	2.20	1.70
	Испод дос. [‰]	4.70	4.90	5.00	5.30	5.30	5.50	5.60	5.80	5.90	6.00
	Оцена	3.19	3.17	3.17	3.13	3.12	3.15	3.18	3.19	3.17	3.11

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=20\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реар. [ms]	17.19	17.87	18.52	19.22	19.90	20.58	21.54	22.46	23.37	24.28
	Преко дос. [‰]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	4.90	5.10	5.50	5.80	5.80	6.50	6.90	7.20	7.20	7.20
	Оцена	4.51	4.33	4.15	3.98	3.89	3.69	3.52	3.37	3.27	3.18
POLI2	Вр. Реар. [ms]	11.23	12.06	12.92	13.90	14.87	15.79	17.01	18.15	19.41	20.63
	Преко дос. [‰]	64.90	59.40	51.90	43.30	33.20	23.10	9.60	3.10	0.60	0.20
	Испод дос. [‰]	3.50	3.90	4.40	4.60	4.60	5.00	5.60	6.00	6.30	6.50
	Оцена	1.26	1.33	1.44	1.62	1.90	2.28	3.11	3.67	3.80	3.66
POLI3	Вр. Реар. [ms]	17.74	18.52	19.34	20.16	20.95	21.70	22.74	23.71	24.61	25.49
	Преко дос. [‰]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	6.20	6.30	6.40	6.40	6.50	7.00	7.00	7.10	7.10	7.30
	Оцена	4.16	4.01	3.87	3.75	3.63	3.47	3.35	3.24	3.15	3.05
POLI _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.74	18.36	18.98	19.59	20.21	20.81	21.73	22.63	23.55	24.47
	Преко дос. [‰]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	6.10	6.20	6.30	6.40	6.50	6.50	7.10	7.10	7.20	7.30
	Оцена	4.18	4.05	3.94	3.83	3.74	3.66	3.47	3.36	3.25	3.15

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=15\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реар. [ms]	16.85	17.52	18.16	18.82	19.48	20.13	21.08	22.04	22.98	23.92
	Преко дос. [‰]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	10.10	10.20	11.10	11.70	13.00	13.40	14.00	14.70	15.10	15.60
	Оцјена	3.70	3.59	3.41	3.27	3.07	2.97	2.85	2.72	2.63	2.53
POLI2	Вр. Реар. [ms]	11.22	12.01	12.84	13.71	14.61	15.54	16.83	17.95	19.04	20.18
	Преко дос. [‰]	51.70	47.10	41.20	34.00	25.20	17.60	7.70	3.20	0.80	0.20
	Испод дос. [‰]	7.50	8.00	8.70	9.40	10.30	10.70	11.60	12.40	13.00	13.40
	Оцјена	1.42	1.49	1.59	1.75	2.00	2.28	2.77	2.98	3.05	2.96
POLI3	Вр. Реар. [ms]	17.70	18.45	19.24	20.03	20.77	21.46	22.47	23.46	24.43	25.37
	Преко дос. [‰]	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	12.60	12.70	13.00	13.20	13.40	13.80	14.10	14.40	15.00	15.30
	Оцјена	3.28	3.19	3.09	3.00	2.92	2.83	2.73	2.64	2.54	2.46
POLI _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.76	18.38	18.98	19.60	20.21	20.83	21.74	22.66	23.57	24.50
	Преко дос. [‰]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	12.40	12.90	13.20	13.50	13.70	14.10	14.60	14.60	15.20	15.40
	Оцјена	3.30	3.19	3.10	3.01	2.94	2.86	2.75	2.68	2.58	2.51

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=10\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реар. [ms]	16.56	17.20	17.86	18.50	19.13	19.78	20.78	21.81	22.87	23.86
	Преко дос. [‰]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	19.10	19.70	20.70	21.90	23.70	25.30	26.70	28.60	29.90	30.40
	Оцјена	2.80	2.71	2.59	2.48	2.33	2.22	2.11	1.98	1.89	1.84
POLI2	Вр. Реар. [ms]	11.22	12.01	12.83	13.66	14.48	15.33	16.67	17.80	18.92	20.01
	Преко дос. [‰]	34.00	31.00	27.50	21.10	15.90	11.40	5.90	2.90	1.10	0.30
	Испод дос. [‰]	15.00	15.70	16.50	17.90	19.50	21.10	23.10	25.30	26.60	27.30
	Оцјена	1.66	1.70	1.76	1.90	2.00	2.09	2.19	2.17	2.15	2.10
POLI3	Вр. Реар. [ms]	17.81	18.57	19.36	20.15	20.89	21.64	22.77	23.95	25.09	26.10
	Преко дос. [‰]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	23.30	23.50	24.00	24.60	25.10	25.80	26.70	27.60	28.60	29.40
	Оцјена	2.43	2.38	2.31	2.23	2.17	2.11	2.02	1.94	1.86	1.80
POLI _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.82	18.44	19.04	19.66	20.27	20.90	21.82	22.75	23.65	24.57
	Преко дос. [‰]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [‰]	23.80	24.50	25.10	26.10	26.50	27.30	27.80	28.20	29.40	30.00
	Оцјена	2.40	2.33	2.27	2.19	2.14	2.07	2.02	1.96	1.89	1.83

Кружне карактеристике $N=4$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реар. [ms]	17.49	18.15	18.85	19.53	20.19	20.83	21.77	22.68	23.60	24.52
	Преко дос. [‰]	22.30	22.10	21.60	21.00	20.40	19.60	18.80	17.90	17.30	16.70
	Испод дос. [‰]	5.10	5.20	5.20	5.60	5.90	6.40	6.60	7.00	7.20	7.60
	Оцјена	2.23	2.20	2.19	2.17	2.15	2.14	2.12	2.10	2.08	2.05
МНО _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.19	17.84	18.48	19.13	19.77	20.39	21.30	22.23	23.14	24.06
	Преко дос. [‰]	22.20	22.10	21.40	21.10	20.60	20.00	19.00	17.90	17.10	16.50
	Испод дос. [‰]	5.30	5.40	5.60	5.60	5.80	6.30	6.60	6.70	7.30	7.50
	Оцјена	2.24	2.21	2.20	2.18	2.17	2.14	2.13	2.14	2.10	2.08

Кружне карактеристике $N=5$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реар. [ms]	17.78	18.42	19.09	19.75	20.38	21.01	21.93	22.84	23.75	24.68
	Преко дос. [‰]	13.80	13.70	13.60	13.40	13.00	12.80	12.00	11.20	10.60	10.00
	Испод дос. [‰]	3.10	3.50	3.70	3.80	3.80	4.30	4.30	4.60	4.90	5.00
	Оцјена	2.88	2.81	2.75	2.71	2.69	2.62	2.62	2.59	2.55	2.52
МНО _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.36	17.99	18.62	19.24	19.86	20.47	21.39	22.30	23.22	24.15
	Преко дос. [‰]	14.40	14.30	13.90	13.70	13.30	12.90	12.20	11.40	10.60	10.10
	Испод дос. [‰]	3.30	3.30	3.40	3.70	3.80	4.10	4.20	4.60	4.80	5.00
	Оцјена	2.85	2.81	2.78	2.73	2.71	2.67	2.65	2.61	2.59	2.55

Кружне карактеристике $N=6$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реар. [ms]	17.99	18.63	19.27	19.92	20.54	21.15	22.06	22.98	23.89	24.82
	Преко дос. [%]	7.20	7.10	7.10	6.90	6.50	6.30	5.90	5.80	5.20	4.60
	Испод дос. [%]	2.60	2.70	2.70	2.70	2.70	3.00	3.30	3.50	3.50	3.70
	Осјена	3.60	3.52	3.44	3.39	3.36	3.28	3.20	3.10	3.07	3.02
МНО _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.45	18.07	18.69	19.31	19.93	20.54	21.46	22.37	23.28	24.21
	Преко дос. [%]	7.40	7.30	7.10	7.10	6.60	6.30	6.00	5.70	5.20	4.60
	Испод дос. [%]	2.30	2.40	2.50	2.60	2.80	2.90	3.00	3.60	3.60	3.60
	Осјена	3.68	3.60	3.53	3.45	3.41	3.36	3.28	3.16	3.12	3.09

Кружне карактеристике $N=7$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реар. [ms]	18.18	18.81	19.45	20.07	20.68	21.29	22.21	23.12	24.03	24.96
	Преко дос. [%]	3.30	3.30	3.30	2.90	2.60	2.20	2.10	1.90	1.70	1.40
	Испод дос. [%]	2.60	2.70	2.90	3.00	3.00	3.20	3.20	3.20	3.40	3.40
	Осјена	4.15	4.03	3.90	3.85	3.81	3.75	3.64	3.54	3.43	3.36
МНО _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.52	18.13	18.74	19.36	19.98	20.58	21.50	22.41	23.33	24.24
	Преко дос. [%]	3.30	3.30	3.20	3.00	2.80	2.30	2.00	1.80	1.60	1.40
	Испод дос. [%]	2.70	2.70	2.80	2.90	2.90	3.20	3.20	3.20	3.30	3.30
	Осјена	4.25	4.14	4.04	3.96	3.89	3.83	3.75	3.65	3.54	3.46

Кружне карактеристике $N=8$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реар. [ms]	18.33	18.96	19.58	20.21	20.82	21.43	22.35	23.27	24.19	25.11
	Преко дос. [%]	0.80	0.60	0.60	0.60	0.60	0.50	0.30	0.20	0.10	0.10
	Испод дос. [%]	3.10	3.10	3.10	3.10	3.40	3.60	3.70	3.70	3.70	3.80
	Осјена	4.50	4.41	4.29	4.18	4.03	3.92	3.79	3.68	3.57	3.45
МНО _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.54	18.16	18.78	19.39	20.00	20.62	21.53	22.45	23.37	24.31
	Преко дос. [%]	0.90	0.70	0.60	0.60	0.60	0.50	0.30	0.20	0.10	0.10
	Испод дос. [%]	3.20	3.30	3.40	3.40	3.40	3.50	3.60	3.60	3.70	3.80
	Осјена	4.62	4.51	4.39	4.28	4.17	4.06	3.93	3.81	3.68	3.55

Кружне карактеристике $N=9$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реар. [ms]	18.47	19.10	19.72	20.34	20.96	21.58	22.49	23.40	24.33	25.25
	Преко дос. [%]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [%]	3.80	3.90	3.90	3.90	4.00	4.00	4.30	4.40	4.40	4.40
	Осјена	4.47	4.33	4.22	4.11	3.99	3.89	3.73	3.60	3.48	3.37
МНО _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.58	18.19	18.80	19.43	20.04	20.65	21.56	22.47	23.41	24.33
	Преко дос. [%]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [%]	3.70	3.70	3.70	3.80	3.90	4.20	4.30	4.40	4.50	4.50
	Осјена	4.68	4.55	4.42	4.29	4.16	4.01	3.87	3.72	3.58	3.47

Кружне карактеристике $N=10$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реар. [ms]	18.66	19.29	19.91	20.53	21.15	21.75	22.68	23.60	24.51	25.44
	Преко дос. [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [%]	4.00	4.10	4.10	4.20	4.40	4.50	4.50	4.50	4.70	4.70
	Осјена	4.41	4.28	4.17	4.04	3.91	3.81	3.68	3.56	3.42	3.32
МНО _{DFT}	Вр. Реар. [ms]	17.64	18.26	18.88	19.49	20.11	20.72	21.64	22.56	23.48	24.40
	Преко дос. [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Испод дос. [%]	4.10	4.20	4.20	4.20	4.20	4.30	4.40	4.40	4.60	4.60
	Осјена	4.60	4.45	4.33	4.22	4.11	4.00	3.84	3.71	3.56	3.45

Процјене утицаја подешеног досега по R оси, на поузданост и сигурност, дате су у наставку.

Поузданост у [%] у функцији подешеног досега карактер.

$R_{\text{pod}} [\Omega]$	10	15	20	25	30	35	40
POL11	98.09	98.99	99.51	99.61	99.8	99.89	99.93
POL12	97.27	98.66	99.35	99.47	99.75	99.82	99.93
POL13	97.67	98.74	99.38	99.53	99.78	99.85	99.86
POL1 _{DFT}	97.62	98.76	99.39	99.53	99.8	99.86	99.91

Сигурност у [%] у функцији подешеног досега карактер.

$R_{\text{pod}} [\Omega]$	10	15	20	25	30	35	40
POL11	100	99.99	99.99	98.77	99.37	99.97	97.36
POL12	99.97	99.98	99.98	99.71	99.89	99.98	97.8
POL13	100	99.98	99.99	98.49	99.24	99.87	97.06
POL1 _{DFT}	100	99.99	99.99	99.1	99.73	99.98	98.42

Поузданост у [%] у функцији подешеног досега карактер.

N	10	9	8	7	6	5	4
MHO	99.6	99.62	99.69	99.74	99.74	99.69	99.49
MHO _{DFT}	99.59	99.63	99.68	99.73	99.77	99.67	99.47

Сигурност у [%] у функцији подешеног досега карактер.

N	10	9	8	7	6	5	4
MHO	100	99.99	99.92	99.67	99.28	98.62	97.77
MHO _{DFT}	100	99.99	99.91	99.67	99.26	98.56	97.78

ПРИЛОГ 2

У наставку су дати резултати тестирања полигоналних и кружних карактеристика за услове у фиктивној мрежи из поглавља 7.2. Толеранција на граници реаговања износи 5%.

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=35\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реаг. [ms]	15.59	16.33	17.10	17.94	18.78	19.64	20.90	22.00	22.96	23.85
	Преко дос. [%о]	7.10	6.70	6.40	6.40	5.90	5.30	5.00	4.80	4.30	4.00
	Испод дос. [%о]	6.40	6.60	6.90	7.00	7.20	7.30	7.40	7.90	8.20	8.80
	Осјена	3.44	3.37	3.29	3.19	3.14	3.10	3.00	2.88	2.82	2.73
POLI2	Вр. Реаг. [ms]	11.64	12.52	13.22	13.88	14.61	15.48	16.93	18.31	19.71	21.01
	Преко дос. [%о]	80.90	77.50	74.00	68.80	61.30	52.40	36.80	22.40	9.00	4.20
	Испод дос. [%о]	2.90	3.00	3.40	3.80	4.10	4.20	4.90	5.10	7.40	8.50
	Осјена	1.05	1.08	1.10	1.16	1.25	1.39	1.71	2.18	2.77	2.97
POLI3	Вр. Реаг. [ms]	18.01	18.90	19.87	20.85	21.83	22.74	24.05	25.17	26.11	26.99
	Преко дос. [%о]	9.70	9.40	8.70	7.70	7.20	6.30	5.50	5.10	4.60	4.20
	Испод дос. [%о]	6.40	6.60	6.90	7.50	7.50	7.60	7.60	7.70	8.00	8.80
	Осјена	2.93	2.87	2.82	2.77	2.74	2.73	2.69	2.63	2.58	2.50
POLI _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.71	17.34	17.95	18.57	19.18	19.80	20.72	21.63	22.54	23.46
	Преко дос. [%о]	5.80	5.80	5.60	5.40	5.30	5.20	4.90	4.30	3.90	3.70
	Испод дос. [%о]	6.70	6.80	7.00	7.30	7.70	8.10	8.40	9.10	9.40	9.40
	Осјена	3.42	3.34	3.27	3.20	3.11	3.02	2.94	2.85	2.79	2.74

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=40\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реаг. [ms]	15.31	16.05	16.84	17.68	18.53	19.41	20.64	21.76	22.70	23.60
	Преко дос. [%о]	35.10	34.20	33.00	32.20	31.20	30.50	28.40	26.60	24.00	20.90
	Испод дос. [%о]	4.00	4.10	4.20	4.30	4.50	4.70	5.10	5.30	5.40	5.40
	Осјена	1.84	1.84	1.85	1.85	1.84	1.83	1.85	1.86	1.92	2.00
POLI2	Вр. Реаг. [ms]	11.55	12.46	13.18	13.87	14.62	15.48	16.91	18.33	19.72	21.01
	Преко дос. [%о]	100.20	97.20	93.40	87.80	82.00	76.50	64.90	48.00	31.20	18.70
	Испод дос. [%о]	2.10	2.20	2.40	2.80	3.10	3.20	3.60	3.90	4.40	5.00
	Осјена	0.88	0.89	0.92	0.96	1.00	1.05	1.17	1.42	1.81	2.24
POLI3	Вр. Реаг. [ms]	17.84	18.77	19.73	20.72	21.71	22.63	23.93	25.08	26.03	26.89
	Преко дос. [%о]	39.90	38.90	37.50	36.50	35.20	33.20	30.30	28.90	25.90	22.20
	Испод дос. [%о]	4.20	4.40	4.60	4.90	5.00	5.00	5.10	5.20	5.40	5.70
	Осјена	1.61	1.61	1.62	1.61	1.62	1.64	1.69	1.69	1.74	1.83
POLI _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.55	17.17	17.79	18.40	19.01	19.62	20.53	21.44	22.36	23.27
	Преко дос. [%о]	24.80	24.60	23.80	22.60	21.90	21.10	18.90	17.10	15.90	14.80
	Испод дос. [%о]	4.00	4.10	4.20	4.50	5.00	5.40	5.50	5.70	5.90	5.90
	Осјена	2.21	2.18	2.18	2.20	2.18	2.17	2.23	2.26	2.26	2.27

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=45\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реаг. [ms]	15.59	16.37	17.20	18.08	19.03	20.01	21.47	22.72	23.74	24.66
	Преко дос. [%о]	10.90	10.40	9.60	8.30	7.40	6.80	6.20	5.10	4.70	4.30
	Испод дос. [%о]	4.30	4.40	4.60	4.70	5.00	5.10	5.30	5.40	6.00	6.30
	Осјена	3.25	3.21	3.18	3.22	3.18	3.13	3.03	3.01	2.90	2.84
POLI2	Вр. Реаг. [ms]	11.58	12.46	13.16	13.88	14.69	15.61	17.16	18.72	20.25	21.68
	Преко дос. [%о]	88.20	85.20	81.30	75.50	66.90	59.50	41.80	26.00	10.40	4.50
	Испод дос. [%о]	1.50	1.70	1.80	2.00	2.30	2.40	2.60	2.80	4.20	5.70
	Осјена	0.99	1.01	1.04	1.09	1.19	1.29	1.62	2.10	2.87	3.14
POLI3	Вр. Реаг. [ms]	17.96	18.91	19.97	21.05	22.11	23.15	24.66	25.93	26.98	27.87
	Преко дос. [%о]	17.60	16.20	14.20	11.90	10.10	8.70	7.00	5.80	5.30	4.60
	Испод дос. [%о]	4.30	4.50	4.60	4.80	5.00	5.00	5.30	5.50	5.70	6.40
	Осјена	2.51	2.52	2.58	2.65	2.69	2.71	2.71	2.69	2.63	2.57
POLI _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.68	17.30	17.92	18.52	19.14	19.75	20.67	21.58	22.50	23.41
	Преко дос. [%о]	6.10	6.00	5.90	5.80	5.60	5.40	5.10	4.70	4.30	4.00
	Испод дос. [%о]	4.50	4.60	4.60	5.10	5.50	6.00	6.40	7.00	7.30	7.40
	Осјена	3.67	3.58	3.52	3.40	3.31	3.21	3.11	3.00	2.93	2.87

Полигоналне карактеристике $R_{pod}=50\Omega$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
POLI1	Вр. Реаг. [ms]	15.33	16.11	16.95	17.84	18.78	19.75	21.19	22.49	23.52	24.43
	Преко дос. [%о]	38.90	38.00	37.20	35.70	34.20	32.40	29.90	27.60	25.10	21.30
	Испод дос. [%о]	2.60	2.60	2.90	3.10	3.20	3.20	3.20	3.30	3.60	3.60
	Осјена	1.76	1.76	1.75	1.77	1.78	1.81	1.84	1.87	1.92	2.03
POLI2	Вр. Реаг. [ms]	11.52	12.44	13.14	13.88	14.69	15.64	17.20	18.75	20.26	21.66
	Преко дос. [%о]	103.00	100.20	96.30	90.30	84.60	79.30	67.10	49.10	29.80	18.30
	Испод дос. [%о]	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	1.90	2.00	2.20	2.50	2.90
	Осјена	0.87	0.88	0.90	0.95	0.99	1.03	1.16	1.43	1.90	2.33
POLI3	Вр. Реаг. [ms]	17.79	18.75	19.80	20.94	22.00	23.04	24.56	25.85	26.89	27.76
	Преко дос. [%о]	44.40	44.00	42.50	41.10	38.10	36.00	33.30	29.60	26.60	21.90
	Испод дос. [%о]	2.80	2.80	3.00	3.10	3.10	3.10	3.20	3.40	3.40	3.80
	Осјена	1.54	1.53	1.53	1.54	1.58	1.61	1.64	1.70	1.76	1.87
POLI _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.49	17.11	17.74	18.36	18.96	19.58	20.49	21.40	22.31	23.22
	Преко дос. [%о]	22.70	22.00	21.80	21.00	19.90	19.20	17.20	16.00	15.10	13.40
	Испод дос. [%о]	2.60	2.70	2.70	2.80	3.10	3.60	3.90	4.10	4.20	4.20
	Осјена	2.39	2.39	2.37	2.37	2.38	2.36	2.40	2.41	2.40	2.45

Кружне карактеристике $N=8$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
MHO	Вр. Реаг. [ms]	17.09	17.72	18.34	18.97	19.59	20.20	21.12	22.05	22.96	23.88
	Преко дос. [%о]	10.60	10.60	10.40	10.40	10.20	9.70	9.10	8.80	8.30	8.20
	Испод дос. [%о]	10.80	11.20	11.60	11.70	11.80	12.20	12.40	12.60	12.80	13.00
	Осјена	2.60	2.53	2.48	2.43	2.40	2.38	2.35	2.30	2.27	2.22
MHO _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.63	17.25	17.87	18.48	19.10	19.72	20.61	21.54	22.46	23.39
	Преко дос. [%о]	10.70	10.70	10.50	10.40	10.30	9.90	9.10	8.80	8.10	7.90
	Испод дос. [%о]	11.50	11.60	11.60	11.80	11.80	12.00	12.80	13.10	13.30	13.70
	Осјена	2.58	2.53	2.50	2.46	2.43	2.40	2.35	2.30	2.28	2.22

Кружне карактеристике $N=9$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
MHO	Вр. Реаг. [ms]	17.22	17.85	18.47	19.10	19.71	20.33	21.26	22.18	23.09	24.00
	Преко дос. [%о]	5.70	5.70	5.70	5.60	5.50	5.30	5.20	4.80	4.50	4.40
	Испод дос. [%о]	14.90	15.00	15.00	15.10	15.50	15.70	16.00	16.10	16.10	16.50
	Осјена	2.64	2.59	2.55	2.51	2.46	2.42	2.36	2.32	2.29	2.23
MHO _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.70	17.31	17.93	18.55	19.17	19.78	20.69	21.62	22.52	23.44
	Преко дос. [%о]	6.20	6.10	6.10	6.00	5.80	5.40	5.10	4.70	4.50	4.10
	Испод дос. [%о]	15.10	15.10	15.10	15.30	15.30	15.50	16.00	16.30	16.80	17.20
	Осјена	2.63	2.60	2.56	2.51	2.48	2.46	2.39	2.35	2.28	2.23

Кружне карактеристике $N=10$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реаг. [ms]	17.36	17.98	18.61	19.23	19.85	20.47	21.39	22.30	23.22	24.12
	Преко дос. [%]	3.10	3.10	3.10	2.90	2.80	2.70	2.70	2.60	2.60	2.60
	Испод дос. [%]	17.60	17.80	18.10	18.30	18.40	18.60	19.00	19.50	19.70	19.80
	Осјена	2.63	2.57	2.51	2.47	2.44	2.39	2.32	2.25	2.20	2.15
МНО _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.76	17.38	17.99	18.61	19.22	19.85	20.76	21.68	22.60	23.50
	Преко дос. [%]	3.40	3.30	3.30	3.10	3.00	2.90	2.80	2.70	2.60	2.50
	Испод дос. [%]	18.00	18.10	18.30	18.40	18.50	18.60	18.90	19.50	20.20	20.60
	Осјена	2.62	2.58	2.53	2.49	2.46	2.42	2.35	2.28	2.20	2.15

Кружне карактеристике $N=11$

Сигурнос. Каш.		2	4	6	8	10	12	15	18	21	24
МНО	Вр. Реаг. [ms]	17.49	18.10	18.72	19.33	19.95	20.57	21.50	22.41	23.34	24.25
	Преко дос. [%]	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
	Испод дос. [%]	22.90	23.10	23.30	24.00	24.10	24.30	24.40	24.60	25.00	25.20
	Осјена	2.33	2.28	2.24	2.18	2.14	2.11	2.06	2.02	1.96	1.92
МНО _{DFT}	Вр. Реаг. [ms]	16.82	17.43	18.04	18.66	19.28	19.89	20.80	21.72	22.64	23.56
	Преко дос. [%]	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.60	2.60	2.60	2.50
	Испод дос. [%]	23.00	23.00	23.10	23.10	23.30	24.20	24.90	25.10	25.50	25.80
	Осјена	2.35	2.32	2.28	2.25	2.21	2.14	2.07	2.02	1.97	1.93

БИОГРАФИЈА

Синиша Зубић је рођен 27.02.1982. године у Бугојну. Након завршетка средње Електротехничке школе у Вукосављу, 2000. године је уписао Електротехнички факултет у Бањој Луци. У току студија био је учесник неколико студентских такмичења у знању и освојио прво мјесто на Електријади 2003. године из области електричне машине. Основне студије завршио је у мају 2006. године.

Постдипломске студије је уписао 2006. године на Електротехничком факултету у Бањој Луци. Под менторством проф. др Миленка Ђурића узео је тему магистарске тезе под називом „Дистантни релеј за једнофазне кварове базиран на дигиталном фазном компаратору“, коју је одбранио 27.12.2010. године. Аутор или коаутор је 18 радова од којих је један објављен у међународном часопису, 3 на међународним конференцијама, а преостали на регионалним (Босна и Херцеговина и Србија) конференцијама и часописима. Коаутор је једне монографије и рецензент међународног часописа *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*.

Од 01.09.2006. године запослен је на Електротехничком факултету у Бањој Луци. У звање асистента на Катедри за електроенергетику изабран је 15.12.2006. године, док је у звање вишег асистента изабран у јануару 2012. године. Као асистент је ангажован на предметима Заштита у ЕЕС, Експлоатација ЕЕС и низу других предмета из области електроенергетски системи. На другом циклусу студија је ангажован као сарадник на предмету Квалитет електричне енергије. Учествовао је у имплементацији два пројекта од националног значаја из тематике обновљивих извора енергије и енергетске ефикасности.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Синиша Зубић

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Алгоритми за дистантне заштите на бази дигиталне фазне компарације

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 28.05.2013.

Зубић Синиша

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Синиша Зубић

Број индекса _____

Студијски програм Електроенергетски системи

Наслов рада Алгоритми за дистантне заштите на бази дигиталне фазне
компарације

Ментор проф. др Миленко Ђурић, ред. проф.

Потписани Синиша Зубић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 28.05.2013.

Зубић Синиша

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Алгоритми за дистантне заштите на бази дигиталне фазне компарације

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 28.05.2013.

